

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
им. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

Справ.

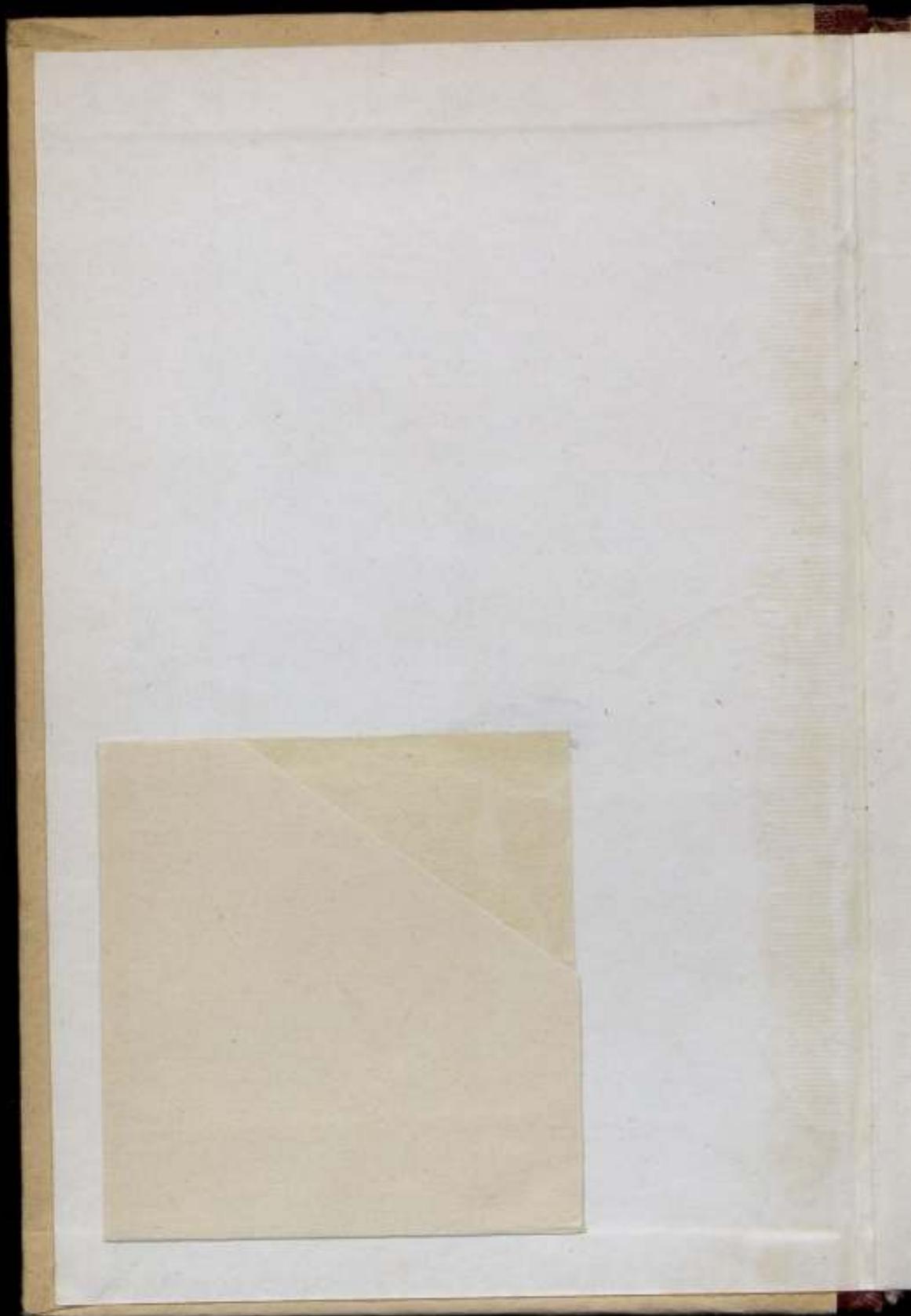
21/XII-72

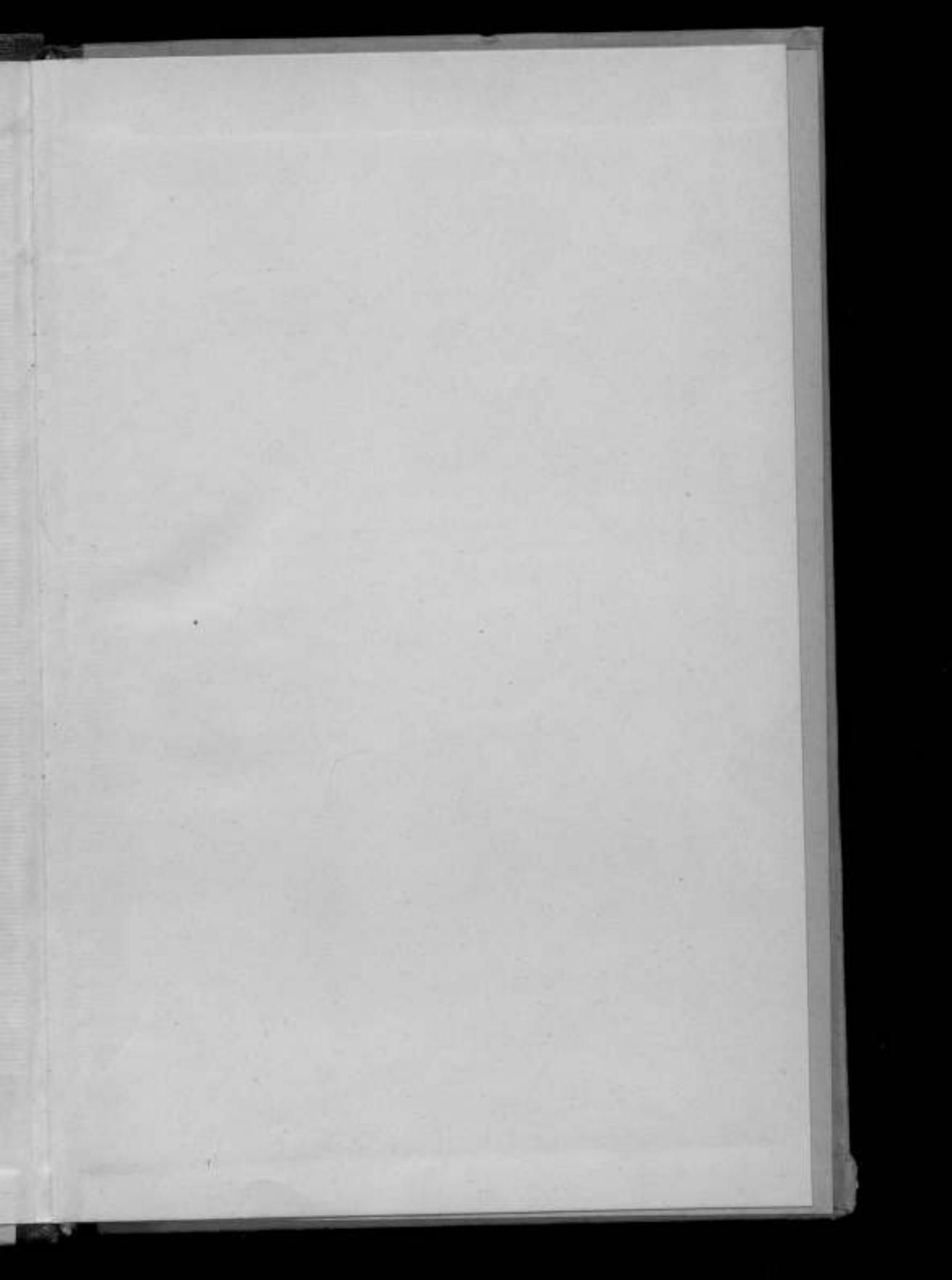
50 лет МЕТРИЧЕСКОЙ РЕФОРМЫ В СССР

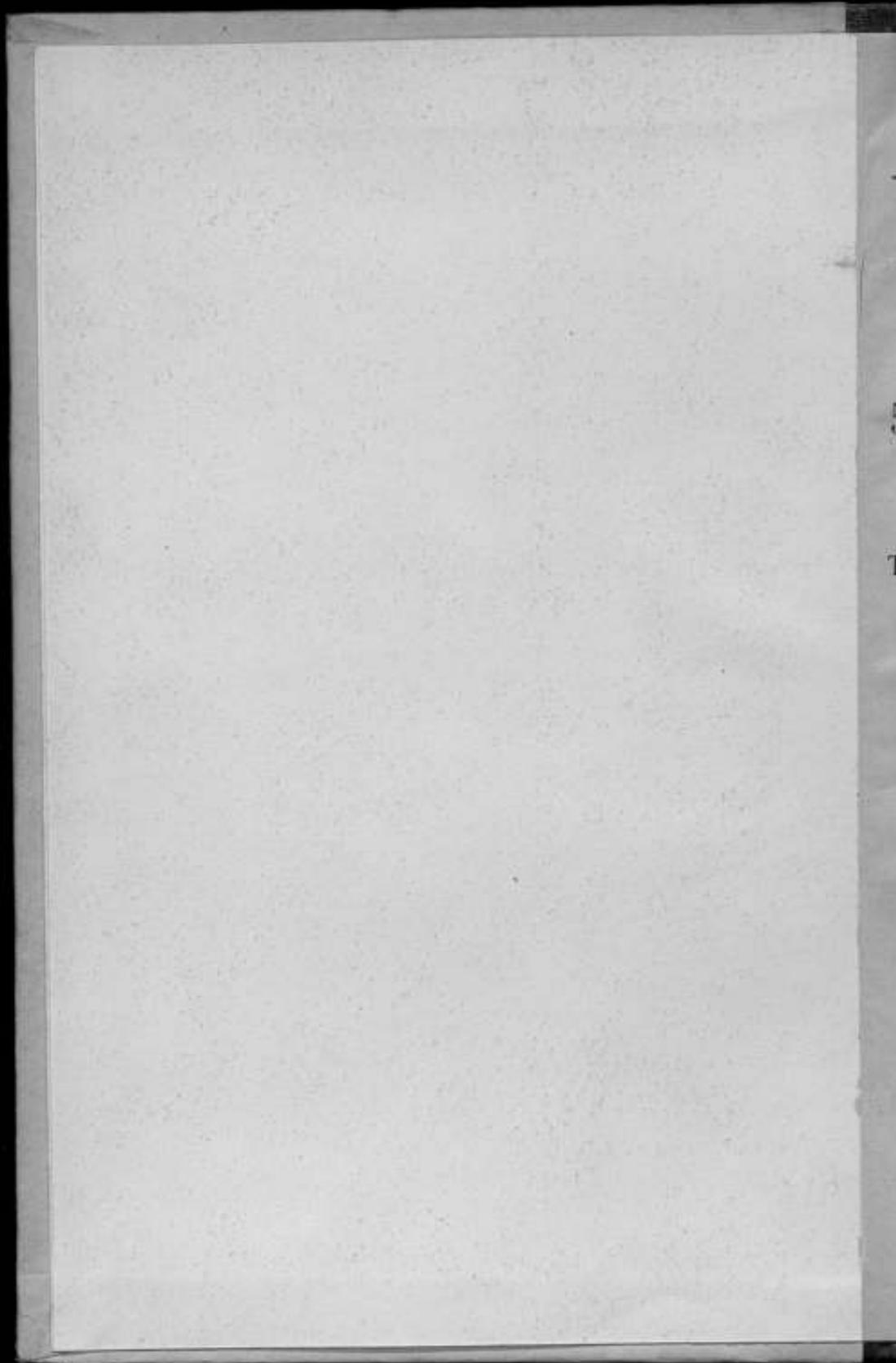
ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

ВЫПУСК 123(183)









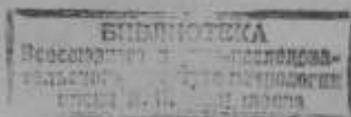
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ им. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

50 лет МЕТРИЧЕСКОЙ РЕФОРМЫ В СССР

ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

ВЫПУСК 123(183)

Под редакцией
д. т. н., проф. В. О. АРУТЮНОВА



ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ

МОСКВА-ЛЕНИНГРАД

1972

m/5593

Редакционный совет

В. О. Арутюнов (председатель), Н. Н. Александрова
(секретарь), С. В. Горбачевич, А. Н. Гордов, Е. Ф. До-
линский, А. И. Карташев, Л. К. Каяк, И. И. Киренков,
Д. К. Коллеров, Е. Д. Колтик, П. П. Кремлевский,
И. Н. Кротков, В. Л. Лассав, Б. Н. Олейник, Л. К. Пек-
кер, Т. Б. Рождественская, А. М. Федоров, Е. Н. Чечу-
рина, К. П. Широков, Е. Г. Шрамков, М. Ф. Юдин

Ответственный редактор
доктор технических наук, профессор
В. О. АРУТЮНОВ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Представители научно-технической общественности страны, работники заводов, научных учреждений и зарубежные гости приняли участие в работах происходившего в Ленинграде в 1968 г. симпозиума, посвященного 50-летию метрической реформы в нашей стране и 75-летию метрологического института, носящего имя великого русского ученого — Дмитрия Ивановича Менделеева.

Введенная декретом молодой Советской Республики в 1918 г. и проведенная в условиях экономической и хозяйственной разрухи метрическая система неизмеримо облегчила превращение нашей страны в передовую, могучую индустриальную державу — оплот мира и социализма.

Большая армия высококвалифицированных научных работников трудится в метрологических институтах и организациях СССР, обеспечивая выполнение задач по дальнейшему развитию советской метрологии, по расширению и укреплению метрологического обслуживания нашей страны, по укреплению наших связей с научными учреждениями и промышленными предприятиями.

Метрологическим центром страны является научно-исследовательский институт имени Д. И. Менделеева (ВНИИМ), которому принадлежит ведущая роль в деле развития отечественной метрологии.

За время, прошедшее после симпозиума, ВНИИМ им. Д. И. Менделеева на деле осуществил многие мероприятия, которые в докладах отмечались как неотложные задачи ближайших лет. Результаты этих работ публикуются в трудах института.

Большая научно-исследовательская деятельность института за истекшее пятилетие получила отражение в 364 выполненных научных работах, завершившихся изготовлением уникальных средств высокой точности. Разработаны, исследованы и утверждены в качестве государственных 15 новых эталонов и эталонных комплексов в области механических, теплофизических, электрических и магнитных измерений, а также в области измерения ионизирующих излучений.

За заслуги в развитии советской метрологии по итогам деятельности в восьмой пятилетке ВНИИМ им. Д. И. Менделеева награжден орденом Трудового Красного Знамени. Орденами и медалями СССР награждена большая группа научных сотрудников ВНИИМ.

В докладах и выступлениях участников симпозиума дан глубокий анализ значения метрической реформы и деятельности метрологических организаций страны. В докладах освещено не только состояние работ в различных областях метрологии, но и намечены перспективы ее дальнейшего развития. В настоящий сборник и включены доклады, прочитанные на симпозиуме.

Редактор

**50-ЛЕТНИЕ МЕТРИЧЕСКОЙ РЕФОРМЫ В СССР
И 75-ЛЕТНИЕ ВНИИМ имени Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА**

(ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО)

Метрическая система мер и весов была введена по предложению В. И. Ленина в 1918 г. декретом правительства молодой Советской республики. Эта реформа была проведена в условиях невероятной экономической и хозяйственной разрухи, в условиях нищеты и неграмотности большинства населения тогдашней России. Только теперь мы можем полностью оценить огромную значимость метрической реформы, которая неизмеримо облегчила превращение нашей страны в передовую, могучую индустриальную державу — оплот мира и социализма. Руководство по практическому проведению метрической реформы было возложено на Главную палату мер и весов.

Отмечая 50-летие метрической реформы, мы отмечаем ту большую роль, которую сыграла в ее проведении Главная палата мер и весов, ныне институт имени Д. И. Менделеева.

Вопрос о введении в России метрической системы многократно ставился на повестку дня, начиная с середины XIX века. Однако консерватизм и недалекость царского правительства не позволили провести эту реформу.

Д. И. Менделеев, первый управляющий Главной палатой мер и весов, еще в 1870 г., т. е. до заключения Метрической Конвенции, выступил с докладом о необходимости введения метрической системы. В своем докладе он говорил: «Облегчим же и мы на нашем скромном поприще возможность всеобщего распространения метрической системы и через то поспособствуем общей пользе и будущему желанному сближению народов».

Став управляющим Главной палатой, Дмитрий Иванович Менделеев провел большую исследовательскую работу по установлению точных соотношений русских и метрических мер,

а также осуществил комплекс работ, которые в последующем послужили технической базой для проведения метрической реформы в нашей стране.

Большой и славный путь пройден метрологами за годы Советской власти. Государственная метрологическая служба превратилась в эффективную научно-техническую систему, которая влияет на все отрасли народного хозяйства и оборону страны. Для современного развития науки и техники, а также для промышленности и сельского хозяйства характерным является большой размах научных исследований.

В этих условиях совершенно очевидно, что уровень измерительной техники и ее научной основы — метрологии — играет решающую роль в общетехническом прогрессе народного хозяйства страны. Всеобщее признание получило положение о том, что метрология является основой научного эксперимента и техники контроля. Масштабы и глубина метрологических работ в значительной мере определяют полноту и научно-технический уровень проводимых исследований и правильность технологических процессов в производстве. При этом крайне важно, чтобы развитие метрологии, и в особенности ее эталонной базы, имело опережающий характер для полного удовлетворения быстро возрастающих запросов современной науки и техники в точных измерениях.

Поэтому важнейшей задачей всех метрологов является всемерное развитие работ по созданию и совершенствованию государственных эталонов, по обеспечению единства мер и измерений в стране.

Партия и Советское правительство на протяжении всей истории нашего государства уделяют огромное внимание развитию метрологии и стандартизации. Метрологическая служба Советского Союза в настоящее время представляет собой разветвленную сеть научных и контрольно-измерительных организаций. Для характеристики тех больших изменений, какие произошли за последние годы в этой области, можно привести следующее сравнение.

В царской России было только одно научное учреждение — Главная палата мер и весов — и 25 поверочных «палаток», деятельность которых была направлена в основном на организацию поверки наиболее простых мер массового применения, используемых в торговле. Теперь в нашей стране работают 11 научных метрологических учреждений и более 300 государственных контрольных лабораторий. Их коллективы осуществляют разработку научных основ измерительной техники и ведут большую исследовательскую, поверочную и организационную работу для обеспечения нужд всех сфер народного хозяйства, науки и обороны страны.

За последние годы материально-техническая база метрологических научных учреждений значительно укрепилась и полу-

чила дальнейшее развитие. В ряде постановлений ЦК КПСС и правительства предусмотрены мероприятия по расширению и строительству метрологических учреждений. Так, объем финансирования за последнее пятилетие вырос более чем в 6 раз.

Метрологический центр страны — институт имени Д. И. Менделеева — неизмеримо вырос за годы Советской власти и по-прежнему выполняет ведущую роль в деле развития отечественной метрологии.

Его научные лаборатории, конструкторское бюро, экспериментальный завод ведут важнейшие исследования, создают и совершенствуют государственные эталоны, разрабатывают технику измерений высшей точности и проводят важные работы, связанные с решением сложных проблем, направленных на обеспечение технического прогресса.

Широки и плодотворны научные связи института с учреждениями Академии наук, институтами других ведомств и с международными метрологическими организациями.

Говоря о развитии метрологии в нашей стране, необходимо также остановиться и на характеристике ряда других метрологических институтов, родоначальником которых в той или иной степени был наш юбиляр. Так, одним из ведущих молодых институтов является Всесоюзный научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений.

Начав свою деятельность в 1954 г., этот институт за короткое время стал крупным научным учреждением, пользующимся заслуженным авторитетом и оказывающим значительное влияние на развитие точных измерений в важнейших областях новой техники.

Работы этого института по созданию эталонной базы радиоизмерений, государственной службы времени и частоты, акустики, низких температур, квантовой радиофизики, ионизирующих излучений являются основой развития техники точных измерений в радиоэлектронике, ядерной технике и других областях науки и техники.

Московский институт метрологии, начавший свою деятельность непосредственно после Великой Октябрьской Социалистической революции, наряду с теоретическими работами, осуществляет научное и методическое руководство в области законодательной метрологии в нашей стране. Этот институт является головной научной организацией, обеспечивающей руководство всеми работами по соблюдению единства мер и измерений в стране.

В лабораториях института разрабатываются научные основы организации метрологического обслуживания, методы испытаний и поверок измерительных устройств.

Одним из наших старейших научных учреждений является также Харьковский институт метрологии, получивший за время своей деятельности большую известность как в Советском

Союзе, так и за рубежом и создавший целую серию первоклассных приборов для измерений высоких и сверхвысоких температур. Харьковский метрологический институт осуществляет также обслуживание народного хозяйства Украины, Молдавии и юга Российской Федерации.

Большое будущее принадлежит Сибирскому институту метрологии. Этот институт создан в период Великой Отечественной войны и осуществляет метрологическое обслуживание Сибири и Средней Азии. Проводимые им работы являются ценным вкладом в развитие отечественной метрологии. Быстрое развитие народного хозяйства Сибири ставит на повестку дня вопрос о значительном расширении этого института и создании на его базе крупного метрологического центра.

Успешно развивается Свердловский филиал ВНИИМ, основная направленность работы которого — физико-химические измерения. В 1967 г., в соответствии с решением правительства, он определен как головной по организации и осуществлению Государственной службы стандартных образцов веществ и материалов в стране. Он является также основным научно-методологическим учреждением, обслуживающим Урал и прилегающие к нему районы.

За последние годы создан ряд новых научных метрологических организаций в разных частях Советского Союза, в том числе в Тбилиси, Иркутске, Хабаровске, Казани, Львове, Ереване. Они ведут научно-исследовательские работы в различных областях измерений, а также научно-метрологическое обслуживание соответствующих районов страны.

В настоящее время в метрологических институтах работает большая армия высококвалифицированных ученых, в том числе 6 академиков и членов-корреспондентов Академии наук, более 50 докторов и около 500 кандидатов технических наук. В институтах Комитета работают первоклассные конструкторы, чудесные умельцы-мастера, создающие уникальную эталонную аппаратуру.

Необходимо особо подчеркнуть, что за последние годы в работе наших институтов произошли принципиальные изменения, связанные с привлечением их к более активному участию в решении задач общегосударственного значения, вследствие чего становится особо важным укрепление и всемирное развитие наших связей с другими научными и промышленными организациями. Мы не сможем успешно решить всех стоящих перед нами задач, если не будет тесной связи с большой армией метрологов предприятий и организаций промышленности, институтов Академии наук и учебных заведений.

Мы придаем также исключительно большое и важное значение созданию и развитию республиканских, межобластных и местных лабораторий государственного надзора за стандартами и измерительной техникой.

Одной из главных задач этих лабораторий будет также установление постоянных связей и оказание научно-методической помощи предприятиям и организациям в области точных измерений.

Необходимо отметить, что в последние годы укрепились и стали более эффективными наши международные связи. Мы успешно работаем в международных метрологических организациях, таких, как Международная организация законодательной метрологии, Международный комитет мер и весов, Международная организация по стандартизации, Международная электротехническая комиссия и др. Активно сотрудничая с этими организациями, Советский Союз внес большое число рекомендаций и предложений по вопросам метрологии и стандартизации.

Необходимо также отметить большую работу в области теоретической и прикладной метрологии, которая проводится в рамках Совета экономической взаимопомощи.

За последнее время успешно развивается двустороннее научно-техническое сотрудничество с национальными метрологическими организациями социалистических стран, а также с Францией, Великобританией и Италией.

В нашей работе мы постоянно чувствуем внимание и поддержку со стороны Центрального Комитета Коммунистической партии Советского Союза и нашего правительства. Это еще раз говорит о той важной роли, которая отводится в нашей стране метрологии.

Отмечая большие достижения, мы сознаем большую ответственность перед Родиной за порученное дело. Поэтому мы обязаны и дальше неустанно работать над превращением метрологии в активное средство решения многих задач научно-технического прогресса, повышения качества продукции.

В связи с этим мне хотелось бы еще раз подчеркнуть невозможность успешного развития метрологических работ без тесной связи с наукой и в то же время отметить, что развитие естественных наук не может иметь места без точных измерений. Поэтому нам необходимо принять все меры для успешной работы и обеспечить тесное взаимодействие всех метрологических институтов с научно-исследовательскими учреждениями страны и, в первую очередь, с институтами Академии наук.

Мы также считаем, что без дальнейшего развития и расширения связей с промышленностью, а также без значительного развития и расширения метрологических служб в отраслях, без постоянной взаимной помощи и поддержки, мы не сможем достигнуть успехов в своей практической работе. Ведь, в конечном счете, работы наших институтов по созданию и совершенствованию эталонов, образцовых средств и методов измерений и должны быть направлены на удовлетворение насущных нужд народного хозяйства и, в первую очередь, на резкое

улучшение качества продукции и повышение производительности труда.

Подводя итоги, следует сказать, что, пожалуй, самое главное наше достижение, основное, что дает нам уверенность в нашей дальнейшей успешной работе, это то, что мы располагаем замечательными кадрами, способными решать новые задачи. Необходимо отметить, что труд метрологов высоко ценится нашим народом. Так, около 200 лучших работников были отмечены высокими правительственными наградами, а наш юбиляр награжден Почетным Знаменем ЦК КПСС, Президиума Верховного Совета СССР, Совета Министров СССР и ВЦСПС.

Более 700 специалистов-метрологов награждены нагрудным знаком «За заслуги в стандартизации». За достигнутые успехи в работе и создание новых уникальных измерительных средств около 300 специалистов-метрологов награждены медалями ВДНХ. Нескольким тысячам работников нашей системы присвоено звание ударников коммунистического труда.

Поступила в редакцию

17/11 1969 г.

**ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ ИМЕНИ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА
И МЕТРИЧЕСКАЯ РЕФОРМА**

Мы отмечаем большой праздник: исполнилось 50 лет метрической реформе в нашей стране и 75 лет старейшему метрологическому институту Советского Союза, институту, осуществившему внедрение метрической системы в жизнь.

Декрет о введении метрической системы в нашей стране, опубликованный в сентябре 1918 г., меньше чем через год после Великой Октябрьской социалистической революции, представляет собой революционный шаг огромного государственного значения. Декрет закладывал научные основы становления и дальнейшего развития науки, промышленности и сельского хозяйства первого в мире социалистического государства.

История возникновения метрической системы всем хорошо известна, но сегодня нельзя не отметить тот факт, что она создавалась в первые годы Французской революции. Главные идеи, положенные в основу этой системы, состояли в том, чтобы, во-первых, ликвидировать многообразие мер, существовавших в различных странах, и в первую очередь во Франции, и, во-вторых, создать систему по своей сути международную, пригодную для всех народов, на все времена.

Виднейшим ученым того времени: Кулону, Лапласу, Лавуазье, Лангранжу и др. — было поручено разработать научные основы этой новой системы, названной впоследствии метрической. Эти ученые установили, во-первых, необходимость в будущей метрической системе единиц применять десятичные подразделения и, во-вторых, принцип, по которому в основе системы должна быть единица, взятая из природы, дабы систему могли принять все науки. За такую единицу, после долгих дискуссий и обсуждений, была принята одна сорокамиллионная доля

парижского меридиана. Гюйгенс предлагал взять за основу длину секундного маятника (кстати, если принять полупериод колебания маятника, равный одной секунде, то длина такого маятника составит почти один метр), но, ввиду различия в значениях ускорения силы тяжести в различных пунктах земного шара, было решено взять за основу одну десятимиллионную долю четверти парижского меридиана, названную метром.

Таким образом, основой для системы послужила естественная единица. Часть ее, один кубический дециметр, образовывала объем, масса воды в котором и была принята за единицу массы — киллограмм. Интересно, что несмотря на столь высокую прогрессивность системы, несмотря на двукратное решение о ее введении: сначала Национальным собранием, а затем утверждение метра международной комиссией в 1795 г. — при практическом введении метрической системы государственные деятели Франции чинили всевозможные препятствия для ее внедрения. Такой деятель, как Наполеон, считал, что эта система противоречит разуму: «Нет ничего, более противоречащего складу ума, памяти и соображению — все что предлагают эти ученые. Абстракциям и пустым надеждам было принесено в жертву благо теперешних поколений, ибо, чтобы заставить старую нацию принять новые единицы мер и весов, надо переделать все административные правила, все расчеты промышленности. Такая работа устращает разум».

Это высказывание напоминает нечто подобное тому, что мы слышим сейчас относительно применения международной системы единиц.

В 1812 г. Наполеон ввел новую систему, в которую вновь вернул туаза (2 м) и многие другие единицы со старыми наименованиями, но приведенные к метрической системе. Против этого выступали многие ученые, в том числе и Лаплас. Лишь в 1837 г. метрическая система была очищена от этих наслоений и, наконец, принята во Франции. В 1849 г. ее принимает Испания, в 1868 г. — Германия. Между 1870 и 1889 гг. метрическую систему принимают в Австро-Венгрии, Турции, Греции, Румынии, Швеции, Норвегии, Болгарии, Бразилии и Мексике. И только Англия и Россия в Европе и Соединенные Штаты в Америке продолжают пользоваться своими собственными системами мер.

В прошлом веке, в период триумфального шествия метрической системы, научные круги России относились к ней с исключительной благожелательностью. В 1869 г. Академия наук России высказалась за метрическую систему. В докладе, написанном Якоби и представленном от имени трех академиков: Струве, Вильде и Якоби, было предложено создать международные прототипы. Выдвигалось следующее соображение: если каждая страна будет пользоваться своими копиями архивного метра, хранящегося во Франции, то неминуемо расхождение в значениях этих мер; предлагалось образовать международную орга-

низацию для создания международных прототипов мер. На основе этого предложения в результате ряда международных консультаций было решено создать такую организацию. В 1875 г., как известно, была подписана Метрическая Конвенция и создано Международное бюро мер и весов, первым шагом в работе которого стало создание прототипа метра и распределение его по жребью между странами.

Дмитрий Иванович Менделеев — основоположник русской метрологии, посвятивший этой науке последние 15 лет своей жизни, всегда был сторонником метрической системы. На первом съезде русских естествоиспытателей в 1870 г. Дмитрий Иванович сам сделал доклад о метрической системе мер и закончил его такими словами: «Облегчим же и на нашем скромном поприще возможность всеобщего распространения метрической системы, и через то поспособствуем общей пользе и будущему желанному сближению народов. Нескоро, понемногу, но оно обязательно придет. Пойдем же ему навстречу!».

Дмитрий Иванович Менделеев, создавая в 1893 г. Главную палату мер и весов, принял все необходимые меры, чтобы обеспечить впоследствии возможность быстрого внедрения метрической системы, в частности, при воспроизведении прототипов русских мер и создании закона о введении нового положения о мерах в России. Менделеев ввел в это положение достаточно точные соотношения между русскими и метрическими мерами. В это положение им же был введен параграф, допускающий факультативное применение метрических мер в России. В 1895 г. на заседании Русского технического общества известный русский физик Хвольсон замечательно высказался о метрической системе: «Метрическая система — есть сила стихийная, непреодолимая, и бороться с ней безрассудно. Откройте же ей ворота, и она войдет как друг, как благодетель, закройте дверь, она приступом, как враг, пойдет на вас, шаг за шагом отвоевывая себе территорию, проникая к вам через миллион щелей, осаждая со всех сторон, и шаг за шагом вам придется отдавать ей позиции. Перед непреодолимой силой вы, безусловно, сложите свое оружие, вы очутитесь в ее власти, в отчаянном положении».

Таким образом, русская научная общественность ратовала за введение метрической системы, несмотря на отсутствие прямых законоположений, делала все необходимое для того, чтобы практически ее можно было принять.

Вообще нужно сказать, что русские ученые во главе с Дмитрием Ивановичем Менделеевым гораздо раньше осознали необходимость и важность проведения планомерных работ в области метрологии, как практического дела по обеспечению единства измерений. Не случайно, примерно за 10 лет до возникновения метрологических институтов в других капиталистических странах, в 1893 г. организуется в России Главная палата мер и

весов, президентом которой становится Дмитрий Иванович Менделеев. Лишь спустя 8 лет организуется Национальное бюро стандартов в США и в 1900 г. — Национальная физическая лаборатория в Англии. Можно сказать, что в этот период вообще всюду начинают создаваться метрологические учреждения, так как к этому времени становится ясным, что без должного развития метрологии — научной основы измерительной техники, невозможно движение вперед не только самой измерительной техники, но, что гораздо важнее, движение в любой другой области человеческой деятельности, будь то в области научных изысканий или практического производства.

Создание Менделеевым Главной палаты мер и весов в сущности знаменует собой начало первого, так называемого менделеевского, периода развития русской метрологии, охватывающего примерно 25 лет до Великой Октябрьской социалистической революции. В этот период метрология, благодаря Менделееву, становится действительно наукой, ибо помимо воспроизведения прототипов русских мер, Дмитрий Иванович ставит главной задачей развитие научных исследований в области метрологии, следовательно, создание научных основ измерительной техники. Вспомните его личные научные исследования в этой области, например, теорию взвешивания и ту громадную работу по изучению практических результатов и материалов колоссального количества взвешиваний, которые были проделаны в стенах Главной палаты мер и весов в период с 1893 по 1898 гг., когда были созданы и утверждены высочайшим указом Сената прототипы русских мер (фунта и аршина). Этому предшествовала огромная практическая работа по детальному изучению прототипов мер, определению соотношения их с метрической системой, килограммом, метром.

Научные работы самого Менделеева и его сотрудников представляют собой начало развития собственно метрологии как науки. Но интересно, что работы по научным изысканиям, в том числе по определению физических констант, например, ускорения силы тяжести, поставленные лично Дмитрием Ивановичем и продолженные его сотрудниками, не являлись чем-то изолированным, а всегда сопровождались огромной практической деятельностью по обеспечению единства измерений в стране, по решению даже тогда ряда конкретных задач, выдвигавшихся наукой, промышленностью и торговлей. Вот это сочетание глубоких научных исследований, с одной стороны, и огромная практическая работа по приложению этих научных исследований к практике — к науке, торговле, промышленности — оказалось настолько основательно заложенным в систему работы Главной палаты мер и весов, что до сих пор этот стиль сохраняется в коллективе ВНИИМ и в других коллективах метрологов Советского Союза.

Декрет 1918 г. о метрической реформе не представляет собой нечто случайное. В нем сказались дальновидность и прозорливость руководителей Советского государства: они видели во введении метрической системы создание метрологических основ, на которых можно было бы строить советскую промышленность, советскую науку.

Сегодня нам с высот современного уровня науки и техники легко говорить о том, что измерительная техника вообще и ее высшее звено — метрология представляют собой основу научно-технического прогресса. Нам легко сейчас пользоваться большим вниманием правительства к метрологии и заботой о ее развитии. Нам легко находить поддержку в окружающих научно-общественных кругах. Каким же дальновидным оказалось Советское правительство, которое пятьдесят лет назад видело ту огромную роль, которую должна была сыграть измерительная техника и, в первую очередь, метрология в деле восстановления и развития советской промышленности!

Метрическая система не представляет собой что-то обособленное и локальное — это часть общей задачи создания основ советской метрологии. Многократно в тот период Советское правительство возвращалось к вопросам метрологии. За короткий промежуток времени, всего 8 лет, до 1924 г., Советское правительство пять раз принимало всевозможные решения о развитии советской метрологии, в частности, о введении метрической системы. Например, в 1921 г. была объявлена всероссийская проверка мер. В 1922 г. Совет Труда и Обороны утвердил положение о Главной палате мер и весов — это было первое положение, утвержденное государственным актом. Затем оно вновь было рассмотрено и модифицировано в 1924 г.

В 1930 г. образуется Всесоюзный комитет по стандартизации, поскольку метрология и стандартизация, как это мы сейчас хорошо знаем, являются частями одного общего целого.

Таким образом, введение метрической системы, метрическая реформа в СССР, знаменует начало второго периода в развитии русской метрологии, охватывающего также приблизительно 25 лет (до Великой Отечественной войны). Это было началом систематического и, что очень важно, планомерного развития метрологии. Именно, начиная с момента организации Советского государства, метрология и в то время единственное метрологическое учреждение — Палата мер и весов, а теперь институт имени Д. И. Менделеева, были призваны обеспечивать, с одной стороны, планомерные исследования и совершенствование научных основ измерительной техники, как неуклонного условия научно-технического прогресса в стране, а с другой — создавать и совершенствовать законодательные основы измерительного дела, т. е. обеспечивать единство измерений в нашей стране. Эти два обстоятельства придали метрологии государственный характер. Государственный характер нашей советской метрологии

существенно отличает ее и как науку, и как практику от метрологии зарубежной.

Это новое социалистическое содержание метрологии обусловлено именно необходимостью планомерного развития научных исследований в области измерительной техники, а значит, и развития самой метрологии, и вместе с тем необходимостью практического осуществления мероприятий по обеспечению высокого уровня измерительной техники в стране на основе единства измерений и государственного контроля состояния и развития измерительных средств. Метрология оказалась государственной организацией, которой можно предъявить вполне определенные требования и обязать ее, как государственную организацию, выполнять определенные функции в стране. И одной из первых государственных задач, возложенных на Главную палату, была задача практического осуществления метрической реформы в стране. Для этого пришлось проделать огромную работу. Нужно было:

1) разработать, изготовить и заменить несколько десятков миллионов гирь и линейных мер;

2) обеспечить их клеймение и поверку и для этого создать сеть поверочных учреждений;

3) создать образцовые измерительные средства для оснащения этих учреждений;

4) создать все эталоны единиц метрической системы, компарирующие средства для передачи размеров единиц от эталонов к образцовым и рабочим измерительным средствам;

5) переработать всю техническую документацию, реорганизовать все измерительное хозяйство на промышленных предприятиях, обеспечить производство измерительного инструмента;

6) обеспечить пропаганду метрической системы и обучение населения пользования ею, издать десятки брошюр, книг, преодолеть старые привычки.

Вся эта грандиозная работа была успешно завершена в рекордно короткий срок — 9 лет.

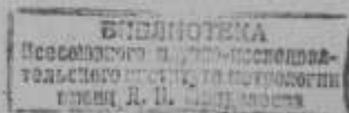
Наряду с этим Главная палата приступила к выполнению большого комплекса научных работ, направленных на создание и совершенствование научных основ советской измерительной техники, на создание советского приборостроения, на изыскание новых методов измерений.

Главная палата мер и весов — первый государственный метрологический институт — стала в период индустриализации страны основой для развития советского приборостроения. В сущности, такие заводы, как «Электроприбор», инструментальные заводы — Ленинградский, Сестрорецкий, заводы «Калибр», «Манометр», «Госметр», начали свою деятельность не только просто с помощью или участием деятелей ВНИИМ, но и на основе созданных в институте и подлежащих

освоению в производстве первых образцов приборов. Сюда относятся мосты, компенсаторы, аналитические весы, нормальные элементы и многое другое. Все градуировочные и поверочные средства были разработаны в свое время в Палате мер и весов и, в конце концов, внедрены в производство, что дало возможность правильно построить производство, контролировать технологический процесс. Впоследствии ВНИИМ оказал существенное влияние на создание первых научных организаций и конструкторских бюро по разработке новой измерительной техники, по организации большого числа контрольно-измерительных лабораторий на крупных заводах, например на Кировском. Эти лаборатории стали основой для правильной постановки контроля технологических процессов, полуфабрикатов, первичных материалов, для правильной постановки измерительного дела на предприятиях.

Во ВНИИМ был разработан целый ряд новых средств и методов измерений для непосредственного применения в промышленности в процессе ее становления. Можно указать, например, на разработку интерференционного метода измерения концевых мер, который был положен в основу производства плиток Иогансона на заводе «Калибр». Можно указать на разработку методов и технических средств для контроля электро-технической стали, которую в 1918—1930 гг. выполнила магнитная лаборатория ВНИИМ, систематически снабжая нашу промышленность всеми средствами и методикой, необходимыми для контроля за производством стали. Можно указать на разработку образцов разных металлов для постановки производства их в Советском Союзе. Например, первый суперинвар был разработан в Палате мер и весов. Пермаллой впервые был создан во ВНИИМ Борисом Владимировичем Блиновым, а потом уже пошел в производство. Такие примеры не единичны.

Основой для столь многогранной деятельности послужили естественно, глубокие научные исследования в области измерительной техники, которые были поставлены в то время и продолжаются и до наших дней. Речь идет не только о выполнении частных исследовательских работ, связанных с созданием эталонов или образцовых средств измерения. Речь идет о гораздо более глубоких исследованиях, связанных с разработкой теоретических и научных основ измерительной техники вообще, с разработкой новейших методов и средств для точных измерений. И мы видим, как для реализации этих задач во ВНИИМ одна за другой создаются новые лаборатории и развиваются старые. Известно, что к моменту Великой Октябрьской социалистической революции в Палате было около 10 лабораторий: массы, длины, времени, манометрическая, газомерная, водомерная, химическая и др., в дополнение к ним за 25-летний период до начала Великой Отечественной войны были созданы:



лаборатория магнитных измерений, температурных измерений, несколько лабораторий ионизирующих излучений, лаборатория акустических измерений и много других.

Большой комплекс научных работ по созданию эталонов — группового эталона вольты (А. К. Колосов, М. Ф. Маликов), первичного эталона ома (М. Ф. Маликов), эталонов магнитных единиц (Е. Г. Шрамков, Б. М. Яновский), емкости и индуктивности (И. Н. Кротков) и других — завершается капитальным трудом М. Ф. Маликова «Основы метрологии», являющимся настольной книгой не только метролога, но каждого измерителя вообще.

Картина будет недостаточно полной, если не сказать о развитии и укреплении в этот период законодательной деятельности в области измерительной техники, заключающейся в создании нормативной документации, регламентирующей производство измерений на практике, выпуск измерительной техники, градуацию на классы точности и разработку методик поверок контрольно-измерительной техники. Вся эта работа завершилась созданием специального Комитета эталонов и стандартов. Председатель этого Комитета академик Д. П. Коновалов, президент Палаты мер и весов, члены Комитета, академики Н. С. Курнаков, А. А. Байков, член-корреспондент Академии наук М. А. Шателен и другие положили начало деятельности нынешнего Комитета стандартов. Еще тогда для всех была ясна связь между метрологией и стандартизацией, так как все техническое законодательство в Советском государстве осуществляется через стандарты.

В 1937 и 1938 гг. создаются два новых метрологических института — Московский (ВНИИК) и Харьковский (ВНИИМ), и с этого времени ВНИИМ развивает метрологию в содружестве с этими новыми институтами и более чем 150 поверочными лабораториями страны.

В результате такой громадной работы к началу Великой Отечественной войны ВНИИМ стал крупным метрологическим учреждением, имеющим большой авторитет как внутри страны, так и за ее пределами. ВНИИМ принимает активное участие в деятельности международных организаций в области метрологии — консультативных комитетов и самого международного Комитета мер и весов.

ВНИИМ совместно с другими институтами и поверочными лабораториями сумел обеспечить настолько высокий уровень метрологии в нашей стране, что война не застала нас врасплох. Грандиозное перебазирование промышленности в начале войны с Запада на Восток, связанное с военными действиями, с одной стороны, и с необходимостью обеспечить фронт военной техникой, с другой, перебазирование, сопровождавшееся к тому же пересмотром всей номенклатуры изделий, т. е. переводом промышленности на военные нужды, не привело к нарушению

какого-либо звена в системе обеспечения единства измерений и взаимозаменяемости. Совершенно очевидно, что только при высоком уровне постановки метрологического дела можно было обеспечить слаженную работу всех отраслей промышленности в условиях военного времени.

Перебазировав на Восток эталонное хозяйство, ВНИИМ продолжал работать в осажденном Ленинграде. Он активно помогал фронту, разработав систему контроля средств связи, систему исключения возможности подслушивания телефонных разговоров и др. Часть ВНИИМ, выехавшая в Свердловск, образовала там филиал, который теперь является одним из активных метрологических институтов нашей страны. В тот же военный период образуется Новосибирский институт мер и измерительных приборов.

Третий, послевоенный, период в развитии метрологии характерен многими обстоятельствами, повлиявшими на существенные изменения внутреннего содержания метрологии, расширение этого понятия и развитие работ в новых областях.

Прежде всего этот период характерен необходимостью быстро восстановить разрушенное войной метрологическое хозяйство, т. е. лаборатории самого головного института в Ленинграде и, кроме того, большое число контрольных лабораторий европейской части Советского Союза, разрушенных войной. Гигантская работа по восстановлению деятельности этих контрольных лабораторий вновь легла на плечи Института метрологии с его небольшим экспериментальным заводом «Эталон». Институтом было разработано и изготовлено на заводе «Эталон» большое число образцовых средств. Можно сказать без преувеличения, что все контрольные лаборатории Советского Союза были оснащены измерительными средствами, разработанными нашим институтом и изготовленными заводом «Эталон».

Вместе с тем послевоенный период, как известно, характерен развитием новых областей в науке и технике: радиотехники и радиоэлектроники, квантовой электроники, ядерной физики, космических исследований, авиации, ракетной техники, химии. Эти факторы заставили пересмотреть содержание и направление деятельности советской метрологии не только в стенах нашего института, но и за его пределами. Пришлось существенно расширить нашу деятельность в новых областях метрологии, в частности, в создании эталонной базы в области ионизирующих излучений, в создании исходных измерительных средств для радиотехники, в разработке новых измерительных средств для точных измерений как очень низких, так и очень высоких температур, для измерений высоких давлений, глубокого вакуума.

Нужно было создать метрологические основы новых областей техники. И вместе с тем речь шла об использовании

в метрологии новых достижений физики и техники. Речь шла о пересмотре позиций в использовании и создании эталонов даже в классических областях метрологии на основании современных достижений в области радиоэлектроники, радиотехники, ядерной физики, автоматики и счетно-решающей техники.

Это взаимное проникновение метрологии и физики, которое, вообще говоря, характерно для всей истории развития техники и метрологии, является отличительной чертой и послевоенного периода развития нашей метрологии.

Следует также отметить еще два важных фактора, повлиявших на развитие метрологии в этот период. Это, во-первых, требование существенного повышения точности измерения как в областях новой техники, так и в областях классической метрологии, во-вторых, существенное расширение диапазонов измеряемых величин как вверх, так и вниз. Это заставило вновь пересмотреть направление метрологических работ, искать новые решения, новые методы измерения, новые принципы построения эталонов, новые образцовые средства измерений.

В 1960 г. Генеральная конференция по мерам и весам приняла решение о введении международной системы единиц, и вслед за этим, Комитет стандартов принял стандарт о предпочтительном применении этой системы в нашей стране. Это, разумеется, вызвало необходимость постановки и новых метрологических работ по практической реализации принятого стандарта.

Ко всему этому следует добавить и общее увеличение объема научных работ в нашей стране, увеличение размеров производства и, как следствие, резкое увеличение требований к их метрологическому обслуживанию.

Все эти факторы привели, с одной стороны, к значительному росту самого ВНИИМ, а с другой, к созданию ряда новых метрологических институтов и их многочисленных филиалов с целью обеспечения всех требований науки и промышленности.

Особенно большой размах получили метрологические работы в последние пять лет, и дело тут не только в том, что в орбиту метрологии вошла Государственная служба стандартных и справочных данных, а также метрологические задачи службы аттестации качества продукции. Дело еще и в том, что требования практики к метрологии вновь резко возросли. Потребовался ряд известных правительственных решений по развитию метрологии и стандартизации в нашей стране, по развитию службы единства измерений. Все это привело к новому, почти трехкратному увеличению мощности ВНИИМ и созданию Тбилисского филиала ВНИИМ, который в настоящее время специализируется в области вычислительной техники и кибернетики, стал практически самостоятельным институтом и успешно работает над внедрением этих новых средств в метрологическую практику.

Таким образом, за послевоенное время нашему институту пришлось решать большие и сложные задачи. За это время институт выполнил более 800 научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, в результате которых разработано силами нашего конструкторского бюро, изготовлено заводом «Эталон» и внедрено в практику более 1500 уникальных приборов, установок, измерительных средств и испытательных стендов. Многие из них не имеют себе равных за рубежом. Эти установки и приборы, обладающие предельными значениями точности, созданы руками наших умельцев, великодушных мастеров своего дела, таких, как К. Д. Анисимов, Н. А. Григорьев, Э. В. Ловшос, Б. А. Камочкин, П. Т. Маляшек, В. С. Сметанин, Г. С. Ярмолинский, К. И. Пискарев и многие другие.

Невероятная жесткость допусков, высочайшая чистота обработки, тщательнейшая юстировка — вот что характерно для наших мастеров, сочетающих свое высокое умение с глубоким знанием дела. Этот стиль работы, как известно, был заложен еще И. И. Кваренбергом, первым Героем Труда и одним из создателей завода «Эталон».

Около 100 медалей ВДНХ, более чем 200 авторских свидетельств являются достойной оценкой работы научных сотрудников, конструкторов, инженеров и рабочих института.

Среди большого числа исследований можно указать ряд направлений, в которых институт особенно преуспел или получил важный, значительный результат. Таких направлений много, но я отмечу лишь некоторые. Прежде всего следует отметить серию работ по воспроизведению метра в длинах световых волн, начиная с капитального исследования линии кадмия-114 и кончая созданием нового государственного эталона метра на базе криптона-86, и большого комплекса компарирующих средств для этой же цели, большой серии оптических измерений. Далее следует сказать о работах в области ионизирующих излучений, закончившихся созданием эталонов рентгена для огромного диапазона от 5 до 3000 кэв; осуществление уникальной эталонной установки для нейтронных измерений и создание эталонной установки для воспроизведения единицы активности радионуклидов.

Капитальные работы по технике точных электрических измерений и в том числе создание токовых весов, разработка методов точных измерений электрических величин на переменном токе, измерений сдвига фаз в широком диапазоне частот, точных измерений параметров электрических цепей, а также создание комплекса исходной образцовой аппаратуры для измерения мощности и напряжения на высоких и сверхвысоких частотах дали возможность институту по праву завоевать ведущее положение в области электрических измерений.

Следует отметить также серию работ по определению точных значений физических констант, и в том числе скорости

света, ускорения силы тяжести, гиромагнитного отношения. Эти работы в настоящее время существенно развиваются в институте с прямой целью использовать их для перехода на естественные эталоны электрических и магнитных единиц. Кстати, и капитальные работы в области магнитных измерений, включающие создание эталонов, разработку методов и средств для определения магнитных характеристик материалов и технику точных измерений в этой области, обеспечили магнитным лабораториям ВНИИМ также руководящее положение в стране.

Большие работы института по эталонам в области температурных и тепловых измерений высоко оценены в мировой метрологии. Сюда относятся: создание эталонных газовых термометров, измерение термодинамической температуры реперных точек золота, олова, кадмия и цинка, воспроизведение тройной точки воды, а также разработка новых методов измерений низких температур и значительные работы в области теплофизики и калориметрии.

Нужно также отметить большие работы в области механических измерений, и в том числе комплекс работ по точным измерениям средних, высоких и сверхвысоких давлений, серию работ по технике вакуумных измерений, создание эталонной силовой измерительной машины, работы по измерению скоростей, ускорений и параметров вибраций.

Недавно начали успешно развиваться работы в области газоаналитических измерений и уже создана комплексная установка для получения и аттестации чистых газов и их смесей.

Но невозможно в коротком сообщении не только описать, но даже перечислить все, что хотелось бы сегодня отметить как достижения, как метрологические успехи института.

Очень важно, однако, подчеркнуть, что вся работа института связана не только с созданием эталонов и образцовых средств для самой метрологической службы, но она еще в большей мере направлена непосредственно на удовлетворение нужд науки и производства: мы выполняем задания промышленности, разрабатывая для нее технику точных измерений. И это вполне естественно, так как наши метрологические достижения, высокая компетентность в вопросах измерительной техники оказались бы совершенно бесполезными, если бы не были приложены к практическим нуждам современной науки и техники.

Большую роль играет ВНИИМ и в международных метрологических организациях. Не останавливаясь подробно на этом, следует сказать, что постоянную и большую работу, которую ведет ВНИИМ в международных организациях, мы считаем своим долгом продолжать. Мы считаем, что обязаны заботиться о развитии и укреплении международной связи с метрологическими институтами всех стран, всегда имея в виду необходимость обеспечения международного единства измерений и мер.

Достижения института являются результатом работы нескольких поколений метрологов, и невозможно назвать имена всех этих ученых, инженеров, конструкторов.

О корифее русской метрологии, о роли, которую сыграл в развитии русской метрологии Дмитрий Иванович Менделеев, уже сказано несколько слов. По этому поводу надо было бы, наверное, написать целую книгу.

Я уже отмечал огромную работу большого ученого, метролога Михаила Федосеевича Маликова. Много можно сказать и о таких ученых, как Михаил Андреевич Шателен и Леонид Васильевич Залуцкий, выдающихся президентах Палаты мер и весов в довоенный период, о профессоре А. Н. Доброхотове, много сделавшем для развития поверочной деятельности института, профессоре Г. М. Кондратьеве, создавшем целую школу в термометрии, профессоре М. Ф. Романовой, руководителе работ в области оптических измерений, измерений длины и массы, профессоре П. М. Тиходееве, авторе светового эталона и капитальных исследований в области метрологии. Необходимо отметить работы профессора К. К. Аглинцева — вдохновителя и организатора работ в области ионизирующих излучений, профессора В. М. Яновского — непревзойденного магнитолога. Нельзя не отметить и работы профессоров Е. Г. Шрамкова, А. К. Колосова, С. В. Горбачевича. Но я все же вынужден ограничиться только этими, известными всему миру именами и сказать, что наши успехи, наши достижения являются итогом работы всего многотысячного коллектива ученых, инженеров, рабочих института.

Эти успехи и достижения нашего института были очень высоко оценены. В конце 1967 г. в ознаменование 50-летия Советского государства институту было вручено на вечное хранение знамя Центрального Комитета Коммунистической партии Советского Союза, Президиума Верховного Совета СССР, Совета Министров СССР и ВЦСПС.

Наше правительство, руководящие органы оказывают большое внимание нам, метрологам, проявляют постоянную заботу о развитии метрологии.

Перед нами стоят большие и новые задачи по дальнейшему развитию советской метрологии, по расширению и укреплению метрологического обслуживания нашей необъятной страны, по укреплению наших связей с научными учреждениями и промышленными предприятиями.

Поступила в редакцию
15/11 1969 г.

УДК [681.2+389.1] (47)

Ю. Я. БАЗИЛЕВСКИЙ,
К. К. ИЛЮНИН

МИНИСТЕРСТВО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ,
СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СССР

СОВЕТСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И МЕТРОЛОГИЯ

Современное приборостроение, созданное в нашей стране практически заново за годы Советской власти, представляет собой весьма широкую область научных и практических знаний производственного опыта. Это — большой комплекс заводов, проектно-конструкторских бюро и научно-исследовательских институтов с квалифицированными коллективами, занятыми исследованиями, разработкой и производством технических средств измерений, контроля и регулирования технологических процессов управления производством от простейших приборов до сложных комплексов управления заводами или испытания больших систем и объектов.

В решении главной экономической задачи Советского общества — создания материально-технической базы коммунизма на основе развития науки и техники, автоматизации производства и непрерывного роста производительности труда — наша приборостроительная промышленность занимает одно из ведущих мест.

Техническая политика в приборостроении на современном этапе характеризуется прежде всего дальнейшим развитием и внедрением в народное хозяйство государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП), включая и средства вычислительной техники. Эта агрегатированная система обеспечивает функциональное, информационное метрологическое сопряжение приборов в различных автоматизированных системах управления в народном хозяйстве. Основы ГСП закреплены и узаконены комплексом государственных стандартов.

На базе использования приборов ГСП при наиболее экономном обеспечении аппаратурой решаются задачи комплексного

автоматизированного управления производством в промышленности, в сельском хозяйстве, на транспорте, в торговле, в сфере обслуживания населения. Эти задачи охватывают как собственно технологические процессы, связанные с получением и переработкой вещественных материалов, получением или расходом энергии, так и процессы распределения продукции, процессы сбора и переработки технологической и экономической информации.

Комплексная автоматизация управления, осуществляемая на основе математических методов с помощью современных средств измерительной и вычислительной техники, служит одним из главных путей повышения эффективности производства.

Другой важнейшей чертой технической политики в приборостроении является совершенствование и развитие производства приборов для научных исследований, испытательных и лабораторных работ, значимость которых непрерывно растет с проникновением исследователей во все более тонкие закономерности явлений природы, с усложнением машин, систем и сооружений в различных областях техники.

Эффективность труда научных работников и инженеров-исследователей, конструкторов и технологов, определяющая темпы научного и технического прогресса, как известно, непосредственно зависит от научно-технического уровня средств исследования, от вооруженности приборами лабораторий и институтов.

Центральное место в любой области науки отводится средствам измерения, а в последние годы особенно — автоматизированным средствам измерения в сочетании с вычислительными устройствами для анализа и переработки больших потоков измерительной информации.

Таким образом, технические методы и средства измерения, измерительная техника, равно как и вычислительная техника, методы обработки информации, а также автоматизированные системы управления образуют сегодня основу приборостроения и являются фундаментом производства. Это определяет непосредственно органическую связь в развитии метрологии и приборостроения.

С самого начала своего зарождения метрология и измерительная техника были поставлены под контроль государства, что было особенно важно в условиях социалистической системы хозяйствования.

Метрология в зависимости от достигнутого ею уровня может либо способствовать, либо, наоборот, сдерживать развитие приборостроения при создании новых методов и средств измерения, особенно высшей точности, и создании средств точного преобразования информации для управления процессами производства.

Можно проследить несколько аспектов тесной связи метрологии и приборостроения. К первому следует отнести совместное

решение указанных выше задач при создании и использовании в народном хозяйстве технических средств измерения, в том числе приборов для научных исследований.

Второй аспект характеризует влияние метрологии на технический уровень самого приборостроительного производства как особой отрасли точной индустрии.

Наконец, существует и обратное влияние достижений приборостроения на развитие метрологии как науки и государственной службы, как системы обеспечения единства мер в стране, системы обеспечения высокого качества продукции.

Рассмотрим несколько подробнее эти связи. Метрология как наука об измерении составляет теоретическую основу измерительной техники, теоретическую основу измерительного приборостроения. Создание и совершенствование новых методов измерений, повышение точности эталонов, точности воспроизведения передачи единиц измерения является не самоцелью, а вытекает, как правило, из практических потребностей производства, из конкретных задач приборостроения.

Постановка любых новых технологических процессов требует соответствия новых специализированных средств измерения, обеспечивающих совместно со средствами автоматизации необходимую точность соблюдения заданных технологических режимов.

Большое число контролируемых параметров и часто высокие скорости протекания процессов, разнообразие используемых материалов, необходимость обеспечения высокой надежности контроля предъявляют к измерительной технике все более высокие требования.

Успех новых производств находится в прямой зависимости от наличия соответствующих методов и средств измерения и контроля. Наиболее сложные из подобных задач решались и решаются совместными усилиями метрологов и приборостроителей. Например, в ходе освоения промышленных установок для получения атомной энергии были созданы не только первые измерительные системы централизованного контроля и огромный комплекс новых видов приборов, но и возникла новая область метрологии — радиометрия.

В настоящее время в связи с дальнейшим развитием сложных систем управления важное значение приобретают методы анализа точности в автоматизированных системах измерения и обработки информации.

Как известно, в области вычислительной техники теория процессов переработки информации развивается в двух взаимно дополняющих направлениях: теории абстрактных автоматов и логических сетей. В последних элементы осуществляют простейшие операции над сигналами.

По аналогии с концепцией логической сети автоматизированную систему управления можно рассматривать как сеть,

в которых элементы выполняют различные, подчас сложные виды преобразования информации. Каждый преобразователь в такой сети, если он имеет функционально и конструктивно законченные формы, можно рассматривать как изделие государственной системы приборов. Поскольку каждому такому элементу присущи информационная, функциональная, метрологическая характеристики, то такие же понятия действуют и для правильно построенных сетей с подобными элементами.

Возникает практическая потребность изучения метрологических показателей выходной информации сети в зависимости от метрологических показателей входной информации и аналогичных характеристик элементов этой сети, а также оптимизации этих соотношений. Эта задача нового направления метрологии сетей.

С развитием современного приборостроения связано и другое направление метрологических разработок. Истоком его является обобщенное понятие измерительного акта и его результата — единицы научной информации. Такая единица информации, как известно, имеет логическую и метрическую составляющие. В сложных измерительных процессах метрологические характеристики результатов существенно зависят от самого процесса измерения. Возникает необходимость строгого изложения метода измерения в виде алгоритма на подходящем формализованном языке, а также разработки методов оценки, влияния особенностей этого алгоритма на метрологию выходной информации.

Думается, что интерес к подобным исследованиям будет возрастать при различных применениях приборов для научных работ, а также при оценке достоверностей и точностей технико-экономических параметров в автоматизированных системах управления как производством, так и экономикой.

Несомненно, что разработка этих актуальных и сложных вопросов составляет совместную задачу приборостроителей, метрологов и специалистов по системе управления. Обеспечение поддержания единства мер в стране опирается, как известно, не только на систему государственных эталонов и образцовых мер, но и на систему аттестации государственных, контрольных и приемочных испытаний всех средств измерений, выпускаемых приборостроительной промышленностью. В этой области осуществляются самые тесные взаимодействия метрологической службы и приборостроения, направленные на повышение качества средств измерения. Правильная организация, высокой научно-технический уровень и тщательность государственных испытаний содействуют прогрессу приборостроения и имеют большое значение для совершенствования средств измерения.

С другой стороны, в ходе разработки современных приборов выявляются все новые и новые задачи, выдвигаемые промышленностью перед метрологами. Например, в настоящее

время нужны новые методы измерения и способы аттестации силовых измерительных средств на усилия более 10 Мн, давление свыше 4000 Мн/м², способы аттестации точных измерительных усилителей класса до 0,01 в диапазоне частот до 500 ÷ 1000 кГц, вакуумметров до 10⁻¹⁴ мм рт. ст., измерителей тока на 100 кА и др.

Большое число нерешенных метрологических вопросов остается в области аналитического приборостроения, в определении физико-химических свойств и состава вещества.

В нашей стране, как известно, техническое законодательство осуществляется через стандарты, являющиеся тем документом, в котором фиксируются определенные требования, технические характеристики и показатели, обязательные для всего народного хозяйства.

Стандарты распространяются на совокупности единиц, допущенных к применению, эталоны, служащие для их воспроизведения, и на установленных классов точности измерительную аппаратуру, а также на большое число элементов, составляющих основу измерительного дела, правил и условий производства средств измерительной техники.

В огромном большинстве стандарты разрабатывают приборостроительные предприятия, и они являются обобщением научно-технических достижений и опыта промышленности, апробированного и узаконенного Государственной метрологической службой. За последние 3 года только предприятиями и организациями Министерства приборостроения было разработано и пересмотрено более 200 государственных стандартов. По-видимому, нет необходимости подробно останавливаться на важности совершенствования законодательных основ измерительной техники.

Говоря о влиянии метрологии на технический уровень самого приборостроительного производства, следует также отметить, что только высокий уровень развития техники измерения в самом приборостроении обеспечивает взаимозаменяемость деталей и узлов и тем самым составляет основу специализации и кооперирования производства.

Развитие и постоянное совершенствование метрологических служб и оснащение измерительных и испытательных лабораторий заводов Министерство рассматривает как одну из важных практических задач, решаемых на основе достижений метрологии.

Государственная служба стандартных и справочных данных и стандартных образцов, обеспечивающая достоверность значений констант и характеристик используемых материалов, сопоставимость их свойств, и стандартизация методов определения этих свойств имеют большое значение для приборостроительного производства. Здесь, как ни в какой другой отрасли промышленности, используется широкая номенклатура самых

различных материалов, среди которых много материалов и веществ с особыми физико-химическими свойствами, часто определяющими сам принцип действия прибора. Точное определение и достоверные знания всей необходимой совокупности этих свойств часто имеют решающее значение для качества приборов.

Немало предстоит сделать и для оснащения народного хозяйства аппаратурой для испытаний на основе типовых методик материалов и веществ у изготовителей и потребителей.

Рост объема производства измерительных приборов и их усложнение, повышение требований к нормированию их характеристик и надежности ведут к значительному росту трудоемкости поверочных работ как при производстве приборов, так и при их эксплуатации.

В связи с этим автоматизация поверочных работ, создание специализированных соответствующих технических средств является важной общей задачей метрологической службы и приборостроительной промышленности. В этой области уже имеется известный положительный опыт, например по автоматизации и проверке электросчетчиков с использованием вычислительной техники.

Организация и становление приборостроительной промышленности в нашей стране происходили в первые годы Советской власти и в те же исторические сроки, что и создание советской Государственной метрологической службы, основанной на метрической системе. До Великой Октябрьской социалистической революции в России приборостроительной промышленности практически не существовало. Партия и правительство поставили задачу скорейшего восстановления промышленности, а затем перехода к социалистической реконструкции всего народного хозяйства и осуществлению ленинского плана электрификации страны.

Колыбелью развития точной индустрии стал Ленинград, когда в 1927 г. после принятия XV съездом партии директив по первому пятилетнему плану все отрасли промышленности стали остро нуждаться в измерительных приборах и автоматических регуляторах.

В трудных условиях, несмотря на отсутствие подготовленных кадров, необходимого оборудования и материалов, советские приборостроители добились в первой пятилетке значительных успехов.

Большую помощь в организации производства приборов молодым ленинградским заводам «Электроприбор» оказала Главная палата мер и весов — ныне Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии имени Д. И. Менделеева.

В 1930 г. в Ленинграде создается отраслевая лаборатория измерения, в 1932 г. — Ленинградский институт пирометрии — центр по разработке новых приборов, сыгравший значительную

роль в развитии приборостроения, положивший начало совместной работе советских метрологов и приборостроителей в создании и освоении производства средств электроизмерительной техники.

Эта хорошая и полезная традиция крепла и развивалась и в последующие годы. Во второй и третьей пятилетках были построены многие крупные приборостроительные заводы и образован ряд научно-исследовательских институтов, конструкторских бюро и проектных организаций: завод «Тизприбор», Институт точной индустрии, трест «Теплоконтроль», Институт автоматики и телемеханики в Москве, завод «Теплоавтомат» в Харькове, краснодарский ЗИП, киевский «Точэлектроприбор», ленинградский «Вибратор» и многие другие. Это обеспечило к началу войны освоение многих сложных приборов.

Высокими темпами характеризуется развитие советского приборостроения в послевоенный период. В юбилейном 1967 г., по сравнению с 1945 г., объем производства приборов увеличился больше чем в 40 раз, в том числе: по приборам контроля регулирования технологических процессов в 50 раз, по электроизмерительным в 65 раз, по приборам измерения времени в 35 раз.

В каждом году текущей пятилетки промышленность осваивает более 600 новых приборов и средств автоматизации. В результате за текущую пятилетку обновление конструкции и приборов в производстве составит 60—70%, а номенклатура производства будет расширена почти в полтора раза. Эти достижения в развитии производства и оснащения народного хозяйства различными средствами измерения, контроля, регулирования были обеспечены большим трудом коллективов приборостроителей-метрологов, работами по созданию и развитию эталонного хозяйства страны на основе метрической системы, о которой говорить подробно нет необходимости. Все это общие успехи. Вот почему советские приборостроители с большим удовлетворением, теплотой и сердечностью поздравляют сегодня юбиляра — Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии имени Д. И. Менделеева, всех работников системы стандартов и метрологии, желают им больших творческих успехов в совместной и плодотворной работе со всеми отраслями нашей промышленности.

Поступила в редакцию

17/II 1969 г.

МЕТРОЛОГИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ

Существует большое число определений понятия метрологии. Однако все они сходятся в том, что метрология, прежде всего, является научной основой измерительной техники, обеспечивающей наивысшую надежность и достоверность получаемой информации, сходятся в том, что метрология обеспечивает законодательную основу, определяющую единство измерений в стране, единство методов и средств контроля технологических процессов и испытания продукции, сходятся в том, что метрология создает и совершенствует основы измерений, обобщает практический опыт в этой области и соответственно направляет развитие измерительной техники. Существует большое число работ, показывающих неразрывную связь между метрологией и стандартизацией. Эта связь чрезвычайно органична и заключается, прежде всего, в стандартизации системы государственных эталонов, единиц измерений, измерительных приборов, стандартизации системы образцовых веществ и методов поверки приборов. С другой стороны, стандартизация опирается на метрологию, обеспечивающую достоверность и сопоставимость результатов испытаний материалов, изделий и т. д.

Именно поэтому 50-летие введения метрической системы и 75-летие создания первого в стране метрологического центра — Всесоюзного научно-исследовательского института, носящего имя великого русского ученого Д. И. Менделеева, является праздником не только метрологов, но и стандартизаторов Советского Союза.

Декрет о переходе на метрическую систему мер имел огромное значение для развития всего народного хозяйства и особенно для развития метрологии и стандартизации. На основе этого декрета можно было решать вопросы о применяемых единицах измерений, о создании высшего звена измерительной техники — эталонов и передаче размеров единиц.

Не случайно в 1922 г. при Главной палате мер и весов, как тогда назывался институт метрологии, был организован Комитет эталонов и стандартов под председательством президента Главной палаты академика Д. П. Коновалова. Комитет объединил и скоординировал работы по стандартизации в различных отраслях техники и выработал ряд норм и стандартов в области метрологии, измерительной техники, машиностроения, металлургии, железнодорожного транспорта и т. п.

Подъем народного хозяйства страны и развитие индустрии привели к расширению работ в области метрологии и стандартизации, и в 1931 г. Главная палата мер и весов была преобразована во Всесоюзный институт метрологии и стандартизации. Естественно, что в этот период усилилось внимание к разработке стандартов. Появились стандарты на метрические меры единиц измерений, охватывающие механические, тепловые, электрические, магнитные, световые единицы, единицы времени и частоты, акустические единицы, единицы ионизирующих излучений. Был разработан ряд стандартов на образцовые средства измерений и стандарты, регламентирующие показатели качества измерительных приборов. Большая работа проводилась по упорядочению терминологии и обозначений во многих областях знаний. На основе метрической системы создавался необходимый комплекс государственных эталонов и средств передачи размеров единиц от эталонов к рабочим мерам и приборам, закладывалась основа правильности измерений в стране.

Метрология как наука призвана разрабатывать теорию измерений, разрабатывать и устанавливать систему единиц, систему мер и эталонов. Метрология призвана давать критерий оценки точности, оценку достоверности результатов измерений, разрабатывать новые методы измерений, базирующиеся на новейших достижениях науки и техники.

Таким образом, перед метрологией как наукой, являющейся неотъемлемой частью физики, стоят чрезвычайно большие задачи, решение которых, в конечном счете, определяет технический прогресс в стране. Именно поэтому мы говорим об опережающей роли метрологии, об опережающей роли науки, об измерениях, так как метрология в зависимости от ее уровня может либо способствовать, либо, наоборот, сдерживать развитие приборостроения, сдерживать создание высокоточных и надежных приборов. Именно поэтому метрология должна опережать требования практики, должна непрерывно совершенствоваться высшее звено измерительной техники — эталоны и образцовые средства, чтобы точность воспроизведения и передачи единиц измерения находилась всегда на уровне практических потребностей.

Во главе Государственной метрологической службы СССР стоят наши метрологические институты. Они обеспечивают систему физических измерений, координируют эту систему с си-

стемами измерений других стран, оказывают помощь в обеспечении точности и единства измерений во всех областях народного хозяйства, обеспечивают поверку исходных образцовых мер и приборов, принадлежащих поверочным лабораториям.

В обеспечении единства измерений в стране важнейшую роль играют наши лаборатории государственного надзора за стандартами и измерительной техникой. Они решают вопросы практического обеспечения единства мер и измерительных приборов, осуществляют контроль за состоянием измерительной техники, контроль за соблюдением и внедрением стандартов.

Соединение государственного надзора за состоянием измерительной техники с государственным надзором за соблюдением и внедрением стандартов представляет собой важную особенность современной метрологической службы и стандартизации СССР.

В последние годы значительные усилия были направлены на строительство крупных республиканских центров метрологии и стандартизации, которые должны стать организациями, определяющими техническую политику в области коренного улучшения измерительного хозяйства в республиках и осуществляющими контроль за качеством продукции, за соблюдением стандартов на предприятиях.

Таким образом, советская метрологическая служба выросла в эффективную научно-техническую систему, охватывающую сейчас своим влиянием все отрасли народного хозяйства, производства, техники, науки. По своей практической устремленности и влиянию на развитие производительных сил, по масштабу и размаху научных исследований она совершенно несоизмерима с метрологической службой дореволюционной России. Причина этого коренится в условиях планового социалистического хозяйства, в непрерывном внимании и помощи, которую оказывают метрологической службе Центральный Комитет КПСС и Советское правительство. Метрологические институты претерпели не только количественные изменения. Принципиально изменилось направление их работ. Метрологические институты принимают участие в наиболее актуальных работах, связанных с решением ряда проблем, крайне важных для нужд народного хозяйства. Прошел период, когда под метрологическими работами понимали исследования, связанные только с разработкой и хранением эталонов.

Следует указать, что такое развитие работ наших метрологических организаций целиком совпадает с идеями великого Д. И. Менделеева, рассматривавшего свою деятельность в Главной палате мер и весов, как «участие в экономическом устройстве России». Он писал: «... пока могу, буду стараться дать плодотворное промышленное, реальное дело своей стране в уверенности, что политика, устройство, образование и даже оборона

страны без развития промышленности немислима ... Наука и промышленность — вот тут мои мечты. Они все тут».

После смерти великого ученого эти идеи были забыты и только после Великой Октябрьской социалистической революции — в годы Советской власти началось интенсивное и целенаправленное развитие отечественной метрологии.

Всем очевидна тесная связь метрологии и физики. Физика является той питательной средой, на которой развиваются метрологические исследования. Каждое новое открытое физическое явление влечет за собой, если так можно выразиться, его метрологическое использование. Метрологические институты в настоящее время являются, по существу, крупными физическими институтами и ведут исследования в самых различных областях физики. Органическая связь метрологии с физикой порождает необходимость самого тесного научного контакта с основными физическими институтами страны. Эти связи должны относиться, в первую очередь, к институтам Академии наук СССР и союзных республик. Зачастую бытует мнение, что метрология — это какая-то особая группа научных работников, работающих в специальных метрологических учреждениях Комитета стандартов и владеющих тайнами точных абсолютных измерений. Мы забываем, что в метрологические институты непрерывно идет пополнение из институтов и организаций, которые формально не именуются метрологическими, но по существу ведут метрологические работы. Мы зачастую подсчитываем кадры метрологов исходя из численности научных работников и инженеров, работающих в организациях нашей системы, забывая, что в области метрологии работают тысячи научных работников институтов Академии наук, министерств и ведомств. Иногда и эти работники не подозревают, что они являются также метрологами и их исследования пополняют метрологический фонд страны.

Разве можно представить себе работы, связанные с определением или уточнением основных физических констант, стандартных и справочных данных, получением стандартных образцов веществ, в отрыве от аналогичных исследований, которые ведутся в институтах Академии наук? Разве можно себе представить работы по созданию точных и образцовых методов измерения ионизирующих излучений, работы в области радиоизмерений, в области измерения времени и частоты без тесного контакта с институтами Комитета по атомной энергии СССР, физическими институтами АН СССР, институтами Министерства радиопромышленности и т. д.?

Совершенно естественно, что в метрологических институтах созданы весьма благоприятные условия для проведения ряда высокоточных измерений, однако без тесных научных связей с другими организациями эта работа обречена на малую эффективность.

Наши метрологические организации должны проявлять большую активность в вопросах об этих связях, ибо в противном случае фразы об опережающей роли метрологии останутся только фразами, так как бурное развитие современной техники требует объединения усилий всех метрологов страны, независимо от того, в каких учреждениях они работают.

Между измерительной техникой и метрологией существует неразрывная связь и взаимозависимость. Недаром в пределах страны метрологию и измерительную технику, в целом, называют национальной системой измерений.

Метрология и метрологическая служба СССР должны, таким образом, играть чрезвычайно активную роль в организации измерительного дела и приборостроения в стране.

Не имея возможности подробно останавливаться на этом вопросе, отмечу только, что одними из основных задач Комитета стандартов и его метрологических учреждений в этом направлении должны являться координация и планирование измерительного дела и приборостроения в стране, организация системы государственных испытаний новой измерительной техники, служащих важнейшим каналом, по которому осуществляется практическая связь и воздействие метрологии на приборостроение.

Чрезвычайное большое значение имеет последнее постановление ЦК КПСС и Совета Министров об улучшении организации научной работы в стране. Специальный раздел этого постановления касается вопроса организации системы проката измерительной техники. И не случайно, что организация этой крайне важной службы возложена на Комитет стандартов. Это очень трудная и ответственная задача, для решения которой необходимо привлечь все технические силы системы Комитета.

Говоря о развитии метрологической службы, об увеличении числа государственных и ведомственных лабораторий, нельзя забывать об одном, весьма важном, обстоятельстве.

Наша промышленность развивается чрезвычайно быстрыми темпами, но еще быстрее растут средства автоматизации управления различными производственными и технологическими процессами. Наряду с этим расширяются диапазоны и растет число измеряемых величин. Оба фактора приводят к очень быстрому увеличению номенклатуры парка измерительных приборов, а следовательно, и к увеличению номенклатуры метрологического оборудования для калибровки и поверки этих приборов, к увеличению количества поверочных установок. Можно ожидать, что потребная стоимость оборудования и трудовых затрат метрологической службы в ближайшее время может достигнуть огромных сумм.

Поэтому, нам кажется, нужно искать новые научные и технические принципы структуры и технических решений метрологического оборудования, а также организации всей работы по

обеспечению единообразия и правильности показаний измерительных приборов.

Прежде всего нужно настойчиво искать способы сокращения числа звеньев цепи поверочного оборудования для каждого вида измерений. Здесь имеются, по крайней мере, два главных пути. Один из них — поиски средств доведения правильных значений величин непосредственно от образцовых средств высших разрядов до потребителей. Для таких величин, как время и частота, уже реализуется передача сигналов по радио непосредственно от эталонов. Этот способ не исключен и для многих других величин.

Второй путь лежит в максимальном удешевлении поверочных установок высшего звена, в унификации и агрегатировании их элементов с тем, чтобы стандартные элементы можно было применять в оборудовании для поверок приборов, измеряющих самые разнообразные величины.

Может быть, необходимо разработать также требования к принципам построения измерительных приборов с тем, чтобы иметь возможность поверять только такие их элементы, которые имеют недостаточную надежность и при этом определяющим образом влияют на метрологические характеристики. При конструировании приборов нужно заботиться о максимальном удешевлении их метрологического обслуживания и о снижении капиталовложений в метрологическое оборудование.

Вопросы, о которых идет речь, не являются вопросами далекого будущего и к их решению надо приступать уже сегодня.

Наряду с мероприятиями, направленными на обеспечение единства и правильности показаний измерительных средств, необходимо перейти к решению задач, связанных с обеспечением единства и достоверности результатов измерений. Дело в том, что в настоящее время четко проявляется тенденция уменьшения доли погрешности измерительных устройств в погрешности результатов измерений. В то же время для народного хозяйства страны необходимо, чтобы была гарантирована, с заданной вероятностью, необходимая точность результатов всех измерений. Это обстоятельство вызывает необходимость включить в число задач метрологической службы метрологическую аттестацию применяемых в народном хозяйстве методов измерений.

Метрологическая аттестация наиболее распространенных методов измерений должна завершаться их стандартизацией, т. е. жесткой регламентацией всех элементов измерительного процесса. К этой работе необходимо широко привлекать республиканские и межобластные лаборатории государственного надзора, которые смогут наиболее полно учесть условия измерений, специфические для различных районов страны.

В тесной связи с этим стоит вопрос и о соблюдении стандартов. Дело в том, что самый рациональный комплекс технических

показателей, предусмотренный в стандартах, не может сам по себе обеспечить их выполнение. Необходимо установить методику оценки принятых показателей. Пока эта методика не установлена, не определены применяемые средства измерений, а в ряде случаев и методика обработки получаемых данных наблюдений, бесполезно говорить о качестве изделий, а тем более о повышении их качества. Поэтому, говоря о стандартах, необходимо иметь в виду, что, кроме различных показателей качества стандартизуемых изделий, стандарты должны содержать требования к методам испытаний и измерений.

Таким образом, мы видим, что и здесь метрология и стандартизация органически переплетаются друг с другом, и метрология, безусловно, является базой стандартизации.

Особенно важное значение в связи с общими задачами, стоящими перед стандартизацией и метрологией, приобретает применение стандартных образцов химического состава и физических свойств веществ и материалов. Область их применения охватывает ведущие отрасли современной промышленности.

Применение стандартных образцов обеспечивает более правильную и объективную оценку качества многих видов продукции, значительно ускоряет процесс определения качества, что, в конечном итоге, приводит к большому технико-экономическому эффекту. Стандартные образцы приобретают также все большее значение при испытаниях состава сырья и продукции, импортируемых и экспортируемых в рамках международного торгового обмена.

Таким образом, практика последних лет показала неразрывную связь между метрологией и стандартизацией. Все, начиная с единиц измерений и высшего звена измерительной техники — эталонов и кончая методами поверки измерительной аппаратуры, приобретает силу закона в виде государственных стандартов.

Особенно ответственным актом является утверждение, как государственных стандартов, каждого государственного эталона или комплекта государственных эталонов. И не случайно каждый государственный эталон утверждается специальным решением Комитета стандартов. Таким путем в 1968 г. были утверждены: государственный эталон времени и частоты, эталон единицы массы — килограмм, эталон единицы силы тока — ампер, эталон единицы длины — метр. Подготовлен к утверждению эталон единицы силы света — кандела, идет подготовка к утверждению комплекта эталонов нонизирующих излучений.

Каждое утверждение государственного эталона является своеобразным экзаменом для наших метрологических институтов.

Все сказанное свидетельствует о том, что в результате объективного процесса развития производительных сил страны

работники измерительного дела и работники стандартизации оказались на передовом участке борьбы за технический прогресс и, следовательно, за быстреее построение коммунизма. Наш долг всеми силами способствовать дальнейшему быстрому, эффективному и рациональному развитию измерительного дела в нашей стране.

Поступила в редакцию

25/III 1969 г.

О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМАХ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ В МЕТРОЛОГИИ

Математическая статистика всегда была необходимым инструментом в руках метролога. С другой стороны, в метрологии возникают задачи, стимулирующие разработку новых методов математической статистики, и, таким образом, обе науки выигрывают благодаря существующей между ними связи.

В частности, в последнее время интенсивно разрабатываются новые, так называемые крепкие (robust), методы оценивания параметров, которые позволяют довольно реалистически трактовать задачу обработки результатов прямых измерений. Обзору этих методов и посвящено дальнейшее изложение.

В стандартной схеме прямых измерений некоторой постоянной a результаты наблюдений имеют вид

$$x_i = a + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где ε_i — погрешности наблюдений.

Будем предполагать, что систематическая составляющая погрешностей исключена, так что ε_i суть случайные погрешности наблюдений. В таком случае их естественно считать независимыми, одинаково распределенными случайными величинами. Если обозначить их функцию распределения $F(x)$, то функция распределения результатов наблюдений x_i будет, очевидно, равна

$$P\{x_i < x\} = P\{a + \varepsilon_i < x\} = P\{\varepsilon_i < x - a\} = F(x - a).$$

Пользуясь статистическим языком, можно сказать, что целью измерения является оценивание значения параметра a по

данным выборки x_1, \dots, x_n из совокупности с функцией распределения $F(x - a)$.

Трудность задачи оценивания параметра a определяется теми данными о функции распределения погрешностей ε_i , которыми мы располагаем. Естественно, чем меньше сведений об $F(x)$, тем задача труднее.

Рассмотрим прежде всего случай, когда характер погрешностей изучен настолько хорошо, что функция распределения $F(x)$ считается известной полностью. При этом наилучшей оценкой параметра a служит так называемая оценка Питмэна

$$\tilde{a}_n^0 = a_n^0(x_1, \dots, x_n) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} u \prod_{i=1}^n f(x_i - u) du}{\int_{-\infty}^{+\infty} \prod_{i=1}^n f(x_i - u) du},$$

где $f(x)$ — плотность распределения $F(x)$.

В частности, если $F(x)$ — функция распределения нормального закона, то $\tilde{a}_n^0 = \bar{x} = \frac{x_1 + \dots + x_n}{n}$, если $F(x)$ — функция распределения равномерного закона, то $\tilde{a}_n^0 = \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2}$, и т. д.

Кстати отметим, что для нормального и равномерного законов распределения погрешностей оценки \tilde{a}_n^0 универсальны в том смысле, что они не зависят от дисперсии погрешностей. Вообще же говоря, этим свойством оптимальные оценки не обладают.

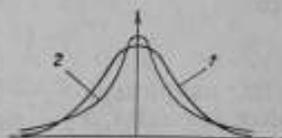
Для нормального закона можно не только указать оптимальную точечную оценку x , но и построить на ее базе доверительный интервал, покрывающий неизвестное значение параметра с заданной надежностью. То же самое можно сделать и для равномерного закона.

Однако уместно задать вопрос: вправе ли мы конструировать точную модель для рассматриваемой совокупности до того, как произведены наблюдения, и затем по результатам наблюдений делать выводы о характеристиках совокупности, уже не беспокоясь о том, адекватна ли модель? Может быть, не следует фиксировать точную модель до того, как сделаны наблюдения?

В оправдание нормального закона распределения погрешностей часто ссылаются на известную гипотезу элементарных ошибок Хагена, но такая ссылка немедленно влечет за собой другой вопрос: а справедлива ли в рассматриваемом случае гипотеза элементарных ошибок.

Что касается экспериментальных данных, то они свидетельствуют о том, что в некоторых случаях распределение погрешностей значительно отклоняется от нормального закона.

М. Романовский [1] отмечает, что в результате анализа большого числа выборок, образованных высокоточными наблюдениями (в частности, при измерении абсолютной единицы электрического сопротивления) он обнаружил один и тот же тип отклонения фактических законов распределения погрешностей от нормального. Именно, в центральной части и на концах значения плотностей фактических распределений больше соответствующих значений нормальной плотности приблизительно на 10%, а в промежуточной части нормальная плотность лежит выше фактической (см. рисунок).



Отклонение фактических законов распределения погрешностей от нормального.

Кривые: 1 — плотности нормального закона; 2 — полученная М. Романовским

В другой работе [2] М. Романовский предложил модель, которая приводит к закону распределения погрешностей, отличающемуся от нормального в том же направлении, что и на рисунке. Не вдаваясь в детали, отметим лишь, что, по нашему мнению, если известно, что закон распределения погрешностей не является нормальным, то только в исключительных случаях можно считать точно известным его тип. Разные исследователи будут придерживаться различных точек зрения на этот счет и, более того, вероятно каждый из них в подтверждение своей точки зрения предложит модель, приводящую именно к нужному ему закону распределения. Одна из возможных моделей, порождающая отличные от нормального законы распределения погрешностей, — это так называемая схема загрязнения (contamination). В ней предполагается, что с вероятностью $1 - \pi$ опыт оказывается «чистым», и в этом случае погрешности распределены по нормальному закону $\Phi(x)$ с дисперсией σ^2 , а с вероятностью π происходит сбой, опыт «загрязняется», и в этом случае закон распределения погрешностей $H(x)$ отличен от предыдущего (он может быть либо отличным от нормального, либо нормальным, но с дисперсией $\sigma_1^2 > \sigma^2$). Тогда суммарный закон распределения погрешностей имеет вид

$$F(x) = (1 - \pi) \Phi(x) + \pi H(x)$$

и, таким образом, отличен от нормального. Другая модель (приводимая, в частности, М. Романовским) основана на предположении о том, что погрешности независимы и условно нормальны, но дисперсии их сами суть случайные величины. При различных предположениях о распределении дисперсии погрешностей будут получаться и различные суммарные законы распределения погрешностей, в частности, двойной показательный закон с плотностью $f(x) = \frac{1}{2} \exp -|x|$ и другие.

Поэтому ко всей проблеме оценивания параметра a нужно подходить по-иному. Именно, не предполагать, что закон распределения $F(x)$ погрешностей e_i известен (нормальный или какой-нибудь другой), а считать, что e_i подчиняются какому-то из возможных распределений (или типов распределений). В число возможных можно включить предлагаемые разными исследователями (если они подкрепляют свои предложения более или менее реальными моделями). Итак, если F — множество возможных типов законов распределения погрешностей, то

$$F = \{F_1, F_2, \dots, F_r\},$$

где, например, F_1 — нормальный тип (совокупность нормальных законов), F_2 — равномерный тип и т. д. Разумеется, не обязательно, чтобы множество F состояло из конечного числа типов законов.

Другой подход к задаче основывается на том, что априори ничего (или, точнее, почти ничего) не предполагается известным о законе распределения погрешностей, а некоторые характеристики закона оценивают по выборке и затем, в зависимости от значений этих характеристик, строят соответствующую оценку параметра. Ниже мы остановимся на каждом подходе более подробно.

Предположим сначала, что предыдущий опыт измерений (или какие-то иные соображения) позволят практически точно оценить некоторое (четное) число первых моментов закона $F(x)$, так что можно считать известными моменты

$$\mu_1 = \int x f(x) dx,$$

$$\mu_2 = \int x^2 f(x) dx = \sigma^2,$$

$$\dots \dots \dots$$

$$\mu_{2k} = \int x^{2k} f(x) dx.$$

Отметим, что, хотя вряд ли в какой-нибудь практической задаче моменты $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_{2k}$ известны точно, оценить их по длинным сериям предшествующих измерений несравненно легче, чем оценить закон распределения $F(x)$ в целом. Тогда можно предложить оценку для a , лучшую чем среднее \bar{x} . Эта оценка имеет вид (см. [3, 4])

$$\begin{aligned} \tilde{a}_n = & \bar{x} + b_0 + \sum_{j, j_k=1}^n b_{j, j_k} (x_j - \bar{x})(x_{j_k} - \bar{x}) + \dots + \\ & + \sum_{j_1, \dots, j_k} b_{j_1, \dots, j_k} (x_{j_1} - \bar{x}) \dots (x_{j_k} - \bar{x}), \end{aligned}$$

где числа $b_0, b_{j, j_k}, \dots, b_{j_1, \dots, j_k}$ однозначно определяются указанными выше моментами.

Самый простой случай здесь, когда известны первые четыре момента $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ (именно эти моменты часто используют для выравнивания рядов наблюдений). Тогда

$$\tilde{a}_n = \bar{x} + b_0 + b_1 \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2 + b_2 \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})(x_j - \bar{x}),$$

и для определения b_0, b_1, b_2 имеем систему линейных уравнений

$$M(\tilde{a}_n) = 0,$$

$$M(\tilde{a}_n(x_1 - \bar{x})^2) = 0,$$

$$M(\tilde{a}_n(x_1 - \bar{x})(x_2 - \bar{x})) = 0.$$

Распределение статистики \tilde{a}_n при $n \rightarrow \infty$ стремится к нормальному, что может быть использовано для построения доверительных интервалов для a .

Рассмотрим теперь более близкую к практическим задачам схему, в которой ничто не фиксируется точно, а предполагается лишь, что

$$F \in \mathcal{F} = \{F_1, F_2, \dots, F_r\}.$$

Чем отличаются друг от друга различные типы F_i ? Грубо говоря, существенным является различие в поведении F_i на концах; в средней части все более или менее похоже. Для того, чтобы построить оценки с удовлетворительными свойствами, каким бы ни был закон распределения погрешностей из \mathcal{F} , нужно в разумной степени ослабить влияние на оценку крайних результатов наблюдений. Будем поступать следующим образом.

Расположим результаты наблюдений x_1, \dots, x_n в порядке возрастания

$$X_1 \leq \dots \leq X_n$$

и рассмотрим оценки вида

$$\tilde{a}_n = \sum_{i=1}^n \alpha_i X_i,$$

где $\alpha_1 = \alpha_n, \alpha_2 = \alpha_{n-1}, \dots$ и $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$. Веса крайних членов естественно назначать меньшими, чем веса средних. Среди оценок вида $\sum_{i=1}^n \alpha_i X_i$ наиболее популярны следующие:

1) *урезанные средние*, которые в случае нечетного $n = 2k + 1$ имеют вид

$$T_p = \frac{1}{2m+1} \sum_{l=-m}^m X_{k+1+l}, \quad m = [np], \quad 0 < p \leq \frac{1}{2};$$

2) *уинзоризованные средние* (названные так по имени американского статистика Уинзора, предложившего их)

$$W_p = \frac{1}{n} \left\{ \sum_{i=m}^m X_{k+1+i} + (k-m)(X_{k+1-m} + X_{k+1+m}) \right\};$$

3) *взвешенные средние медианы и двух симметрично расположенных относительно медианы порядковых статистик*

$$Y_{p,a} = a(X_{k+1-m} + X_{k+1+m}) + (1-2a)X_{k+1}, \quad 0 \leq a \leq 1.$$

В частности, выборочная медиана является частным случаем каждой из трех приведенных выше статистик. Как видно из формул для T_p , W_p , $Y_{p,a}$, эти оценки имеют довольно простую структуру и действительно ослабляют влияние крайних наблюдений на окончательный результат измерения.

Как же выбрать наиболее подходящую среди оценок T_p , W_p , $Y_{p,a}$? Это, разумеется, зависит от структуры множества F .

Назовем эффективностью оценки \tilde{a}_n^* при законе распределения погрешностей F отношение

$$\text{eff}[\tilde{a}_n^*; F] = \frac{\min \sigma^2[\tilde{a}_n; F]}{\sigma^2[a_n^*; F]},$$

где в числителе берется минимум по всем несмещенным оценкам \tilde{a}_n .

Определим теперь гарантированную эффективность оценки \tilde{a}_n^* в множестве F как

$$\text{geff}[a_n^*; F] = \min_{F \supseteq F} \text{eff}[a_n^*; F].$$

Разумный принцип выбора оценки может основываться на величине $\text{geff}[a_n^*; F]$; мы предпочитаем оценку с большей гарантированной эффективностью. Приведем результаты расчетов [5], относящиеся к случаю $n \rightarrow \infty$.

Если F состоит из типов законов: нормального, «загрязненного» нормального с плотностью

$$f(x) = (1-\delta) \frac{1}{\sqrt{18\pi}} e^{-x^2/18} + \delta \frac{1}{\sqrt{18\pi}} e^{-x^2/18} \delta(x-\alpha), \quad \delta = 0,01; 0,05,$$

студентовских с числом степеней свободы 3 и 5, двойного показательного и Коши, то

$$\text{geff}[T_{0,25}] = 0,786,$$

$$\text{geff}[W_{0,125}] = 0,775,$$

$$\text{geff}[Y_{0,125; 0,4}] = 0,773.$$

Таким образом, при больших n для весьма различных законов распределения погрешностей существуют универсальные оценки с довольно высокой гарантированной эффективностью. Понятно, что для оценок, которые строят при жестких предположениях об $F(x)$, гарантированная эффективность, как правило, низка.

Имеется значительное число результатов, относящихся к другим множествам F , а также к случаю малых значений n [6—10]. Тематика такого рода стала очень популярной после опубликования работы Тьюки [11].

Другой подход к построению оценок с высокой гарантированной эффективностью основан на возможности разбиения (грубого) типов распределений на классы с помощью простой числовой характеристики таким образом, что свойства оценки параметра будут мало меняться, когда закон распределения погрешностей меняется в пределах одного класса.

Заметим, что, поскольку распределения погрешностей естественно считать симметричными, простейшей числовой характеристикой является безразмерный четвертый момент $k = \frac{\mu_4}{\sigma^4}$. для нормального закона $k=3$.

Далее по результатам наблюдений оценивают значение числовой характеристики, служащей базой для классификации, и тем самым определяют класс, к которому принадлежит фактический закон распределения погрешностей. После этого предлагается использовать оценку, удовлетворительно обслуживающую полученный класс законов распределения.

Такая точка зрения развита в работе [12]; там же приведены результаты расчетов на машине, полученные при моделировании выборок из совокупностей $A (k_A = 1,9)$, $B (k_B = 2,7)$, $C (k_C = 3,9)$, $D (k_D = 9,9)$. Класс A хорошо обслуживается оценкой

$$\bar{X}_{v/4}^{(c)} = \frac{1}{2[n/4]} \left\{ \sum_{i=n-[n/4]+1}^n X_i + \sum_{i=1}^{[n/4]} X_i \right\},$$

класс B — оценкой \bar{X} , класс C — оценкой

$$\bar{X}_{v/4} = \frac{1}{n-2[n/4]} \sum_{i=[n/4]+1}^{n-[n/4]} X_i,$$

и класс D — выборочной медианой m . Будем оценивать величину k статистикой $x = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{s^4}$, где s^2 — выборочная

дисперсия, и построим оценку

$$T = \begin{cases} \bar{X}_{1/2}^{(c)}, & \text{если } x < 2,0, \\ \bar{X}, & \text{если } 2,0 \leq x \leq 4,0, \\ \bar{X}_{3/2}, & \text{если } 4,0 < x \leq 5,5, \\ m, & \text{если } 5,5 < x. \end{cases}$$

В таблице приведены отношения (эмпирических) дисперсий оценок X , m , T к минимальной среди них.

Класс распределений	n	\bar{X}	m	T
$A (k_A = 1,9)$	7	1,2	2,5	1,0
	25	1,3	3,4	1,0
$B (k_B = 2,7)$	7	1,0	1,4	1,1
	25	1,0	1,4	1,0
$C (k_C = 3,9)$	7	1,1	1,0	1,2
	25	1,4	1,0	1,2
$D (k_D = 9,9)$	7	443,8	1,0	4,2
	25	715,6	1,0	1,2

Мы видим, что гарантированная эффективность оценки T сравнительно с эффективностью остальных оценок в множестве $F = \{A, B, C\}$ весьма высока, хотя для распределений из класса D , которые похожи на распределение Коши, оценка T при $n=7$ еще много хуже выборочной медианы.

В заключение мы хотим ответить на естественно возникающий вопрос, почему рассматриваемую здесь постановку задачи оценивания в схеме прямых измерений начали изучать сравнительно недавно. Справедливости ради отметим, что Уинзор предложил свои оценки еще перед войной. Интенсивное исследование свойств оценок вида $\sum_{i=1}^n a_i x_i$ потребовало существенного продвижения теории порядковых статистик, а получение результатов для конечных значений n требует таких громоздких расчетов, которые невозможны без современных вычислительных машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романовский М. О модифицированном нормальном распределении случайных ошибок. «Metrologia», 1965, v. 1, №1.
2. Romanowski M. Generalized theory of the modified normal distribution. «Metrologia», 1968, v. 4, N. 2.

3. Каган А. М. Выборочное среднее как оценка параметра сдвига. Доклады АН СССР, 1966, т. 169, стр. 5.

4. Каган А. М. Теория оценивания для семейства с параметрами сдвига, масштаба и экспонентных. Труды Матем. института им. Стеклова АН СССР, т. 104, 1968.

5. Siddiqui M., Raghunandan K. Asymptotically robust estimators of location. «J. Amer. Stat. Assoc.», 1967, 62, p. 319.

6. Bickel P. On some robust estimates of location. «Ann. Math. Stat.», 1965, v. 36, p. 3.

7. Birnbaum A., Laska E. Optimal robustness: A general method, with applications to linear estimators of location. «J. Amer. Stat. Assoc.», 1967, v. 62, p. 320.

8. Crow E., Siddiqui M. Robust estimation of location. «J. Amer. Stat. Assoc.», 1967, v. 62, p. 318.

9. Gastwirth J. On robust procedures. «J. Amer. Stat. Assoc.», 1966, v. 61, p. 316.

10. Huber P. Robust estimation of a location parameter. «Ann. Math. Stat.», 1964, v. 35, p. 1.

11. Tukey J. A survey of sampling from contaminated distributions, в сб. «Contributions to probability and Statistics», Stanford Univ. Press, 1960.

12. Hogg R. Some observations on robust estimation. «J. Amer. Stat. Assoc.», 1967, v. 62, p. 320.

Поступила в редакцию

3/1 1969 г.

ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ И ИХ РОЛЬ В РАЗВИТИИ МЕТРОЛОГИИ

Проблема физических констант, над которой сейчас работают во ВНИИМ и в некоторых других институтах нашей системы, является по существу новой проблемой для метрологов, потому что в метрологических институтах такие работы начали вести лет 10—12 тому назад, и они касались определения только двух констант: скорости распространения световых волн и гиромагнитного отношения протона.

Эта проблема, однако, в настоящее время приобрела совершенно новое направление в связи с тем, что современная метрология предполагает постепенный переход на систему естественных эталонов, т. е. эталонов, основанных на фундаментальных физических константах.

В течение всего предшествующего времени, по крайней мере до 20-х годов, определение констант носило совершенно разрозненный характер, т. е. каждую константу с той или иной степенью точности определяли независимо, и вопрос о согласовании полученных значений не возникал. Действительно, на тех уровнях точности, которые имелись в прошлом и в начале этого века, по крайней мере до 20-х и даже 30-х годов, такое согласование не играло существенной роли. И только начиная с 1930 г., когда точность определения констант значительно возросла, встал вопрос о том, чтобы, помимо точного определения отдельных констант, согласовывали и их значения в соответствии с теми зависимостями, которые между ними существуют.

Представление о том, как повышалась точность определения констант по годам, дает табл. 1.

Из таблицы, в частности, следует, что погрешность определения заряда электрона уменьшилась с 0,1% в 1929 г. до

Таблица 1

Погрешность основных физических констант по результатам определений в разные годы

Константа	Относительная погрешность σ , %			
	1929 г.	1955 г.	1963 г.	1968 г.
Заряд электрона	$1 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Скорость света	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
Постоянная Планка	$2 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Масса покоя электрона	$2 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Масса покоя протона	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Число Авогадро	$2 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Постоянная Фарадея	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$
Постоянная тонкой структуры	$1 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Магнитный момент протона в магнетонах Бора	—	$5 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$
То же, в ядерных магнетонах	—	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Гиромангнитное отношение протона	—	$1 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Постоянная Ридберга	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$

0,001 % в 1968 г., массы электрона — с 0,2 % в 1929 г. до 0,001 % в 1968 г.

Данные, приведенные в табл. 1, достаточны для того, чтобы дать ясное представление о медленном, но верном увеличении точности. По мере того, как точность определения отдельных констант увеличивалась, оказалось необходимым и их согласование, так как существующие между ними зависимости должны быть удовлетворены. К настоящему времени достаточно известны значения некоторых фундаментальных физических констант. Следует сказать, что мы имеем в виду под понятием «фундаментальные физические константы». Не претендуя на большую точность и четкость, константы, на современном уровне состояния физических знаний, мы могли бы классифицировать по следующим признакам.

Константы, которые никогда ни от чего не зависят и не изменяются. К ним относится, например, заряд электрона, хотя никогда никто не экспериментировал с совершенно уединенным электроном без электронно-позитронного вакуума. Поэтому сказать, каков заряд изолированного электрона, невозможно. Однако вся сумма знаний, накопленных до настоящего времени, свидетельствует о том, что в мире, в котором мы экспериментируем, заряд электрона остается неизменным.

Другой тип констант — это константы, которые требуют релятивистских поправок, как, например, масса элементарных

частиц. Правда, обычно речь идет о массе покоя, т. е. о массе частицы в системе, относительно которой она покоится.

И, наконец, третий тип констант — это константы для некоторых предельных физических условий в пустом пространстве, например, скорость света.

Эти константы, которые мы называем фундаментальными физическими константами, по существу и есть предмет нашего изучения и рассмотрения.

Какие же константы к настоящему времени определены достаточно точно и в течение ближайших лет не будет необходимости в уточнении их для согласования остальных констант? Это — скорость света, которая достаточно хорошо известна*, магнитный момент протона в магнетонах Бора, постоянная Ридберга, достаточно точно известная из спектроскопических измерений, с высокой точностью известны атомные массы.

Но есть ряд других констант, которые известны еще с недостаточной степенью точности. К ним относятся: заряд электрона, постоянная Авогадро, постоянная тонкой структуры, постоянная Планка и ряд других констант, существенных для физических теорий.

Физический аспект проблемы заключается в том, чтобы найти наиболее достоверные значения констант в соответствии с теми возможностями, которые дает современная метрология и измерительная техника. Как следует из детального рассмотрения, этот аспект является физическим хотя бы потому, что, в частности, и квантовая электродинамика нуждается в более точном знании некоторых физических постоянных. В частности, решение вопроса о структуре протона зависит от точности определения постоянной тонкой структуры.

Но следует ли разрозненно определять всю гамму констант? По-видимому, этот путь был бы тяжелым и ненужным. Оказывается, что наряду с хорошо известными константами, можно ограничиться несколькими константами, которые наилучшим образом можно измерить, и вместе с хорошо известными константами по существующим зависимостям рассчитать все остальные. Такие согласования впервые начал проводить американский исследователь Бердж, а после него этими вопросами стали заниматься американский физик Дюмонд и математик Коэн. В настоящее время вопросы согласования констант по экспериментальным данным различных исследователей принял на себя Коэн.

Из тех констант, которыми следует сейчас заниматься в первую очередь, с нашей точки зрения, а также с точки зрения исследователей других стран, наиболее необходимы следующие.

* Для уточнения значения скорости света в настоящее время во многих лабораториях мира проводят эксперименты, однако не столько для согласования, сколько для иных целей.

1. Постоянная тонкой структуры или, как часто ее называют, постоянная Зоммерфельда, обозначаемая α .

Постоянную тонкой структуры определяли многие исследователи. При согласовании констант, которое проводил несколько раз в течение по крайней мере 25 лет Дюмонд, принимали для α^{-1} значение $137,0388 \pm 0,0006$, полученное Лембом на основании изучения тонкой структуры в дейтерии. Длительное время значение Лемба полагали наиболее достоверным и предпочитали всем остальным значениям, полученным путем изучения сверхтонкой структуры водорода, путем аномального магнитного момента электрона и особенно при помощи водородного лазера из опытов Рамзея, которые он произвел в 1966 г. Однако постепенно, начиная с 1966 г., ряд исследователей подтвердил значение α , полученное при помощи водородного лазера Рамзея. Это значение в выражениях α^{-1} равнялось $137,0359 \pm 0,0004$. И несмотря на исключительно точное измерение частоты, проводившееся с погрешностью 10^{-11} или даже 10^{-12} , т. е. с точностью, далеко превосходящей все, что нужно знать для вычисления α из формул, связывающих частоты перехода и постоянную тонкой структуры, для согласования все же принимали значение α Лемба. Объяснялось это тем, что в формулах для сверхтонкого расщепления для связи между частотой перехода и соответствующим уровнем и постоянной тонкой структуры входил коэффициент, зависящий от структуры поля протона. И так как эта структура неизвестна, то оставалась в какой-то мере неопределенность в значении α , полученном Рамзеем в 1966 г.

Однако ряд других исследователей, которые пользовались измерениями аномального магнитного момента (Вилкинсон и Крейн в 1963 г., затем Робеско, применивший метод пересечения уровней) постепенно все более и более подтверждали значение α , полученное Рамзеем. И сейчас вопрос о постоянной тонкой структуры стоит таким образом, что значение Лемба критически переоценивается на основе новых результатов (табл. 2). Вполне возможно, что Лемб сделал некоторую ошибку в своих расчетах, однако он сообщил, что у него не осталось никаких письменных данных и он не в состоянии проверить свои результаты.

2. Магнитный момент протона в ядерных магнетонах μ_p/μ_N — очень важная для согласования постоянная.

Положение со значением магнитного момента протона в ядерных магнетонах таково, что требуется осуществление дальнейших экспериментов для его уточнения. Наиболее достоверными значениями Дюмонд и Коэн в своих согласованиях считали данные Саммера и других. Это следует из табл. 3, в которой приведены значения моментов, полученные различными исследователями. Из этой таблицы также следует, что значение μ_p/μ_N Саммера было наиболее надежным, значение

Таблица 2

Значение постоянной тонкой структуры, α^{-1}	Метод определения	Автор и год
$137,0388 \pm 0,0006$	Тонкая структура в дейтерии	Лемб, 1953
$137,0381 \pm 0,0010$	Аномальный магнитный момент электрона	Вилкинсон и Крейн, 1963
$137,0359 \pm 0,0007$	Точка пересечения уровней	Робеско, 1966
$137,0359 \pm 0,0004$	Водородный мазер	Рамзей, 1966
$137,0359 \pm 0,0004$	Квант магнитного потока	Паркер, Тейлор, Лангенберг, 1967

Сандерса и других очень близко к значению Саммера, значение же Блоха, хотя и близко к полученному Саммерсом и Сандерсом, однако дисперсия его сравнительно велика.

Таблица 3

Значения магнитного момента протона в ядерных магнетонах, μ_p/μ_N	Автор	Страна
$2,792757 \pm 0,00006$	Саммер и др.	США
$2,792906 \pm 0,00006$	Бойн и Франкен	.
$2,79275 \pm 0,00010$	Блох и Джефрис	.
$2,79277 \pm 0,00005$	Сандерс и др.	.
$2,79287 \pm 0,00002$	Мамырин и Французов	СССР

На другом полюсе мы имеем значение μ_p/μ_N Бойна и Франкена, которое сильно расходится с результатами указанных выше авторов.

Поэтому, хотя дисперсия, как видно из табл. 3, более или менее удовлетворительна, Дюмонд и Коэн не учитывали результатов Бойна и Франкена при согласованиях. Однако работы Мамырина и Французова в Физико-техническом институте в Ленинграде дали результаты, имеющие малую дисперсию, и полученное ими значение магнитного момента в ядерных магнетонах μ_p/μ_N ближе к значению Бойна и Франкена, чем к значениям, о которых говорилось ранее.

Хотя в литературе было высказано мнение, что теперь вопрос о значении магнитного момента в ядерных магнетонах ставится на новые рельсы, так как получено еще пятое его значение, близкое к значению Бойна и Франкена, оно не вошло в согласование.

Приведенные данные служат серьезным основанием для утверждения сейчас, что должны продолжаться работы как по определению постоянной тонкой структуры, так и по определению магнитного момента протона в ядерных магнетонах.

3. Гиромагнитное отношение протона γ_p . Значения γ_p , полученные в Национальном бюро эталонов (США), в Национальной физической лаборатории Англии, в Харьковском институте метрологии и во ВНИИМ в Ленинграде, практически совпадают, если учесть различие в размерах ампера. Об этом свидетельствуют данные табл. 4.

Таблица 4

Значения гиромагнитного отношения протона $\gamma_p \cdot 10^{-4} \text{ рад} \cdot \text{г} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1}$	Автор	Страна, институт
26 751,2 ± 0,2	Ягола, Зингерман, Сепетый	СССР (ХВНИИМ)
26 751,92 ± 0,08	Бендер, Дрискол	США (НБЭ)
26 751,88 ± 0,08	Вигуро	Англия (ИФЛ)
26 752,32 ± 0,3	Яновский, Студенцов	СССР (ВНИИМ)

Существенным является то обстоятельство, что в США, Англии и во ВНИИМ работу по определению гиромагнитного отношения протона вели в слабых полях, а в Харьковском институте — в сильных полях.

Таким образом, со значением гиромагнитного отношения в настоящее время дело обстоит удовлетворительно.

Мы рассмотрели состояние вопроса со значением трех констант, очень важных для согласования всех остальных констант. Однако, если рассмотреть уравнения, которыми пользуются для согласования, то оказывается, что значение постоянной тонкой структуры получено из эксперимента и его нельзя найти из других соотношений. Поэтому чрезвычайно важно добавить какое-то четвертое соотношение для того, чтобы определение этих трех констант опиралось на большое число условных уравнений или уравнений, полученных из различных экспериментов. К такой константе относится h/e — отношение постоянной Планка к заряду электрона, которое определяется по методу, связанному с так называемым туннельным эффектом Джозефсона.

В настоящее время, как известно из литературы, отношение h/e достаточно точно определяют в пределах до нескольких десятитысячных процента, и так как оно связано с постоянной тонкой структуры α , то эксперименты по определению α , магнитного момента протона в ядерных магнетонах, гиромагнитного отношения и отношения постоянной Планка к элементарному заряду дают возможность получить достаточное число

уравнений для определения этих постоянных по способу наименьших квадратов. Экспериментально получены следующие результаты:

Частота перехода между уровнями при определении постоянной тонкой структуры, f	$10\,971,59 \pm 0,10$ Мгц
Магнитный момент протона в ядерных магнетонах, μ_p/μ_N	$2,792757 \pm 2,5 \cdot 10^{-5}$ $2,792770 \pm 7 \cdot 10^{-5}$
Постоянная Фарадея, F	$(96\,486,82 \pm 0,66) \cdot 10^3$ к·к·моль ⁻¹
Гиромагнитное отношение, γ_p	$(26\,751,92 \pm 0,08) \cdot 10^4$ рад·гЛ ⁻¹ ·сек ⁻¹ $(26\,751,88 \pm 0,08) \cdot 10^4$ рад·гЛ ⁻¹ ·сек ⁻¹
Удвоенное отношение заряда электрона к постоянной Планка, $2e/h$	$483,5914 \pm 0,0030$ Мгц/мкв

Следует сказать, что для этих согласований необходимо и определение фарадеевской постоянной, которой занимались в последнее время в США.

В основу подсчета констант легли следующие экспериментальные данные:

$$\begin{aligned} \alpha^{-1} &= 137,0359 \\ \frac{e^2 N}{a^3} &= 3,9782265 \cdot 10^{-5} \text{ к}^2/\text{кмоль} \\ &= 3,978208 \cdot 10^{-5} \text{ к}^2/\text{кмоль} \\ N \cdot e &= 9,648682 \cdot 10^7 \text{ к/кмоль} \\ \frac{a^3}{e} &= 24,253845 \cdot 10^{11} \text{ к}^{-1} \\ &= 24,253800 \cdot 10^{11} \text{ к}^{-1} \\ \frac{a}{e} &= 4,5547063 \cdot 10^{16} \text{ к}^{-1} \end{aligned}$$

где α — постоянная тонкой структуры, e — заряд электрона, N — число Авогадро.

Эти данные позволили составить условные уравнения для последующих вычислений. Так, пользуясь ими, подсчитывают по способу наименьших квадратов постоянные α , e и N . Согласованные значения этих констант следующие:

$$\begin{aligned} \alpha^{-1} &= 137,0359 \pm 0,0002 \\ e &= (1,60220 \pm 0,0002) \cdot 10^{-19} \text{ к} \\ N &= (6,02218 \pm 0,00009) \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1} \end{aligned}$$

На основании всех этих данных была получена окончательная таблица основных физических констант по согласованию на 1968 г. (табл. 5).

Все изложенное касается физического аспекта проблемы согласования констант.

Таблица 5

Основные физические константы по согласованию

Константа	Обозначение	Единица измерения	Значение	
			1965 г.	1966 г.
Скорость света	c	$м/сек^2$	$2,997925 \cdot 10^8$	$2,997925 \cdot 10^8$
Элементарный заряд	e	$к$	$1,60210 \cdot 10^{-19}$	$1,60220 \cdot 10^{-19}$
Число Авогадро	N	$к/моль^{-1}$	$6,02252 \cdot 10^{23}$	$6,02218 \cdot 10^{23}$
Масса покоя электрона	—	$кг$	$9,10908 \cdot 10^{-31}$	$9,10961 \cdot 10^{-31}$
Масса покоя протона	—	$кг$	$1,67252 \cdot 10^{-27}$	$1,6726 \cdot 10^{-27}$
Постоянная Фарадея	F	$к/к/моль$	$9,64870 \cdot 10^7$	$9,64873 \cdot 10^7$
Постоянная Планка	h	$дж \cdot сек$	$6,62559 \cdot 10^{-34}$	$6,62624 \cdot 10^{-34}$
Удельный заряд электрона	—	$к/кг$	$1,758796 \cdot 10^{11}$	$1,758830 \cdot 10^{11}$
Гиромагнитная постоянная	γ_p	$рад/(сек \cdot г.д)$	$2,675192 \cdot 10^8$	$2,675192 \cdot 10^8$
Магнитный момент протона:				
в магнетонах Бора	μ_p/μ_B	—	0,0015210325	0,0015210325
в ядерных магнетонах	μ_p/μ_N	—	2,79276	2,79276
Постоянная тонкой структуры	α	—	0,00729720	0,00729736
Постоянная Зигбана	Δ	—	—	1,002100

Остановимся кратко на метрологическом аспекте проблемы. Он заключается в том, что мы должны использовать константы для перехода на так называемые естественные эталоны. Однако здесь получается в некоторой степени замкнутый круг. Для того чтобы использовать константы для перехода на естественные эталоны, необходимо определить их в размерах тех единиц, которые данными эталонами воспроизводятся. Значит, необходимо совершенствовать как эталоны, так и точность измерений для того, чтобы повышать точность определения констант. И только очень точно зная константы в размерах воспроизводимых эталонами единиц, возможно будет основывать на них переход на естественные эталоны. В этом отношении важнейшее значение имеет гиромагнитное отношение протона и отношение постоянной Планка к заряду электрона.

Какова роль гиромагнитного отношения протона? Оказывается, что это отношение может быть использовано для установления размера единицы тока или для определения тока в абсолютной мере, если принять его значение, полученное в слабых и в сильных полях. Однако это не так просто, так как определение γ_p в сильных полях связано с измерениями силы, втягивающей рамку в магнитное поле, и с геометрией самой рамки, а определение γ_p в слабых полях связано с вычисленным постоянной, зависящей от размеров соленоида. Но тем не менее принципиально такие пути, по крайней мере, для поддержания ампера сейчас намечены, и гиромагнитное отношение протона будет иметь существенное значение для уточнения размера ампера.

Следующая задача — использование в метрологии константы h/e . В настоящее время ставится вопрос пока не об установлении единицы электродвижущей силы, а о поддержании этой единицы на том уровне, на котором она когда-то была определена, и о сопоставлении единиц, воспроизводимых эталонами в разных странах путем использования туннельных узлов Джозефсона. Так называется образец из двух сверхпроводников, разделенных тонким слоем диэлектрика. Как было показано Джозефсоном, при пропускании через такой узел постоянного тока больше некоторой величины на узле возникает постоянное напряжение и наблюдается излучение, частота которого определяется только напряжением и константой h/e . Поэтому, сравнивая напряжение на джозефсоновском узле с фиксированной частью э. д. с. нормального элемента и измеряя при этом частоту излучения, можно установить соответствие между э. д. с. эталона и частотой. Это дает возможность сличать друг с другом нормальные элементы как своего группового эталона вольта, так и национальных эталонов путем обмена между странами данными о том, какие частоты излучения соответствуют национальным эталонам. В настоящее время мощность излучения, полученная от джозефсоновских узлов, очень мала, а спектральные характеристики его плохо изучены. Однако можно воспроизвести обратный процесс, облучая узел Джозефсона от внешнего источника с. в. ч. мощности. В этом случае внешнее облучение моделирует по частоте ток, протекающий через узел. При совпадении частот тока Джозефсона и n -й гармоники облучения ток, протекающий через узел, имеет боковые полосы с нулевой частотой, что проявляется в виде ступеней постоянного тока на вольтамперной характеристике узла. Определяя значение облучающей частоты и уравнивая напряжение соответствующей ступени частью э. д. с. нормального элемента, также можно производить сравнение эталонов единицы э. д. с.

Для поддержания вольта этим способом не требуется знать точное значение h/e , важно только, что — это константа.

Однако для решения вопроса об установлении размера вольта на основе эффекта Джозефсона необходимо точно определить значение h/e .

И, наконец, третья проблема — использование отношения удельного заряда электрона для установления по скорости движения электронов размера вольта.

В заключение вновь подчеркнем, что проблему констант следует рассматривать в двух аспектах: первый аспект — чисто физический, второй — метрологический. По-видимому, правильно, что именно метрология внедряется в эту область, потому что и для физики никто не может определить значение констант точнее, чем метрологи, которые имеют дело с самыми точными измерениями, основанными на эталонах.

Поступила в редакцию

26/11 1969 г.

СОВРЕМЕННАЯ МЕТРОЛОГИЯ И ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ

Известно, что все физические величины могут быть выражены друг через друга и для описания всех физических явлений требуется очень малое число основных единиц. Для описания геометрии необходимы единицы длины и времени, для описания динамических процессов к ним нужно добавить единицы массы, энергии или силы, а для описания электродинамики необходима какая-либо электрическая единица, например, ампер.

В современной метрологии применяют атомные эталоны ввиду удобства их использования и большей точности получаемых результатов. Наиболее характерным является использование частот переходов между энергетическими подуровнями в атомах для создания эталонов частоты. Относительная погрешность таких методов $1 \cdot 10^{-11}$, и они исключительно удобны для использования ввиду их простоты.

Современные электронные методы сличения частот значительно отличаются от методов, которые существовали два — три десятилетия назад, когда основным эталоном времени являлась продолжительность вращения Земли вокруг своей оси.

Атомные эталоны длины не так просты и удобны, как эталоны частоты, тем не менее их использование представляет собой значительный прогресс в деле развития эталонов.

В настоящее время мы можем использовать для измерения длины газовые лазеры или излучение какой-нибудь из разновидностей многочисленных газоразрядных ламп, характеризующееся очень ярко выраженными узкими спектральными линиями. И если точно следовать условиям их эксплуатации, то можно снизить относительную погрешность измерения длины волны до $1 \cdot 10^{-6}$, которая соответствует требованиям международных соглашений.

Необходимо отметить два преимущества использования атомных эталонов. Одно из них заключается в том, что на атом-

ные явления настолько мало влияют внешние условия, что эталоны, созданные на их основе, будут с высокой точностью идентичны в любой лаборатории.

Вторым преимуществом является то, что метод сличения частот удобен и довольно прост. Столь же прост и интерференционный метод. Оба эти метода могут быть применены при использовании атомных эталонов.

В настоящее время эталоны частоты достигли высокой точности, в то же время эталоны длины не обладают столь высокой точностью. В связи с этим возникло предположение, что можно создать общий эталон для воспроизведения единиц времени и длины, приняв за скорость света какую-то произвольную величину.

Такое значение скорости света было принято Международным союзом по геодезии и геофизике, Международным астрономическим союзом, Комитетом по космическим исследованиям и Международным радиосоюзом на основе работ доктора Фрума.

В некоторых областях, например, в астрономии и в геодезии, расстояния определяют методом измерения времени, необходимого для прохождения световым лучом определенного расстояния.

В настоящее время определение расстояния с помощью метода измерения времени прохождения его лучом пригодно для расстояния в несколько метров. Для того чтобы измерять меньшие расстояния, необходимо применять модуляцию луча частотами, близкими к частотам инфракрасного излучения. Мы не сможем обойтись без материального эталона длины до тех пор, пока не достигнем точности в этих методах и не сможем измерять длину с той же точностью, что и частоту.

Национальная физическая лаборатория работает в трех областях. Одним из направлений является изучение возможности применения водородного лазера в качестве эталона частоты.

С этой целью производится изучение причин, влияющих на стабильность его работы.

Следующим направлением является разработка методов измерения частот инфракрасного излучения. Кроме того, мы рассчитываем достигнуть точности измерения скорости света порядка 10^{-6} .

В области электрических измерений все еще господствует вид оборудования, преобладавший в XIX веке, включая систему сопротивлений катушек, и все оборудование имеет вид, который бы легко узнал лорд Релей.

Очень хорошо, если бы нам удалось за основу электрических измерений взять атомные явления. Из квантовой механики известно, что разность энергии двух состояний квантовомеханической системы равняется излучаемой или поглощаемой

частоте, умноженной на постоянную Планка. Если мы сможем связать разность энергий между двумя состояниями квантовой системы с каким-либо электрическим явлением и измерить частоту перехода между двумя этими состояниями, то соответствующую электрическую единицу можно выразить через частоту и постоянную Планка.

Второе явление, которое используется для определения частоты, представляет эффект Джозефсона, о котором уже говорил доктор Горбачевич.

Энергия пары электронов, проходящих через два сверхпроводника, разделенных тонким слоем диэлектрика или металлом, не переходящим в сверхпроводящее состояние, выражается как произведение двух зарядов электронов на напряжение и равняется произведению постоянной Планка на частоту.

Одним из моих коллег были отмечены ступенчатое изменение тока, когда к узлу Джозефсона прикладывали переменное поле СВЧ.

Измерение малых напряжений порядка 1 мВ с высокой точностью представляет собой трудную задачу, и изучение этого вопроса продолжается сейчас в НФЛ.

Одной из основных единиц, на мой взгляд, является единица времени, поскольку время и частота отражают основное свойство квантовой механики — ее эволюцию. Временная шкала, которую мы получаем, используя цезиевый или иной эталон частоты, является однородной.

В современной метрологии фундаментальные физические константы занимают ключевые позиции. Они позволяют существующие эталоны совместить с новыми, основанными на атомных явлениях, так же как мы совместили старое определение метра с новым его определением в длинах световых волн.

Кроме того, я хотел бы заметить, что любая лаборатория, занимающаяся основополагающими измерениями, должна заниматься также и фундаментальными постоянными. Приведу некоторые примеры из деятельности Национальной физической лаборатории.

В НФЛ проводятся работы по определению гиромагнитного отношения протона, а также отношения постоянной Планка к двойному заряду электрона.

Эксперимент по определению отношения заряда к массе протона, как и определение магнитного момента протона в ядерных магнетонах, был недавно завершен и в дальнейшем будет продолжен при работах в более сильных полях.

Особенно важной величиной, как уже указал доктор Горбачевич, является постоянная тонкой структуры, когда мы сейчас уже знаем отношение постоянной Планка к заряду электрона, которая определяется на основе эффектов Джозефсона.

Следующей важной константой является число Авогадро, которое мы собираемся измерять совместно с сотрудниками Бри-

стольского университета с помощью нового оптико-рентгеновского интерферометра, разработанного Хартон и Бондом.

Межрешеточные расстояния в кристаллах можно измерять с помощью такого интерферометра. Измерение межрешеточных расстояний и плотности кристалла даст возможность найти число Авогадро.

В заключение необходимо упомянуть о работе над новым определением скорости света, которая будет проводиться на основе исследований доктора Фрума при измерении расстояний порядка нескольких сотен метров.

75 лет тому назад, в то время, когда был образован ВНИИМ, доктор Майкельсон работал в Международном бюро мер и весов над определением длины волны — красной линии излучения кадмия. Это было всего лишь через несколько лет после утверждения нового эталона метра в виде штриховой меры. В то время еще никто не мог подозревать, к каким последствиям приведет эта работа.

Результаты исследования Майкельсона начали ощущаться по-настоящему только сейчас. Я думаю, что 75-я годовщина существования института и 50-летие метрической системы являются очень важным моментом в истории развития метрологии.

Поступила в редакцию

18/III 1960 г.

МЕТРОЛОГИЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Большинство эталонов, которыми пользуются сейчас в метрологии, создано руками человека. Эти эталоны — уникальные предметы и устройства, охраняемые особенно тщательно, — служат для воспроизведения единиц физических величин (массы, длины и т. д.). Использование эталонов имеет ряд недостатков: они могут быть утрачены или повреждены; они могут изменяться и разрушаться с течением времени; существование уникального эталона вызывает трудности в воспроизведении единиц физических величин в различных точках земного шара. Все это приводит к мысли о целесообразности, по мере возможности, перехода к естественным эталонам. Первый шаг в этом направлении был сделан, когда было решено использовать в качестве первичного эталона единицы длины — длину волны оранжевой линии ^{86}Kr .

В дальнейшем речь будет идти об относительно отдаленной перспективе — о возможности и желательности перехода в будущем к ядерным эталонам физических величин.

Попытаемся обосновать утверждение, что атомные ядра являются эталонами, созданными самой природой, и притом эталонами единиц не какой-нибудь одной физической величины, а сразу многих — каждое атомное ядро является собранием эталонов.

Основные требования, которые предъявляются ко всякому эталону — это возможность воспроизведения, неизменность во времени и относительное постоянство при изменении внешних условий — температуры, давления и т. д. Природа, создавая атомные ядра, как бы специально позаботилась об удовлетворении этих требований.

Проблема воспроизведения отпадает, если существует много одинаковых эталонов. Но эталоны, созданные руками человека, не бывают полностью идентичными, как бы хорошо они ни были

сделаны; приходится один из них считать главным, а другие все время сравнивать с ним. Однако в микромире, в среде атомов, электронов и ядер, идентичность объектов приобретает совсем иной — более принципиальный смысл. Мы считаем принципиально неразличимыми два электрона, два атома или два ядра одного и того же вещества. При этом мы опираемся не только на прямые экспериментальные факты, доказывающие такую неразличимость, такие как, например, рассеяние электронов на электронах или α -частиц на ядрах гелия, как экспериментальные следствия принципа Паули и т. д., но и на более широкую совокупность сведений об устройстве микромира. Мы не знаем сейчас ни экспериментальных, ни теоретических причин, по которым мог бы быть нарушен этот принцип.

Мы считаем, что два атома или два ядра, изолированных или удаленных от внешних полей, имеют строго одинаковые массы, заряды, моменты инерции и магнитные дипольные моменты, электрические квадрупольные моменты и еще более высокие моменты. Таким образом, вопрос с воспроизводимости полностью отпадает, если пользоваться эталонами из микромира.

Второе требование — постоянство во времени. Поскольку атомы и ядра — квантовые системы, то речь идет о том, сохраняются ли во времени квантовые законы и постоянные h , e , m , c .

Мы думаем, что и то и другое сохраняется. Но знаем ли мы это? В какой-то мере мы это знаем. Неизменность квантовых законов и констант на протяжении сотен тысяч лет можно доказать с хорошей точностью: достаточно сравнить оптические спектры земных источников и далеких звезд, свет от которых приходит к нам через сотни тысяч лет. Структура этих спектров, если исключить красное смещение линий, одинакова.

С меньшей точностью, но все же можно доказать постоянство некоторых констант и на интервале $\sim 10^9$ лет. Возрасты различных минералов, находящихся на земле, определяются радиоактивными методами — по накоплению аргона из ^{40}K , стронция из ^{87}Rb , Ra из V и т. д. При определении возраста приходится пользоваться экспоненциальным законом радиоактивного распада. Наблюдающиеся сейчас периоды распада исходных веществ сильно отличаются (от $7 \cdot 10^8$ до $6 \cdot 10^{10}$ лет), но результаты определения возрастов сходятся. Это означает, что константы распада этих веществ — действительно константы на протяжении 10^9 — 10^{10} лет. А так как ядра — это квантовые системы, то в указанном факте можно видеть подтверждение неизменности квантовых законов и констант.

Третье требование к эталонам: они должны быть мало чувствительными к внешним воздействиям. Чтобы ослабить эти воздействия, наши обычные эталоны запирают в сейфы, прячут их в подвалы. Но именно то же самое сделала природа с атомными ядрами — она снабдила их зарядами и окружила электронными

оболочками, которые в значительной степени защищают их от внешних воздействий.

Электрический заряд ядра и электронная оболочка атома предохраняют ядра от столкновений или взаимодействий между собой; они практически исключают воздействия на ядра температуры, давления или междуатомных столкновений.

Электронная оболочка частично, в небольшой степени, охраняет ядра от электромагнитных полей. Вспомним правило Ленца: электромагнитная система при воздействии на нее электрических или магнитных полей перестраивается так, чтобы ослабить эти поля (поляризация ослабляет электрические поля, токи ослабляют магнитные поля). Внешние поля ослабляются, но не ликвидируются полностью. Однако искусственно создаваемые электрические и магнитные поля недостаточны для того, чтобы заметно изменить внутренние состояния ядер.

Внутри вещества, вблизи движущихся зарядов, существуют сильные неоднородные электрические и магнитные поля; они оказывают заметные воздействия на электронные оболочки. Но ядра избегают этого воздействия, так как обладают малыми линейными размерами. Вследствие этого даже поля с очень большими градиентами не могут сильно воздействовать на ядра.

Экранировка и малые размеры предохраняют ядра от внешних воздействий, но еще большую роль играет абсолютная величина той энергии, которая необходима, чтобы произвести изменения во внутренней структуре ядра, — она порядка мегэлектронвольт. Для сравнения напомним, что для атомов эта энергия составляет электронвольт, т. е., грубо говоря, в миллион раз меньше.

Итак, резюмируем: ядра представляются нам очень подходящими объектами для новых эталонов.

Для каких же физических величин можно использовать ядра в качестве естественных, природных эталонов?

В принципе эталонами могут служить масса ядра M и его заряд Ze . Однако мы не можем сейчас пользоваться массой и зарядом ядер в качестве эталонов потому, что не умеем определять достаточно точно эти величины в наших обычных единицах — в граммах и кулонах.

При измерениях массы возникла следующая ситуация. Сравнить две обычные массы можно с относительной погрешностью $2 \cdot 10^{-9}$, сравнить массы двух атомов можно с погрешностью $5 \cdot 10^{-8}$, но связать эти измерения и выразить массы атомов в граммах можно только с погрешностью $\sim 10^{-5}$, т. е. в несколько сот раз большей. Очевидно, что вопрос о ядерном эталоне массы может возникнуть только в отдаленном будущем.

Еще своеобразнее положение с зарядами. В макромире измерение заряда имеет такой же обычный смысл, как измерение тока; в микромире заряд — это счетное количество элементарных зарядов. Таким образом, измерение заряда сводится

к подсчету числа зарядов и выражению элементарного заряда через единицы микромира. Относительная погрешность при определении заряда электрона или протона пока составляет $4 \cdot 10^{-5}$, т. е. больше погрешности сравнений электрических величин в макромире ($\sim 10^{-5}$). Поэтому вопрос о переходе к естественному эталону заряда пока не возникает.

Ядерный эталон магнитного дипольного момента нужен, во-первых, для измерения аналогичных величин в микромире и, во-вторых, для практического измерения одной из важнейших величин макромира — напряженности магнитного поля. В качестве такого эталона естественно попытаться использовать магнитный момент протона μ_p — один из самых больших ядерных магнитных моментов.

В настоящее время магнитный момент протона определяют следующим образом.

Твердое или жидкое тело, в состав которого входят протоны, помещают во внешнее магнитное поле H ; при этом больше протонов ориентировано вдоль поля H , чем против него. Протоны облучают радиоволнами с частотой ν . При выполнении условия $h\nu = 2\mu_p H$ наступает протонный резонанс; протоны могут изменить свою ориентацию относительно поля H . При резонансе наблюдается ряд физических явлений: система поглощает энергию, возникают индукционные поля и т. д. Для определения μ_p нужно измерить частоту и поле H и знать h . В настоящее время магнитный момент протона, выраженный в ядерных магнетонах (яд. магн. = $\frac{he}{4\pi M_p c}$), известен с высокой степенью точности [1]:

$$\mu_p = 2,79277 \pm 0,00005 \text{ яд. магн. } \left(\frac{\Delta\mu_p}{\mu_p} = 1,8 \cdot 10^{-5} \right).$$

Однако значительно менее точно известен магнитный момент μ_p в абсолютных единицах:

$$\mu_p = (1,41049 \pm 0,00013) \cdot 10^{-23} \text{ эрг} \cdot \text{гс}^{-1} (9 \cdot 10^{-5}).$$

Увеличение погрешности связано с недостаточным знанием величин h , e , c , M_p .

При определении μ_p нужно знать магнитное поле в том месте, где находится протон. На внешнее поле H^* накладываются переменные поля от электронного окружения, от соседних атомов или молекул; в результате резонанс оказывается недостаточно острым и это снижает точность измерений. Представим себе, что каким-то способом помехи устранены или сильно ослаблены (например, протоны находятся в газе H_2), тогда точность определения μ_p будет зависеть только от точности определения H и h (частоту ν измеряют точнее — с относительной погрешностью 10^{-10}). Наиболее точно определяют H сейчас, рассчитывая поля в катушках при заданном токе I , а ток I

определяют при помощи ампер-весов. Известно, что это очень сложные устройства. Как только, в результате уникального измерения, μ_p будет определен с максимально осуществимой сейчас точностью, можно будет принять его в качестве естественного эталона и в дальнейшем относительно просто измерять поля H по μ_p и $h\nu$.

Возможно, что в дальнейшем будут применять метод воспроизведения абсолютной величины ампера по μ_p и $h\nu$ [2]. Однако сейчас необходимые точности еще не достигнуты: μ_p известен с погрешностью $9 \cdot 10^{-5}$, а силу тока при помощи ампер-весов измеряют с погрешностью $\sim 10^{-5}$.

Ситуация здесь приблизительно такая же, как с метром и криптоновой линией. Как только точность сравнения метра и криптоновой линии достигла точности сравнения метра и других линейных мер, было признано полезным считать первичным эталоном длины криптоновую линию.

Помимо этого метрологического аспекта использования μ_p существуют и иные.

1. Уже сейчас протонный резонанс служит основой для относительно простых, но все же точных измерений магнитных полей. При этом, однако, не удается достигнуть той точности, с которой сейчас известен магнитный момент μ_p . Этот недостаток связан с применением в качестве носителя протонов воды или других веществ: внутренние поля этих веществ «размывают» внешнее поле H .

2. Внутренние поля не только «размывают» резонанс, но и слегка смещают его частоту. Яркий пример такого смещения был найден [3] в молекуле этилового спирта $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{OH}$. Протоны, находящиеся в трех частях молекулы, имеют разное окружение, и резонансные частоты для них отличаются на $5 \cdot 10^{-4}\%$.

Смещение резонанса открыло дорогу новому методу изучения структуры молекул и кристаллов, и сейчас этот метод широко применяют в лабораториях.

3. Используя для измерения магнитного поля датчики столь малого размера, как атомные ядра, можно измерять магнитные поля, существующие внутри атомов. Если внедрить ядра ^{182}W в решетку Fe, Co или Ni, то уровень 2^+^{182}W в магнитном поле расщепится и переход $2^+ \rightarrow 0^+$ будет состоять из нескольких компонентов. Расщепление удастся измерить при помощи эффекта Мёссбауэра; определив предварительно магнитный момент этого состояния, можно затем определять магнитные поля в решетках. Так, например, было найдено, что в месте расположения W эффективное магнитное поле равно -715 кГс, в Fe, $+360$ кГс в Co и $+90$ кГс в Ni. Любопытно, что большие магнитные поля обнаружены внутри атомов редких земель.

4. Наличие внутримолекулярных полей не мешает сравнению магнитных моментов изотопов, если использовать молекулы и

кристаллы, в которых одинаково все, кроме сравниваемых изотопов; измеряют только отношение резонансных частот ν . В результате отношение μ_d/μ_p удается измерить с еще большей точностью, чем μ_p и μ_d в отдельности [4]:

$$\frac{\mu_d}{\mu_p} = 0,307\,012\,192 \pm 0,000\,015(5 \cdot 10^{-8}).$$

Большинство атомных ядер обладает электрическим квадрупольным моментом; он существует почти у всякой системы частиц, если распределение зарядов отличается от сферически симметричного.

Ядра содержат дискретные электрические заряды — протоны и нейтральные частицы — нейтроны; сферической симметрии при этом быть не может, и квадрупольные моменты ядер всегда не равны нулю. Даже у дейтона, содержащего всего один протон и один нейтрон, есть небольшой квадрупольный момент [5]:

$$q_d = (+0,002\,796\,5 \pm 0,000\,000\,5) b,$$

где b — бари = 10^{-24} см².

Форма других ядер значительно сильнее отличается от сферической, и квадрупольный момент значительно больше. Так, например, $q(^{170}\text{Lu}) = 8,1 \pm 0,2 b$ [16] (это, по-видимому, самый большой ядерный квадрупольный момент).

Измерение квадрупольных моментов ядер — очень трудная задача, и погрешности очень велики; самое точное значение — это приведенное выше для дейтона, несмотря на малость абсолютной величины q_d .

Знание величины q_d (или любого другого квадрупольного момента) может быть использовано, во-первых, для определения аналогичных величин, т. е. квадрупольных моментов других ядер. Но есть и вторая, может быть более интересная, перспектива использования «квадрупольного» эталона.

Квадрупольный момент не реагирует на электрическое поле, а только на его градиент. Уровни ядра в неоднородном поле расщепляются, и расщепление Δ пропорционально $eq \frac{dE}{dx}$.

Таким образом, если измерить расщепление Δ и знать q , то можно определить градиент электрического поля в том месте, где находится ядро. Разумеется, здесь речь идет не о малых градиентах электрического поля, которые встречаются нам в микромире и относительно просто измеряются, а об огромных градиентах электрического поля, встречающихся вблизи элементарных зарядов.

В атоме водорода электрон находится на расстоянии $0,53 \text{ \AA}$ от протона. В том месте, где он находится, градиент электрического поля протона равен

$$2 \frac{e}{R^3} = \frac{2 \cdot 4,80 \cdot 10^{-10} \cdot 300}{(0,53 \cdot 10^{-8})^3} = \sim 2 \cdot 10^{18} \text{ в/см}^2.$$

Приблизительно такие градиенты электрического поля существуют в мире атомов и молекул, в частности в местах, где расположены ядра; они создаются электронными оболочками атома, соседними атомами в молекуле и соседними атомами или ионами в кристаллических решетках. До последних лет не было надежного способа измерения этих градиентов. Очевидно, что измерительный инструмент должен быть достаточно малым, чтобы на его длине градиент не изменялся; следовательно, измерительным инструментом могут быть только атомные ядра. Даже при столь больших градиентах поля и самых больших квадрупольных моментах ядра расщепление Δ уровней ядра очень мало. Его нельзя заметить с помощью обычных методов ядерной спектроскопии, но это стало возможно после открытия эффекта Мёссбауэра, о котором речь будет дальше. Немногочисленные опыты действительно обнаружили градиенты электрического поля $\sim 10^{18}$ в/см². Так, например, в различных соединениях W градиенты поля в месте нахождения ядра W оказались весьма различными [7—9]: от $-1,86 \cdot 10^{18}$ в/см² в WS₂ до $+1,54 \cdot 10^{18}$ в/см² в WO₃; даже знак градиента оказался различным.

Другое применение ядерных квадрупольных эталонов найдено в области измерения температур. При колебаниях атомов в молекуле ядра перемещаются внутри нее и проходят через места с разными градиентами электрического поля; вместо статической величины dE/dx возникает динамическая $\overline{dE/dx}$, зависящая от амплитуды молекулярных колебаний, т. е. от температуры объекта.

Если облучать молекулы радиоволнами, то при частоте

$$\nu = \frac{e}{2h} q \frac{dE}{dx}$$

должен наступить квадрупольный резонанс; объект начнет поглощать энергию. Зависимость ν от температуры является основой действия «ядерного квадрупольного термометра» [10], отличающегося широким диапазоном измеряемых температур (от 10 до 450° K) и высокой точностью ($\pm 0,001^\circ$ K).

Поскольку q является эталонной величиной, то приведенная выше формула может служить для определения $\overline{dE/dx}$ в разных условиях, т. е. для точных исследований в области физики твердых тел.

Рассмотрим теперь вопрос о монохроматичности ядерных излучений.

При выборе оптического эталона длины — длины волны красной линии кадмия или оранжевой криптоновой линии — вопрос о монохроматичности излучения играл решающую роль. Монохроматичность линии зависит от условий в источнике излучения и от естественной ширины спектральной линии. Отвлечемся

пока от аппаратурных условий; тогда останется только естественная ширина линии, которая определяется временами жизни состояний, между которыми происходит переход. Согласно соотношению неопределенностей

$$\delta(h\nu) \cdot \delta T \approx h,$$

откуда

$$\delta(h\nu) = \frac{6,6 \cdot 10^{-16}}{T_{\text{сек}}} \text{ эв.} \quad (1)$$

Для оптических переходов $T \sim 10^{-8}$ сек и, следовательно, $\delta(h\nu) = 10^{-7}$ эв. Так как энергия оптических квантов составляет доли электронвольта, то ясно, что относительная естественная ширина спектральной линии составляет приблизительно 10^{-6} — 10^{-7} . Только используя переходы с более долгоживущих уровней, можно достичь меньших значений $\delta(h\nu)/h\nu$.

Как же обстоит дело с ядерными излучениями? Являются ли они более перспективными?

Принцип неопределенности и формула для $\delta(h\nu)$ одинаково справедливы и для атома и для ядра. Но у атома время жизни 10^{-8} сек получается при энергии возбуждения порядка электронвольта, а у ядер — порядка 100 кэв.

Очевидно, что если по абсолютной величине $\delta(h\nu)$ одинаково, то относительная величина естественной ширины линии $\delta(h\nu)/h\nu$ в сотни тысяч раз меньше у ядра, чем у атома.

Может возникнуть вопрос: в чем физическая причина такого преимущества ядер?

Ответ кажется на первый взгляд неожиданным: ядра медленнее излучают. Причина заключается в малых линейных размерах ядер. Вероятность электрического дипольного излучения пропорциональна $e^2 x^2$, а электрического квадрупольного излучения пропорциональна $e^2 x^4$, где x — размеры излучающей системы. У ядерных протонов и атомных электронов величины e^2 одинаковы, но размеры систем отличаются очень сильно: $x \approx 10^{-12}$ см у ядер и $\sim 10^{-8}$ см у атомов. Уже отсюда возникает несколько порядков величины; различие еще больше усиливается из-за того, что в атоме большинство переходов — дипольные, а в ядрах — квадрупольные (вероятность электрических дипольных переходов в ядрах из-за отсутствия зарядов разных знаков значительно ослаблена); квадрупольные же переходы — более медленные. В том, что ядра при равной энергии и мультипольности излучают медленнее, чем атомы, нетрудно убедиться непосредственно по экспериментальным данным; ядерные излучения приходится сравнивать с рентгеновской К-серией, так как только здесь есть приблизительно равные энергии излучения.

Рассмотрим таблицу, в которой приведены:

1) непосредственно измеренное по запаздыванию в α - γ совпадениях время жизни уровня 84 кэв в ядре ^{231}Pa ; переход $\frac{5^+}{2} \rightarrow \frac{3^-}{2}$ типа E1;

2) косвенно определенное время жизни для атома Вi с вакансией на K-оболочке.

Время жизни, соответствующее переходам типа E1

Излучатель	Энергия $h\nu$, кэв	$T_{1/2}$, сек
Ядро $^{231}_{91}\text{Pa}$	84	$(4.1 \pm 0.4) \cdot 10^{-8}$
Атом $^{212}_{83}\text{Bi}$	75	$1.2 \cdot 10^{-17}$

Времена жизни различаются на 10 порядков

Состояние, в котором на K-оболочке имеется только один электрон, — неустойчивое и имеет значительную энергетическую ширину, соответствующую быстрому переходу электрона с L-оболочки. Конверсия любого ядерного возбужденного состояния на K-оболочке атома создает «дырку» в этой оболочке, поэтому указанная энергетическая ширина «дырочного» состояния приводит к расширению всех наблюдающихся K-конверсионных линий. Линдстрем [11], по-видимому, первый наблюдал это явление. Латышев и др. [12] измерили расширение K-линии перехода с энергией 239 кэв в ^{212}Bi и определили, что естественная ширина K-уровня Вi с одной дыркой составляет 54 эв. Это соответствует (по соотношению неопределенностей) указанному в таблице времени жизни $\sim 1.2 \cdot 10^{-17}$ сек. Энергия рентгеновского перехода L — K приблизительно 75 кэв, переход типа E1. Различие во временах жизни составляет около 10 порядков при одинаковой мультипольности переходов и близости энергий и величин Z.

Резюмируем: ядерные излучения при равных условиях более монохроматичны, чем атомные.

Прежде чем использовать это положение, необходимо:

1) избегать искажения монохроматичности линии «в процессе производства», т. е. создать необходимые условия в момент излучения;

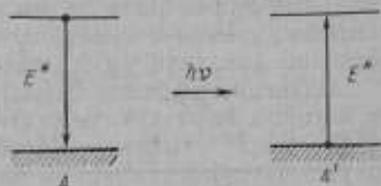
2) создать детектор, который мог бы чувствовать и использовать малую ширину спектральной линии.

Обе задачи не простые. Изложенные выше соображения можно было сформулировать и 10 лет назад, но тогда нельзя было указать путь для решения поставленных задач. Положение резко изменилось, когда в 1958 г. был открыт хорошо известный теперь эффект Мёссбауэра.

В основе этого эффекта лежит возможность использования в качестве детектора излучения таких же ядер, как излучающие. На первый взгляд это невозможно (см. рисунок).

Если ядро A имеет энергию возбуждения E^* и массу M , то излученный им квант будет иметь энергию, меньшую E^* , так как часть энергии уходит на отдачу — придание скорости оставшемуся ядру A :

$$h\nu' = E^* - \frac{E^{*2}}{2Mc^2}. \quad (2)$$



Дефицит в энергии, равный $E^{*2}/2Mc^2$, препятствует возбуждению ядра A' γ -квантом, вышедшим из такого же ядра A .

Чтобы возбудить ядро A' , точно такое же, как A , недостаточной энергии $h\nu$ и даже энергии E^* ; квант $h\nu$ несет импульс, захватившее квант ядро должно двигаться, и на придание ему скорости тоже нужна энергия. В результате для возбуждения ядра A' нужна энергия кванта:

$$h\nu' = E^* + \frac{E^{*2}}{2Mc^2}.$$

Очевидно, что $h\nu' > h\nu$, и разность $h\nu' - h\nu = \frac{E^{*2}}{Mc^2}$ препятствует возбуждению ядра A' излучением ядра A .

Все изложенное верно для свободных ядер. Если же ядро входит в состав твердого тела, то положение резко меняется: если атом очень жестко связан с кристаллической решеткой, то в значительной доле случаев отдачу при излучении воспримет не одно ядро A , а микрокристаллик, в состав которого входит это ядро. Это означает, что M в формуле (2) будет означать уже не массу ядра, а массу кристаллика, который содержит миллионы таких ядер. Следовательно, если ядра жестко связаны с решеткой, то $h\nu' \cong h\nu$, и ядра A' могут быть хорошими детекторами излучения ядер A .

В этих условиях оказывается существенной узость спектральной линии $h\nu$. Достаточно каким-нибудь способом чуть-чуть изменить энергию квантов $h\nu$: чуть-чуть сместить спектральную линию, как нарушится равенство $h\nu = h\nu'$, и ядра A' перестанут поглощать кванты, испускаемые ядрами A . Это изменение величины $h\nu$ может быть ничтожным: можно медленно двигать вещество, содержащее ядра A , по направлению к ядрам A' или от них, и поглощение квантов в ядрах A' резко изменится из-за эффекта Доплера, так как для движущегося источника

$$h\nu_s = h\nu \left(1 \pm \frac{v}{c}\right).$$

Скорость движения v может быть очень малой, например, ~ 1 см/сек, т. е. меньше скорости света в $3 \cdot 10^{10}$ раз, но и этого оказывается достаточно для изменения поглощения, если относительная ширина спектральной линии меньше 10^{-10} .

Разумеется, если бы естественная ширина ядерных спектральных линий была большой, этого эффекта не наблюдали бы. Поэтому опыты с медленным движением γ -препарата непосредственно доказали узость ядерных спектральных линий.

Изучение эффекта Мёссбауэра позволило выявить условия, в которых ядра крепче связываются с решеткой или окружающей средой. Эффекту Мёссбауэра посвящены тысячи работ, в разных областях науки для него найдено широкое применение: от общей теории относительности — до метрологии включительно.

Где же лежит предел возможностей эффекта Мёссбауэра, какие спектральные линии должны быть наиболее узкими?

Мы не можем сейчас ответить на этот вопрос, можно только указать на наиболее узкую из найденных на опыте ядерных спектральных линий.

Из формулы (1) видно, что $\delta(h\nu)$ тем меньше, чем больше время жизни уровня T .

Чтобы поставить рекорд малости $\delta(h\nu)$, желательно выбрать излучатель с возможно большим T ; но вероятность излучения пропорциональна $(h\nu)^{2L+1}$, где L — мультипольность. Поскольку $L \geq 1$, то T пропорционально $(h\nu)^{-3}$ или еще более высокой степени $(h\nu)^{-1}$. Следовательно, нужно выбирать ядерные излучатели с малой энергией излучения. Однако на этом пути возникает дополнительная трудность — ядерное излучение сильно конвертирует на электронных оболочках, и только малая доля ядер разряжается путем излучения квантов.

Рекорд малости $\delta(h\nu)$, насколько мне известно, поставлен московскими физиками: Бурговым и др. [13], которые наблюдали эффект Мёссбауэра на изомере ^{107}Ag с $T_{1/2} = 44$ сек.

Соответствующая величина $\delta(h\nu)$ по формуле (1):

$$\delta(h\nu) = 1,0 \cdot 10^{-17} \text{ эв.}$$

Она настолько мала, что о применении эффекта Доплера не может быть и речи: источник пришлось бы двигать со скоростью 0,1 мкм в год. Существует, однако, другой метод наблюдения эффекта Мёссбауэра, связанный с измерением сечения резонансного рассеяния γ -лучей. Измерения этим методом показали, что эффективная ширина линии очень мала, но все же в $7,5 \cdot 10^5$ раз превосходит вычисленную выше естественную ширину $\delta(h\nu)$. Таким образом,

$$\delta(h\nu)_{\text{исп}} = 8 \cdot 10^{-12} \text{ эв,}$$

$$\frac{\delta(h\nu)_{\text{исп}}}{h\nu} = 9 \cdot 10^{-17}.$$

и это значение $\delta(h\nu)_{\text{исч}}/h\nu$ является рекордно малым. Оно означает, что энергию перехода в ^{107}Ag когда-нибудь будут записывать так:

$$h\nu = 93,511\ 111\ 111\ 111\ 111 \pm 0,000\ 000\ 000\ 000\ 008 \text{ кэВ.}$$

Первые три цифры, т. е. 93,5, мы действительно знаем; все остальные — единицы — стоят на месте тех значащих цифр, которые еще предстоит определить нашим потомкам.

Мы не знаем сейчас причины, по которым эффективная ширина превосходит естественную. Но если не будем пытаться превосходить будущее и ограничимся наблюдаемой шириной линии, то все же увидим, что постоянство частоты, заключающееся в экспериментально найденном числе $9 \cdot 10^{-17}$, соответствует погрешности в 10 сек за $3 \cdot 10^9$ лет, т. е. за все время существования нашей планеты, или погрешности в 10 А при измерении диаметра нашей планеты. Фантастичность этих чисел не нуждается в комментариях.

Не знаю, удалось ли мне убедить присутствующих в том, что ядра — это эталоны будущего. Но надеюсь, что приведенные примеры убедили их в том, что изучение атомных ядер раскрывает нам удивительные тайны, приносит неожиданные плоды и создает поистине фантастические перспективы для метрологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sanders J., Turberfield K. Proc. Roy. Soc., 1963, A272, 79.
2. Bene G., Denis P., Extermann R. Helv. Phys. Acta., 1951, v. 24, p. 633; J. Phys. Rad., 1952, v. 13, p. 71.
3. Arnold J., Dharmatti S., Packard M. J. Chem. Phys., 1951, v. 19, p. 507.
4. Wimet T. Phys. Rev., 1953, v. 91, p. 499.
5. Narumi H., Watanabe T. BAPS, 1964, v. 9, p. 11.
6. Линдгрэн И. Приложение 1 к кн. «Возмущенные угловые корреляции». М., Атомиздат, 1966, стр. 367.
7. Phillips E., Qrodzins L. Perturbed angular correlations. Amsterdam, 1964, p. 294.
8. Sikaono N., Takekoshi H., Shoji T. J. Phys. Soc. Japan, 1965, v. 20, p. 271.
9. Agresti D., Kankeleit E., Person B. Phys. Rev. Lett., 1967, v. 18, p. 4A7; Phys. Rev., 1967, v. 156, p. 1342.
10. Vanier J. Metrologia, 1955, v. 1, p. 20.
11. Lindström G. Ark. Fys., 1951, v. 4, p. 1; другие ссылки см. «Бета- и гамма-спектроскопия». М., Физматгиз, 1959, стр. 101.
12. Латышев Г., Сергеев А., Крисюк Э., Острцов Л., Егоров Ю., Ширшов Н. Изв. АН СССР, сер. физич., 1956, т. 20, № 3, стр. 345.
13. Бизина Г. Е., Беда А. Г., Вугров Н. А., Давыдов А. В. Эксперименты по резонансному возбуждению ионизированного состояния Ag^{107} со средним временем жизни 63 сек. ЖЭТФ, 1963, т. 45, стр. 1408.

Поступила в редакцию

13/111 1969 г.

НЕКОТОРЫЕ СООБРАЖЕНИЯ ПО ПОВОДУ
ОСНОВНЫХ ЕДИНИЦ

Сообщения профессора Горбачевича, доктора Джелепова и профессора Кука, а также 50-летний опыт моей деятельности в качестве члена Международного комитета мер и весов в период, во время которого было изменено определение метра и секунды и введена такая новая единица, как ампер, в качестве пятой основной единицы, а также изменено определение канделы и изменены реперные точки температурной шкалы, точка затвердевания и точка кипения воды, привели меня к заключению, что работы над основными единицами далеки до завершения.

Отмечу сначала, что нас больше всего поражает огромная разница в точности создания эталонов основных единиц, составляющая от 10^{-11} , для частоты и времени, до скромной точности, определяемой $1,5 \cdot 10^{-2}$ для черного тела при температуре затвердевания платины, служащего для воспроизведения канделы. Другими словами, одни эталоны имеют точность в 100 000 раз более высокую, чем другие.

Логическим условием для определения основных единиц должны быть высокая точность эталонов, легкость их изготовления и высокая воспроизводимость.

Другим условием должно быть следующее: эталоны должны основываться на хорошо известных физических явлениях, чтобы первичный эталон не был связан с каким-либо материальным предметом.

Третьим условием должна быть гармоничность всей системы.

Очень интересно рассмотреть шесть основных единиц Международной системы (SI) в свете этих условий.

Начнем с длины. Как хорошо известно, наши предки-метрологи определили длину метра при помощи естественной длины, т. е. длины части меридиана.

Чрезвычайно точные для того времени измерения были выполнены в 1786 г. французским ученым Ла Кондамином в Перу и двумя испанскими офицерами, моими соотечественниками, Хохе Хуаном и Антонио де Уллоа, закончившими работы по определению метра. Хоже Хуан, принимавший участие в этом деле, посвятил всю свою жизнь чистой и прикладной математике и достиг в ней больших успехов. За свои работы он был избран членом-корреспондентом Санкт-Петербургской Академии наук.

Однако, когда по истечении целого века была подписана Метрическая конвенция, точность первого определения не могла удовлетворять требованиям эпохи, и поэтому естественную длину метра заменили платино-иридиевым эталоном (фетишем — по выражению метрологов Севра), который до сих пор хранится в специальном помещении Бретейльского павильона за тремя дверями, под тремя замками. Два ключа находятся у председателя Международного комитета, а третий — у генерального директора Архива Франции.

Каждый год, когда Международный комитет собирается в Севре, все члены Комитета идут и проверяют, находятся ли эталоны единиц длины и массы на месте, и чтобы иметь возможность открыть двери, вызывают генерального директора Архива.

Бывали случаи, свидетелем которых был и я, когда, следуя традиции, целый кортеж, состоящий из 18 членов Комитета, возглавляемый директором и заместителем директора Бюро, направлялся проверить, что эталон действительно находится на месте, но для этого приходилось открывать двери при помощи ломика, ибо замки настолько заржавели, что в них невозможно было повернуть ключ.

Определение основной единицы по предмету, который хранится под тремя замками, не может рассматриваться как научный метод. Как уже упомянул профессор Кук, начиная с 1893 г., Михельсон, Фабри и Бенуа в Севре, Кестерс и Энгельгард в Берлине, а также профессор Романова во ВНИИМ и Метгертс в Вашингтоне сделали много, чтобы изменить подобное положение, отнеся наши основные единицы к естественным явлениям, например длине волны.

Как теперь хорошо известно, работы в этой области были очень удачно завершены: в 1960 г. было принято новое определение метра на основании длины волны в вакууме при температуре тройной точки азота оранжевой линии криптона-86. При этом возникла очень сложная проблема в выборе излучения. Предлагали три вида излучения: кадмия-114, ртути-198 и криптона-86. Отдавая должное г. Терьеу, который в то время был помощником директора Международного бюро мер и весов, следует указать, что он выполнил чрезвычайно сложные и точные исследования и доказал преимущества излучения

криптона-86. Он сделал это с таким успехом, что Консультативный комитет по определению метра единогласно решил рекомендовать XI Генеральной конференции по мерам и весам принять новое определение метра. Таким образом, метр был привязан к естественному явлению и вместе с тем была увеличена точность его до 10^{-8} , что хорошо отвечает требованиям современной промышленности.

Сличения старого и нового эталонов были проведены в Севре на интерференционном компараторе с фотоэлектрическим микроскопом, который после некоторого усовершенствования приобрел качества, необходимые для этих сличений.

Что касается измерений массы, то здесь мы находимся в гораздо худшем положении, так как вынуждены прибегать к эталону, хранящемуся под тремя замками. Определение килограмма как массы кубического дециметра воды при 4°C было отменено, так как точность была недостаточна, в частности из-за влияния различного изотопического состава воды, и кроме того, такой жидкий эталон был неудобен.

После перехода от астрономической секунды к секунде, основанной на резонансной частоте двух уровней атома цезия-133, одобренного XIII Генеральной конференцией в октябре 1967 г., у нас появился новый эталон единиц времени и частоты, полностью удовлетворяющий требованиям.

В вопросе о температуре или разности температур речь идет, конечно, не об эталоне единицы, а о шкале температур. Как показано вначале, температура основных точек шкалы была измерена исходя из произвольно принятого значения $273,16\text{ K}$ для интервала между абсолютным нулем, недостижимым экспериментально, и температурой тройной точки воды. Но какой воды, какого изотопического состава? Если точность измерений в интервале часто встречающихся температур достаточна, то положение ухудшается в области температур, близких к абсолютному нулю, или же температур выше 400°C . Положение далеко не удовлетворительное, хотя совсем недавно были достигнуты определенные успехи в технологии.

Перейдем теперь к амперу. Его определение, в котором говорится о проволоке очень малого сечения и бесконечной длины, наводит на мысль о том, что никогда не может быть построен действительный эталон ампера. По этой и по многим другим причинам электрические величины не могут быть определены, как например, магнитная проницаемость вакуума. Международный комитет мер и весов во время заседания перед X Генеральной конференцией по мерам и весам решил не представлять резолюции, которая вводила бы ампер в качестве пятой единицы.

Мы не можем не считаться с национальным честолюбием некоторых делегатов, как, например, французского делегата, бывшего директора Бюро, который произнес пламенную речь,

превозносятся научные достижения своей страны и своего соотечественника Ампера. Главы делегаций большей части представленных стран были тронуты этой речью, и ампер был принят дипломатическим путем. Во время заседания Комитета после закрытия Конференции я протестовал против того, что Конференция, которая явилась чисто дипломатическим и политическим форумом, представила и утвердила научное решение, которое не было одобрено Международным комитетом мер и весов.

Что касается шестой единицы — канделы, я считаю решение о ней преждевременным. Привязать освещение к излучению черного тела было бы правильно, однако необходимо иметь в виду, что черное тело — это, все-таки, абстракция физики, и попытка воспроизвести его встречает практические трудности. Они приводят к расхождению результатов различных лабораторий и не дают возможности снизить погрешности далее чем до $1,5 \cdot 10^{-2}$, что является посредственной точностью, с которой мы, фотометристы, вынуждены работать в настоящее время.

В заключение я хочу сказать, что только две единицы — метр и секунда — могут нас удовлетворить в настоящее время, эти две единицы привязаны к естественным явлениям оболочки атома. Может быть, как это уже сказал доктор Желепов, для других единиц решение будет сводиться к ядерным константам, как, например, гиромангнитное отношение протона, открывающее возможности получения новых электрических мер. Вероятно, все это будет являться целой программой для наших передовых лабораторий.

Поступила в редакцию

27/II 1969 г.

РАЗВИТИЕ МЕТРОЛОГИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Первые работы, выполненные в Главной палате мер и весов в области ионизирующих излучений, относятся к 1913—1914 гг., когда в нашей стране известный ученый В. А. Бородовский приготовил первый препарат радия. После смерти в 1914 г. В. А. Бородовского все исследования в этой области прекратились, и работы в области измерения ионизирующих излучений были возобновлены в нашем институте только после Великой Октябрьской социалистической революции.

В 1918 г. в молодой Советской республике начали строить первый завод по добыче радия. Возникла необходимость точного измерения массы радия, и в Главной палате мер и весов была организована радиометрическая (она в то время называлась радиологической) лаборатория, первым руководителем которой был Л. С. Коловрат-Червинский, известный ученый, бывший сотрудник Марии Кюри-Склодовской.

С 1921 по 1940 гг. руководителем радиометрической лаборатории был профессор Л. Н. Богоявленский — также ученик Марии Кюри-Склодовской.

В связи с развитием рентгентехнической промышленности и ростом применения рентгеновского излучения в народном хозяйстве и медицине возникает ряд проблем в области метрологии рентгеновского излучения. Для разрешения этих проблем в 1924 г. по инициативе А. Н. Бойко во ВНИИМ организуется рентгенометрическая лаборатория, первым руководителем которой становится профессор С. Н. Усатый. Однако основные метрологические работы в рентгенометрической лаборатории были выполнены под руководством профессора, доктора технических наук И. В. Поройкова, который с 1927 по 1942 г. был бессменным руководителем этой лаборатории.

С момента организации рентгенометрической лаборатории до 1928 г., когда была принята единица «рентген», рекомендованная Вторым международным конгрессом рентгенологов, исследования этой лаборатории были направлены на изучение предложенных ранее единиц и приемов измерения рентгеновского излучения.

Прежде чем перейти к рассмотрению работ по созданию эталонов, уместно обратить внимание на то, как важно правильно выбрать и дать четкое определение той физической величины, которая наиболее полно характеризует специфику новой области измерений. Задача выбора и четкого определения физической величины более важна, чем задача выбора единицы измерения. Ограничусь здесь только замечанием, что нечеткое определение физической величины, единицей которой является рентген, приводило в течение 25 лет к путаницам и даже курьезам.

Период с начала работ и по 1928 г. можно условно определить как первый период развития метрологии ионизирующих излучений в нашем институте, а период с 1928 по 1941 гг. можно, также условно, назвать вообще вторым периодом развития метрологии ионизирующих излучений в Советском Союзе, ибо в то время метрологией ионизирующих излучений занимался только наш институт. Этот период характеризуется развитием работ по созданию первых эталонов ионизирующих излучений, разработкой методов и аппаратуры для передачи размера единиц приборам и источникам, применяемым в различных областях науки, техники и медицины.

В рентгенометрической лаборатории под руководством И. В. Поройкова в 1931 г. создается первый эталон единицы дозы рентгеновского излучения, генерируемого при напряжениях на рентгеновской трубке 60—200 кв. В это же время организуется сличение вновь созданного эталона с исходными установками для измерения доз рентгеновского излучения Государственного рентгенологического института в Москве (руководитель работ Я. Л. Шехтман) и Киевского рентгенологического института (руководитель работ Л. Р. Брокш). По инициативе И. В. Поройкова в 1932—1933 гг. эти установки сличаются с эталоном ВНИИМ с целью обеспечения единства измерений доз рентгеновского излучения в ведущих рентгенологических институтах нашей страны, использовавших рентгеновское излучение для лечения различных злокачественных заболеваний.

В 1934 г. во ВНИИМ был создан групповой эталон рентгена, также под руководством И. В. Поройкова. Благодаря применению группового принципа точность воспроизведения единицы рентгена во ВНИИМ совпадает с точностью воспроизведения ее в метрологических лабораториях за рубежом, а надежность воспроизведения этой единицы превосходит надежность зарубежных метрологических лабораторий.

В этот же период в радиометрической лаборатории под руководством Л. Н. Богоявленского ведутся исследования для разработки методов и измерительных средств для сличения государственного эталона радия № XI и его свидетеля № X, полученных лабораторией в 1928 г. от Института радия в Париже. Проводятся сличение этого государственного эталона радия с препаратами радия других учреждений с целью привязки их к государственному эталону радия. В частности, следует упомянуть работы по сличению государственного эталона радия с препаратами радия, находящимися в Радиевом институте Академии наук СССР.

В связи с применением препаратов радия, содержащих радиоактивные примеси мезотория, в радиометрической лаборатории были разработаны метод и измерительные средства для раздельного определения содержания в препаратах радия-элемента и мезотория путем параллельных ионизационных и калометрических измерений активности мезотория.

Таким образом, к началу 40-х годов ВНИИМ располагал эталонами активности и эталонным комплексом для воспроизведения и передачи размера рентгена в области рентгеновского излучения при напряжении на трубке от 60 до 200 кв. Необходимо подчеркнуть, что рентгенометрическая и радиометрическая лаборатории ВНИИМ всегда поддерживали тесную связь с научными учреждениями нашей страны и оказывали промышленным предприятиям помощь в разрешении отдельных проблем, связанных с метрологией ионизирующих излучений. Так, рентгенометрическая лаборатория, наряду с научно-исследовательскими работами, направленными на разработку образцовых дозиметрических приборов, а также методов поверки их, разрабатывает рабочие дозиметры. Лаборатория ведет испытания вновь выпускаемых самозащитных рентгеновских трубок, электрометров, электрометрических ламп, проводит измерения свинцовых эквивалентов различных материалов. Сотрудники лаборатории впервые в Советском Союзе осуществляют дозиметрические измерения нейтронных потоков у циклотрона.

Радиометрическая лаборатория ведет как чисто метрологические работы, связанные с созданием эталонных источников излучения, так и исследования по разработке методов и измерительных средств для точных измерений α -излучения, испускаемого естественными радиоактивными веществами.

Сотрудники лаборатории принимают участие в исследованиях радиоактивности земной коры в различных районах Советского Союза, измеряют проводимость почвы и концентрацию ионов в воздухе для тех мест, где линии передач высокого напряжения наиболее часто поражала молния. Руководитель лаборатории Л. Н. Богоявленский лично принимал участие в геологических экспедициях по изысканию залежей урановых руд. Лаборатория снабжает эти экспедиции образцовыми

источниками α -излучения, а также измерительными средствами для его измерения.

Из этого краткого перечня видно, что лаборатории отдела измерения ионизирующих излучений ВНИИМ всегда помогали в разрешении возникающих в различных отраслях народного хозяйства нашей страны проблем, связанных с измерениями.

На этом заканчивается второй этап развития метрологии ионизирующих излучений.

Великая Отечественная война 1941—1945 гг. и блокада Ленинграда прервали исследования в области измерения ионизирующих излучений. Много оборудования, созданного в лабораториях, погибло во время блокады и эвакуации.

После восстановительного периода 1945—1946 гг. начинается третий этап развития метрологии ионизирующих излучений. Этот этап характеризуется бурным развитием ядерной физики и ядерной энергетики и широким применением источников ионизирующих излучений почти во всех областях науки, техники и медицины. В связи с этим возник ряд новых метрологических проблем, для решения которых в 1947 г. была организована лаборатория нейтронных измерений. Она занималась вспомогательными работами и к созданию эталонов единиц нейтронного излучения приступила только в 1956 г.

В результате разрешения ряда метрологических проблем во ВНИИМ создан целый комплекс эталонных установок, которые воспроизводят основные единицы ионизирующего излучения. Первым следует назвать государственный эталон единицы экспозиционной дозы рентгеновского и γ -излучений — кулон на килограмм, или рентген. Этот эталон осуществлен в виде четырех эталонных установок, которые воспроизводят единицу «рентген» в диапазоне энергии фотонов от 5 до 300 кэв с погрешностью, не превышающей 1—1,5%.

На рис. 1 приведена эталонная установка, которая воспроизводит единицу «рентген» в области γ -излучения с энергией фотонов от 250 до 3000 кэв.

Ионизационная камера установки — плоскопараллельного типа и помещается в сосуде, где давление воздуха может быть доведено до 20 атм. Это необходимо для того, чтобы использовать всю ионизирующую способность электронов до того, как они достигнут электродов ионизационной камеры. Установка воспроизводит единицу экспозиционной дозы γ -излучения и передает ее размер вторичным эталонам с относительной средней квадратической погрешностью, не превышающей 1,0% при исключенной систематической погрешности, не превышающей 1,0%.

Для воспроизведения единицы активности радионуклидов во ВНИИМ служат пять эталонных установок:

1) со счетчиком α - и β -частиц и фотонов, с телесным углом

4π стерад, — для воспроизведения единицы в жидких образцах;

2) с двумя счетчиками α - и β -частиц, с телесными углами 4π стерад (рис. 2), — для воспроизведения единицы активности

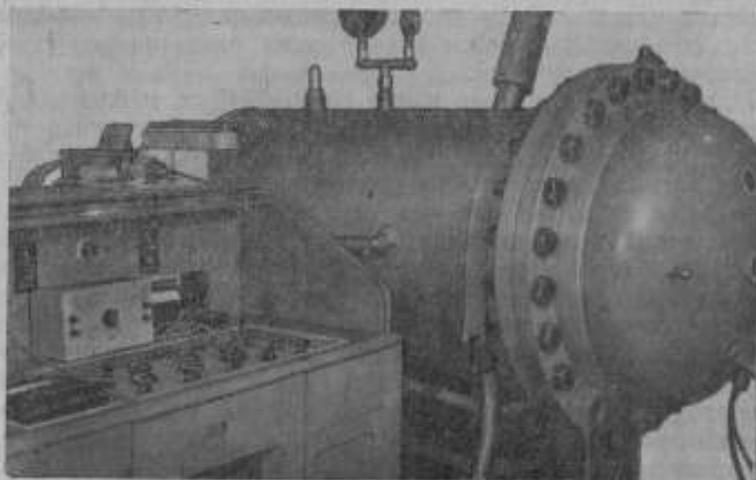


Рис. 1. Эталонная установка для воспроизведения единицы рентгена в области γ -излучения с энергией фотонов от 250 до 3000 кэв



Рис. 2. Установка с двумя счетчиками α - и β -частиц с телесными углами 4π рад

нуклидов в α - и β -источниках на металлических подложках с площадью активной поверхности от 1 до 160 см²;

3) со счетчиком α - и β -частиц, с телесным углом 4π стерад, и двумя сцинтилляционными счетчиками фотонов, включенными на совпадение с 4π -счетчиком, — для воспроизведения единицы в жидких образцах и в $\beta(\gamma)$ -источниках;

4) со щелевой ионизационной камерой, с телесным углом 4π стерад (рис. 3), — для воспроизведения единицы активности нуклидов в γ -источниках;

5) с четырьмя дифференциальными γ -калориметрами и тремя дифференциальными α - β -калориметрами — для воспроизведения активности нуклидов в γ -источниках и в α - и β -активных образцах.

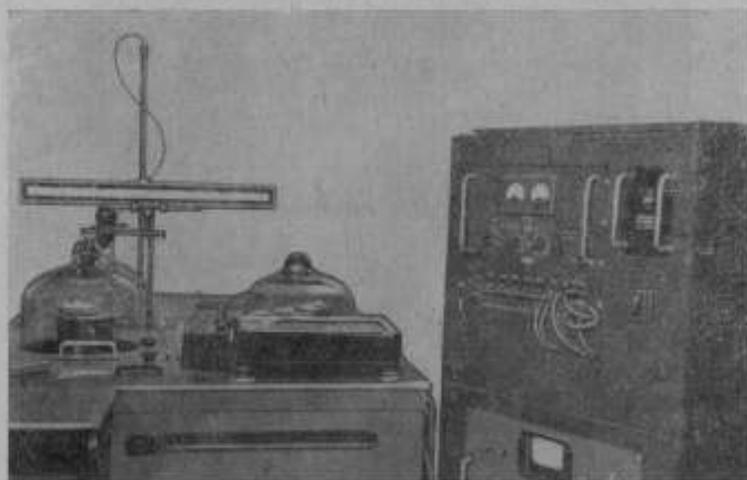


Рис. 3. Установка со щелевой ионизационной камерой с телесным углом 4π рад

Для обеспечения единства в области нейтронных измерений нейтронная лаборатория в течение 1960—1968 гг. создала два эталонных комплекса.

Первый из них образует групповой эталон, предназначенный для воспроизведения единицы нейтронного потока. Он состоит из трех эталонных установок:

1) установки с графитовым сферическим замедлителем диаметром 4 м, в которой применен метод сопутствующих частиц;

2) установки, основанной на определении числа поглощенных нейтронов методом измерения наведенной активности марганца-56;

3) установки, основанной на определении числа поглощенных нейтронов методом измерения наведенной активности золота-198.

Благодаря групповому принципу создания эталона надежность определения нейтральных потоков, («выход» нейтронных источников) оценивается в пределах 1%.

В этой же лаборатории создан эталон плотности потока тепловых нейтронов. Этот эталон состоит из шести плутоний-бериллиевых источников, расположенных в замедлителе; в полости замедлителя создается поток тепловых нейтронов плотностью порядка $7000 \text{ нейтр}/(\text{см}^2 \cdot \text{сек})$. Единица плотности потока

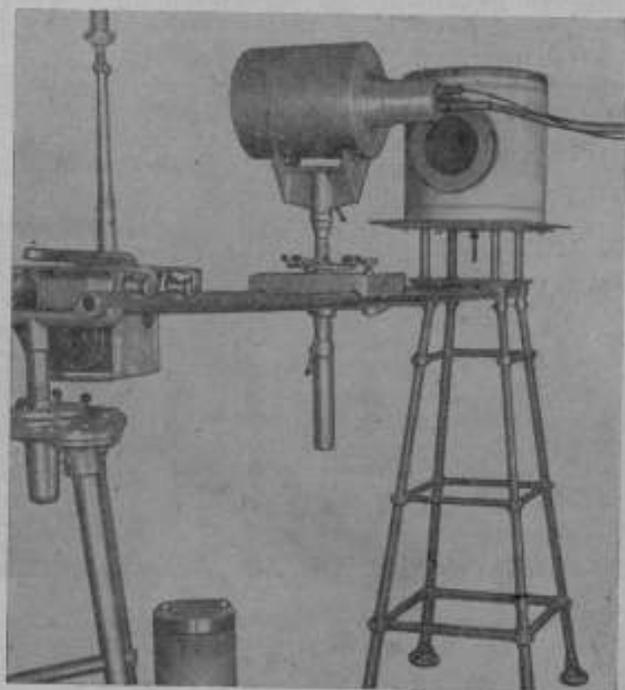


Рис. 4. Эталонный комплекс для воспроизведения единицы поглощенной дозы нейтронного излучения

тепловых нейтронов воспроизводится с относительной средней квадратической погрешностью, не превышающей 0,6%.

Государственный эталон единицы массы радия, как известно, изготовлен в 1934 г. и состоит из безводного хлорида радия, масса которого определена взвешиванием. Масса элемента радия составляла на момент изготовления $21,284 \pm 0,02 \text{ мг}$ радия.

Наконец, эталонный комплекс для воспроизведения единицы поглощенной дозы β - и нейтронного излучения — джоуля на килограмм, или рада, осуществлен в 1957—1967 гг. В комплекс измерительных средств входит эталонная установка для

воспроизведения единицы поглощенной дозы β -излучения в диапазоне энергии β -частиц от 20 до 3000 кэв и эталонная установка для воспроизведения единицы поглощенной дозы нейтронного излучения в диапазоне энергий нейтронов от 0,3 до 14 Мэв (рис. 4).

В связи с развитием ядерной энергетики, созданием установок для получения частиц и фотонов высоких энергий во

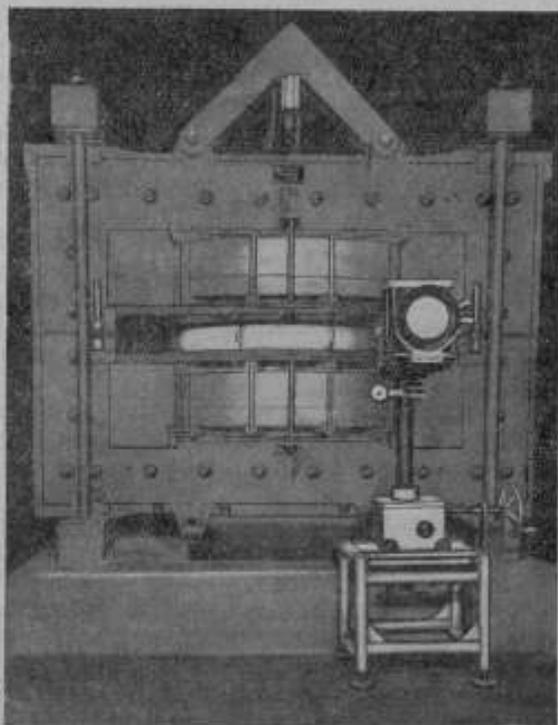


Рис. 5. Бетатронная установка на 50 Мэв

ВНИИМ была поставлена задача разработать аппаратуру для измерения параметров пучков тормозного излучения с энергией фотонов до 50 Мэв. Для этого во ВНИИМ имеется бетатронная установка на 50 Мэв (рис. 5) и разработан комплекс измерительных средств.

Таким образом, к настоящему времени ВНИИМ располагает шестью эталонными комплексами, которые воспроизводят основные единицы ионизирующих излучений.

Необходимо сказать, что в последнее десятилетие стало совершенно ясно, что одному ВНИИМ не решить быстро ряда

сложных метрологических задач, которые поставили наша наука, промышленность и медицина перед метрологией ионизирующих излучений. Поэтому было решено создать во ВНИИФТРИ отдел измерения ионизирующих излучений и в Новосибирске — рентгено-радиологическую лабораторию. Кроме того, создается ряд институтов вне нашей системы, задачей которых является разработка образцовой и рабочей аппаратуры для измерения ионизирующих излучений.

Следует отметить, что во ВНИИФТРИ за последние годы создан ряд установок, которые являются исходными для измерения в соответствующих областях ионизирующего излучения. Необходимо упомянуть две спектрометрические установки, позволяющие отдельно измерять активность каждого продукта распада радона, торона и актинона, а также долгоживущих α -излучателей типа плутония-239 и полония-210 на фоне естественной радиоактивности.

Во ВНИИФТРИ имеется установка для измерения концентрации так называемых «свободных атомов», т. е. атомов радиоактивных веществ, не присоединившихся к частицам пыли; разработан метод, который позволяет непосредственно определять поглощенные дозы в легких у работающих в горнорудной промышленности.

Из работ рентгено-радиологической лаборатории Новосибирского института следует отметить успешную разработку рабочего дозиметрического прибора, основанного на применении явления термолуминесценции.

В отделе измерения ионизирующих излучений ВНИИМ также проводятся работы по созданию поверочной аппаратуры для обеспечения передачи размера единиц от элементов до рабочих мер и приборов потребителя. На рис. 6 приведена установка типа УПГД-1 для проверки γ -дозиметров и γ -источников и на рис. 7 — образцовый дозиметр типа ДИМ-60.

Кроме того, в отделе разработана серия поверочных установок, позволяющих передавать с наименьшей погрешностью размеры единиц от всех созданных в отделе эталонов до радиоактивных источников, радиометров и дозиметров, используемых в различных областях народного хозяйства.

В заключение остановимся на ближайших задачах метрологии ионизирующего излучения.

Первая задача — это дальнейшее усовершенствование существующих эталонов единиц измерения, вторая — создание новых эталонов и расширение пределов измерений как по энергиям частиц, так и по диапазону измеряемых значений существующих эталонов. Здесь следует сказать о необходимости создания в ближайшее время эталона плотности потока промежуточных нейтронов и эталона плотности потока быстрых нейтронов. Необходимо также создать эталон поглощенной дозы фотонного излучения.

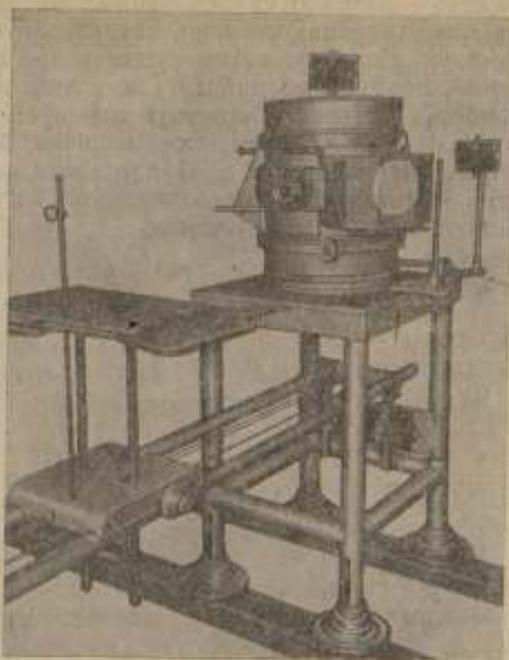


Рис. 6. Установка типа УПГД-1 для проверки γ -дозиметров и γ -источников

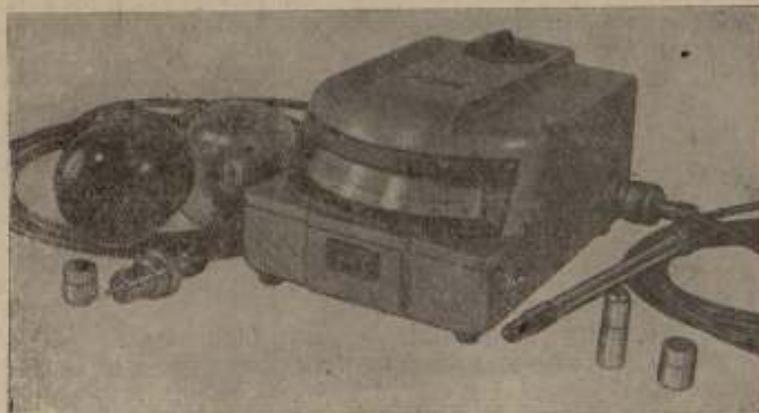


Рис. 7. Образцовый дозиметр типа ДИМ-60

Третья задача — разработка основанных на новых принципах приборов для измерения величин, характеризующих ионизирующие излучения. Если мы хотим существенно повысить точность измерений, необходимо работать над этой проблемой.

Новые приборы должны обеспечить одновременное измерение, по крайней мере, двух физических величин: 1) спектра тех полей, в которых они работают, и, 2) плотности потока ионизирующих частиц или значения экспозиционной дозы, или поглощенной дозы ионизирующего излучения.

Поступила в редакцию
10/1 1969 г.

УД

р
в
в
п
а
н
и
р
о
с
г
д
п
м
н
в
ч
д
п
н
п
р
ч
с
п
д

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА В МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

Развитие квантовой электроники наложило отпечаток на ряд разделов науки и техники. Не обошлось без взаимного влияния квантовой электроники и метрологии.

Именно потребности метрологии, а конкретнее, потребности в высокостабильных эталонах частоты и времени, определили первые шаги развития квантовой электроники.

Создание молекулярного генератора на пучке молекул аммиака (рис. 1) ознаменовало начало квантовой электроники [1]. В настоящее время — это хорошо освоенный прибор, используемый не только в земных, но и в космических экспериментах. Квантовый генератор на пучке атомов водорода и отпаянный рубидиевый генератор с оптической накачкой вместе с целым рядом молекулярных генераторов на формальдегиде, воде и т. д. представляют солидный фундамент для создания широкой службы, обеспечивающей высокую точность передачи размера единицы времени и частоты. Точность современных эталонов частоты достигает уровня 10^{-11} — 10^{-12} , и речь идет о дальнейшем ее повышении и передаче размера единицы во все области техники и науки, где необходимы прецизионные частотные измерения.

Одним из весьма интересных приложений квантовых стандартов частоты является спектроскопия сверхвысокого разрешения. Используя квантовые генераторы и идеи, которые принесло с собой развитие квантовой электроники, удалось провести ряд спектроскопических измерений с относительной разрешающей силой 10^{-8} — 10^{-9} [2, 3]. Более того, используя частотно-фазовые характеристики квантовых генераторов и родственных с ними устройств, можно повысить разрешающую способность спектроскопов, поскольку последняя будет лимитироваться уже не шириной спектральной линии,

а стабильностью и монохроматичностью излучения квантового генератора [4].

Освоение оптического диапазона расширило возможности квантовой электроники вообще и ее применение в метрологии, в частности. Кольцевой газовый оптический квантовый генератор (ОКГ, рис. 2) вытесняет механический гироскоп; лазерная техника находит применение в эталонировании мощности; получение импульсов света рекордно малой длительности (10^{-12} — 10^{-13} сек) открывает новые перспективы в измерительной тех-

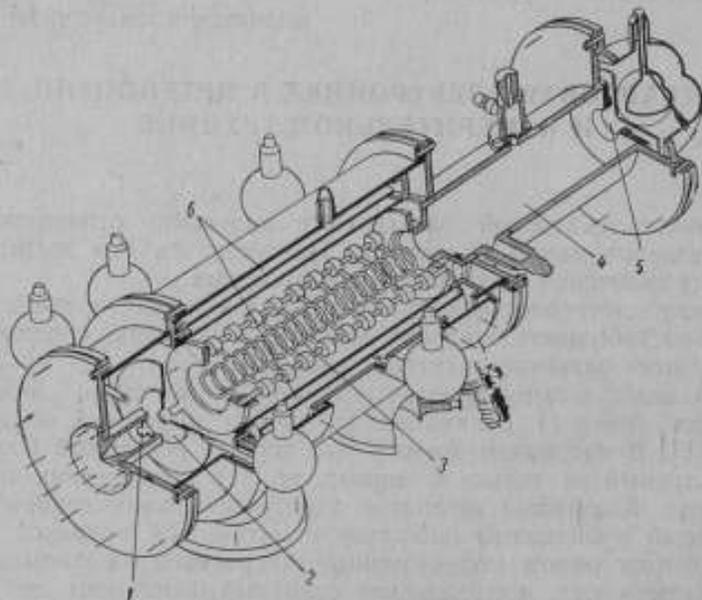


Рис. 1. Устройство пучкового молекулярного генератора:

1 — источник молекулярного пучка; 2 — вакуумная рубашка; 3 — диафрагма для формирования пучка молекул; 4 — устройство, фокусирующее возбужденные молекулы; 5 — линза отработанного пучка молекул; 6 — резонатор

нике; зарождается новое направление — квантовые стандарты частоты оптического диапазона [5, 6].

Не имея возможности подробно останавливаться на каждом из перечисленных направлений, рассмотрим развиваемые в самое последнее время идеи в области создания оптических стандартов частоты.

Поскольку использование оптических стандартов частоты является новым направлением квантовой электроники, в настоящее время здесь больше идей, чем конкретных экспериментальных достижений. Это одно из главных обстоятельств, побуждающих говорить более широко об использовании ОКГ в качестве эталонов частоты.

Еще в 1963 г. были начаты работы по стабилизации газового квантового генератора по резонансной зависимости выходной мощности от настройки резонатора. Была получена [5] стабильность частоты порядка 10^{-8} (рис. 3). Однако эти первые работы не были ориентированы на создание оптического стандарта. Лишь в последнее время работы в области оптических стандартов частоты стали выделяться в новое направление, и был опубликован ряд работ, обещающих существенный прогресс в этом направлении. Остановимся на тех из них, которые представляются нам наиболее перспективными.

Рассмотрим метод стабилизации источников излучения с помощью газовой ячейки, помещенной в резонатор [5].

Известно, что в газовых ОКГ получению узких спектральных линий препятствует эффект Доплера. Доплеровская ширина линии в оптическом диапазоне достигает 10^9 гц. Однако в настоящее время предложен и экспериментально реализован

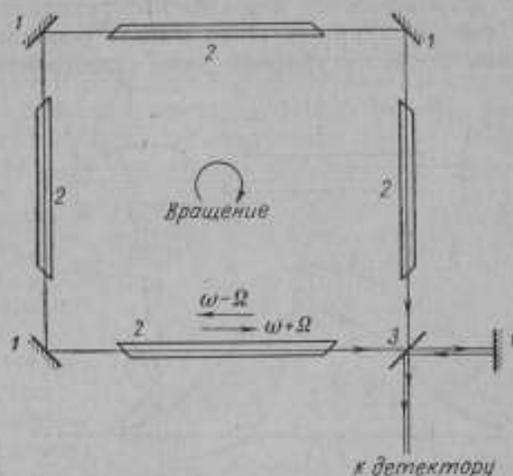


Рис. 2. Вращающийся газовый ОКГ с кольцевым (замкнутым) резонатором:
1 — зеркала; 2 — трубка газового ОКГ; 3 — полупрозрачное зеркало

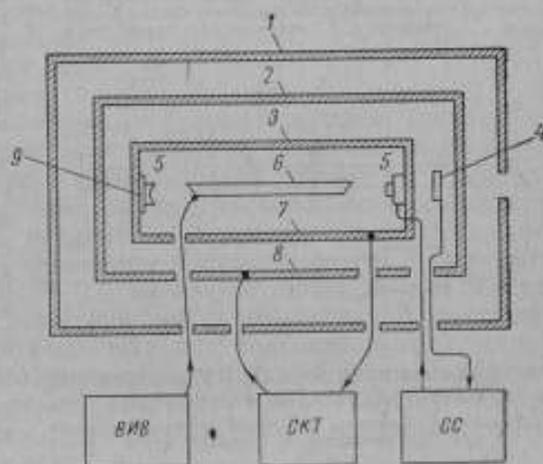


Рис. 3. Схема He — Ne ОКГ ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$), стабилизированного по провалу в центре линии усиления (модель 119 фирмы „Spectra Physics“):
1 — магнитный экран; 2 — печь; 3 — внешний корпус резонатора; 4 — фотодетектор; 5 — зеркала; 6 — разрядная трубка с рабочим веществом; 7 — термистор; 8 — нагреватель; 9 — биметаллический компенсатор температуры.
ВНВ — высоковольтный источник возбуждения; СКТ — схема контроля температуры; СС — следящая система

метод стабилизации газового ОКГ, в котором спектральная ширина резонансного стабилизирующего элемента не зависит от доплеровской ширины и определяется ее ударной или естественной шириной. Идея метода основана на том, что в режиме насыщения по ударной (или естественной) ширине линии в поле

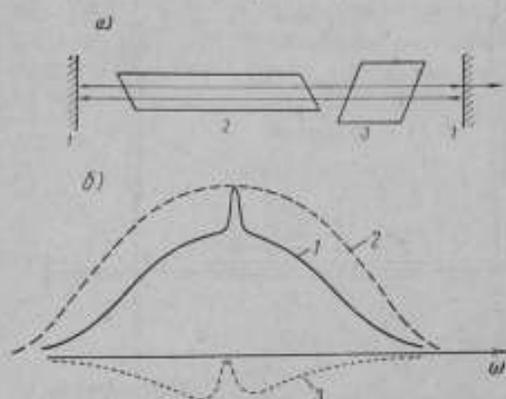


Рис. 4. Коэффициент усиления в ОКГ с нелинейно-поглощающей газовой ячейкой в резонаторе:

а - схема ОКГ: 1 - зеркала; 2 - усиливающая среда, 3 - поглощающая ячейка; б - форма линии: 1 - суммарная усиливающей и поглощающей среды; 2 - усиливающей и 3 - поглощающей среды

стоячей волны коэффициент поглощения в окрестности $\Delta\omega_d$ ($\Delta\omega_d$ - ударная или естественная ширина линии) в два раза меньше, чем вне ее. Поэтому суммарный коэффициент усиления в ОКГ, состоящем из трубки с активной средой и поглощающей ячейки, имеет вид, представленный на рис. 4. Из него следует, что ширина резонансного пика много меньше доплеровской ширины линии и ее можно сделать достаточно малой путем использования ячейки низкого давления.

Предварительные эксперименты в нескольких лабораториях показывают, что степень привязки генерируемой частоты к вершине спектральной линии не хуже 10^{-11} и может быть улучшена.

Описанный способ может быть реализован в сравнительно простом конструктивном

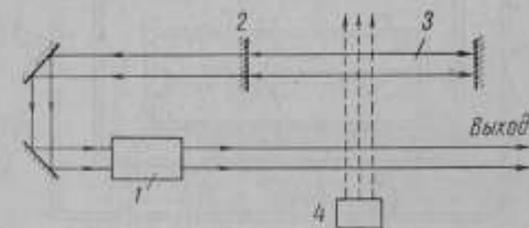


Рис. 5. Схема пучкового ОКГ с когерентной накачкой собственным излучением:

1 - лазерный усилитель; 2 - пучок атомов или молекул; 3 - резонатор; 4 - источник пучка

решении и сулит значительный прогресс в создании стабильных по частоте источников излучения оптического диапазона. Однако в газовых системах соударения влияют не только на ширину спектральной линии, но и на положение ее вершины. Это обстоятельство побуждает обратиться к методу молекулярных пучков.

В настоящее время не существует пучковых ОКГ. Однако выдвинутые и разрабатываемые сейчас идеи дают надежду на успех в этом направлении в ближайшее время.

Среди обсуждаемых в литературе методов одним из наиболее перспективных является метод электромагнитной инверсии [5], сущность которого поясняет рис. 5. Пучок атомов или молекул проходит через область электромагнитного поля резонансной частоты (световой луч, генерируемый ОКГ). Параметры этого поля подбирают так, чтобы для наиболее вероятной скорости молекул в пучке действие поля приводило к инвертированию населенности рабочих уровней. Полученный таким образом инвертированный пучок будет служить активной средой для возбуждения излучения в резонаторе, расположенном последовательно с инвертирующим лучом. Часть генерируемой энергии может быть отведена для стабилизации ОКГ накачки. В этом случае также получается узкая спектральная линия, ширина которой определяется временем взаимодействия инвертируемых атомов (или молекул) с инвертирующим полем, несмотря на то, что при угловой апертуре пучка в несколько градусов доплеровская ширина линии может быть порядка 10^6 гц. Сужение линии (рис. 6) происходит потому, что молекулы инвертируются лишь в пределах малого угла φ вблизи оси, перпендикулярной направлению распространения инвертирующего луча ($\varphi = \lambda/2la$, где a — линейный размер луча в поперечном сечении вдоль движения пучка молекул). В настоящее время имеются все возможности для реализации этого метода, так как найдены колебательные переходы в формальдегиде и метане, частота которых совпадает с большой точностью с частотой генерации гелий-неонового и ксенонового ОКГ ($\lambda = 3,39$ мкм и $\lambda = 3,5$ мкм).

Альтернативным методом исключения доплеровского расширения спектральной линии является метод двух разнесенных резонаторов, широко применяемый в стандартах частоты с. в. ч. диапазона. При этом следует различать метод Рамсея и метод «молекулярного звона». Первый из них основан на том, что вероятность перехода в двухрезонаторной системе с подачей внешнего поля в каждый резонатор имеет узкий максимум

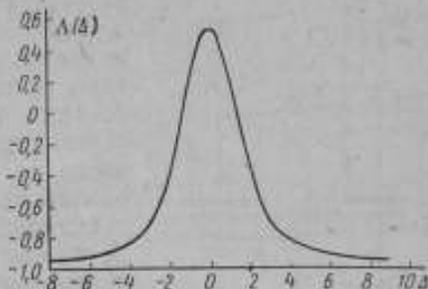


Рис. 6. Зависимость инверсии атомов в пучке после прохождения возбуждающего луча от расстройки Δ частоты перехода относительно частоты поля.

Величина Δ дана в единицах времени пролета через резонатор

(ширина максимума $\Delta\omega = T^{-1}$, где T — время пролета для всей системы двух резонаторов, включая и время пролета между резонаторами) для каждой отдельной молекулы (атома). Поэтому принципиальная схема двухрезонаторной системы рамсеевского типа может быть выполнена так, как это показано на рис. 7.

В такой схеме невозможно наблюдать «молекулярный звон», т. е. когерентное излучение во второй резонатор молекул, предельно поляризованных в первом резонаторе. Причина этого — в малой длине волны оптического диапазона: в пределах любой реально мыслимой апертуры молекулярного пучка укладывается большое число длин волн, и в результате усреднения по фазам поляризация на входе во второй резонатор оказывается равной нулю. Добиться наблюдения «молекулярного звона» во втором резонаторе можно при соосной геометрии. Соответствующая конструкция резонатора представлена на рис. 8.

В настоящее время наибольшее распространение в различных странах в качестве эталона частоты и времени получила цезиевая атомно-лучевая трубка. Такое распространение этого прибора связано с исключительной чувствительностью ионизационного индикатора интенсивности атомарного пучка, что позволяет регистрировать малые изменения потока атомов.

Теперь, когда возрастает интерес к стандартам частоты оптического диапазона [2—4], возникает естественное желание найти путь использования этих преимуществ атомно-лучевой трубки для создания стандарта частоты оптического диапазона. Нетрудно видеть, что это можно сделать, сохранив принципиальное устройство атомно-лучевого стандарта микроволнового диапазона.

Для получения узкой спектральной линии заслуживает внимания использование атомов таллия. Стандарт частоты на основе таллия не нашел столь широкого распространения, как цезиевая атомно-лучевая трубка. Причина здесь в том, что детекторы для атомов таллия оказались не столь чувствительными, как для атомов цезия. Однако для оптического стандарта частоты это может быть не столь существенным, как для стандарта

Рис. 7. Принципиальная схема оптической двухрезонаторной системы рамсеевского типа: 1, 2 — плоскостепенные оптические резонаторы; 3 — молекулярный пучок с апертурой $2a$; 4 — ход луча стабилизированного квантового генератора; 5 — стабилизированный квантовый генератор; d — линейный размер зеркала; L — расстояние между резонаторами.

радиодиапазона. Дело в том, что основной уровень таллия имеет тонкое расщепление (рис. 9), лежащее в инфракрасном диапазоне частот ($\lambda = 1,28$ мкм). Время жизни атомов таллия в состоянии $P_{1/2}$ составляет 0,1 сек, а это значит, что предельно достижимая ширина линии на шесть порядков меньше, чем для цезия. Поэтому, несмотря на потерю в чувствительности детектора, используя атомы таллия, можно надеяться на получение стабильности частоты $10^{-14} \div 10^{-15}$.

Перспективы развития стандартов частоты оптического диапазона диктуют необходимость следующих исследований в смежных областях:

Необходимо развитие спектроскопии высокого разрешения и измерение частот оптических переходов с большей степенью точности.

При подборе резонансных переходов необходимо знать частоту перехода с относительной точностью $\Delta\omega_{\text{д}}/\omega$. Для газов $\Delta\omega_{\text{д}}$ определяется эффектом Допплера и $\frac{\Delta\omega_{\text{д}}}{\omega} \approx 10^{-6}$. Именно с такой точностью необходимо знать частоты различных переходов для их широкого использования в стандартах частоты.



Рис. 9. Тонкая структура основного уровня атома таллия.

Большое значение для развития временной в частотной метрологии является «стыковка» оптического и с.в.ч.-диапазонов, т. е. возможность многократного деления оптической частоты и умножения радиочастоты до оптического диапазона без существенной потери стабильности.

Развитие всех перечисленных направлений в сильной степени взаимосвязано, и только комплексное решение всех вопросов может привести к дальнейшему прогрессу в области метрологии частоты и времени вообще и оптических стандартов частоты, в особенности.

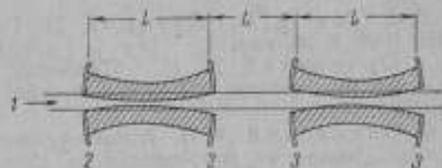


Рис. 8. Конструкция резонатора для наблюдения молекулярного звена в оптическом диапазоне:

l — ход пучка молекул; 2, 3 — зеркала сферических резонаторов; l — расстояние между зеркалами резонатора; L — расстояние между резонаторами. Поле в резонаторе локализовано в заштрихованной части.

Прогресс в спектроскопии высокого разрешения, да и в области самих стандартов частоты, значительно возрастет при наличии достаточно стабильных квантовых генераторов с частотой, перестраиваемой в широком диапазоне.

Большое значение для развития временной в частотной метрологии является «стыковка» оптического и с.в.ч.-диапазонов, т. е. возможность многократного деления оптической частоты и умножения радиочастоты до оптического диапазона без существенной потери стабильности.

Развитие всех перечисленных направлений в сильной степени взаимосвязано, и только комплексное решение всех вопросов может привести к дальнейшему прогрессу в области метрологии частоты и времени вообще и оптических стандартов частоты, в особенности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басов Н. Г. Молекулярный генератор. Автореферат диссертации. М., ФИАН, 1956.
2. Басов Н. Г., Ораевский А. Н., Страховский Г. М., Успенский А. В. Двухрезонаторный молекулярный генератор как спектроскоп высокой разрешающей силы. ЖЭТФ, письма, 1966, т. 9, в. 12, стр. 468.
3. Басов Н. Г., Летохов Н. Г. Оптические стандарты частоты. УФН, 1968, т. 96, вып. 4.
4. Ораевский А. Н. Пучковый оптический квантовый генератор как стандарт частоты, «Известия вузов», радиофизика, 1968, т. 11, № 10, стр. 1554.
5. Ораевский А. Н. Атомно-лучевая трубка как оптический стандарт частоты. Доклад на конференции по точным электромагнитным измерениям в Болдере (США, июль 1968); см. также IEEE Transaction on Instr and Meas, 1968, v. 17.

Поступила в редакцию

3/III 1969 г.

**АТОМНЫЙ ЭТАЛОН ЧАСТОТЫ
ГЕРМАНСКОГО ВЕДОМСТВА
ПО ИЗМЕРЕНИЯМ И КОНТРОЛЮ ТОВАРОВ ГДР
(DAMW)**

В соответствии с поставленными перед народным хозяйством Германской Демократической Республики задачами в 1967 г. были закончены работы по созданию атомного эталона частоты.

Этот эталон разработан на основе метода двойного резонанса с применением газонаполненных ячеек, служащих для обнаружения перехода между обоими уровнями сверхтонкой структуры основного состояния цезия-133.

Метод двойного резонанса, описанный в работах Каствера, был предложен и применен Ардити и Карвером для разработки атомных эталонов частоты. В основу этого метода положена структура энергетических уровней атома цезия. Над основным уровнем, который вследствие магнитного взаимодействия валентного электрона с ядерным спином расщепляется на два энергетических уровня сверхтонкой структуры $F=3$ и $F=4$, находятся два возбужденных уровня P . Оптические переходы между этими возбужденными уровнями и основным уровнем соответствуют дуплету цезия при длине волны 894,35 нм и 852,11 нм и представляют собой резонансное излучение цезия. В результате поглощения и последующей эмиссии происходит некоторое перераспределение населенности уровней основного состояния, которое приводит к изменению поглощающей способности цезия. В результате облучения микроволновой энергией, частота которой соответствует разности энергетических уровней между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния, т. е. соответствует определяемому атомному переходу, это перераспределение и, следовательно, изменение поглощающей способности

может быть значительно уменьшено. При этом эффект, кроме всего прочего, существенно зависит от времени релаксации, в течение которого перераспределение ослабевает в результате столкновений атомов, даже без использования микроволновой частоты.

Цезий находится при естественном давлении, соответствующем температуре стеклянной газонаполненной ячейки, в которой он находится. Для увеличения времени релаксации путем уменьшения вероятности столкновений (от числа которых зависит процесс релаксации) атомов цезия как между собой, так и со стенками сосуда можно смешать пары цезия в стеклянном сосуде с нейтральным немагнитным буферным газом, находящимся под давлением несколько торр ($1 \text{ торр} = 133,322 \text{ н/м}^2$). Благодаря этому одновременно снижается доплеровское уширение атомной линии.

Указанный метод заключается в следующем. Газонаполненная ячейка находится в объемном резонаторе, настроенном на резонансную частоту сверхтонкого перехода. Для оптической накачки и для исследования изменения поглощающей способности цезия используют лучи от газоразрядной лампы, испускающей резонансный свет цезия, которые проходят через систему линз (а иногда еще и через интерференционный фильтр). Далее, лучи через соответствующие отверстия в резонаторе попадают на газонаполненную ячейку, а затем через другую систему линз — на специальный фотоэлемент. Поскольку резонансная частота зависит от влияния магнитного поля, воздействие магнитного поля Земли и магнитных помех на газонаполненную ячейку должно быть исключено путем экранирования последнего.

Чтобы снять вырождение уровней, на атомы цезия должно действовать некоторое слабое однородное магнитное поле, имеющее определенное направление и величину. Это магнитное поле создается катушками Гельмгольца в экранирующем устройстве.

Микроволны с частотой, полученной от кварцевого генератора, подаются через умножитель на резонатор и модулируются в фазовом модуляторе низкой частотой. Вследствие этого изменяется поглощающая способность паров цезия, и световая волна будет слабо модулирована. Эта световая волна создает в фотоэлементе очень малое переменное напряжение, которое сначала селективно усиливается, а затем сравнивается в фазочувствительном выпрямителе с модулирующим напряжением. Таким образом, на выходе выпрямителя возникает постоянное напряжение, амплитуда и знак которого определяются отклонением гармоники кварцевого генератора от атомной резонансной частоты. Это постоянное напряжение с использованием интегрирующего звена служит для подстройки частоты кварцевого генератора на атомную резонансную частоту. Таким образом, контур настройки замыкается, и мы получаем кварцевый

осциллятор, настроенный с помощью атомной резонансной частоты, независимой от внешних воздействий.

С помощью опытной модели атомного эталона частоты, разработанной на основе метода двойного резонанса, были исследованы параметры, от которых зависят: абсолютное значение атомной резонансной частоты и точность ее воспроизведения.

Резонансная частота, на которой основано определение единицы времени — секунды в системе А1, есть частота перехода микроволн при свободном состоянии атомов цезия. Это указывает на то, что не должно быть никакого взаимодействия атомов цезия ни с какими полями или частицами, а также никакого взаимодействия этих атомов между собой, так как любое взаимодействие влияет на резонансную частоту. В нашем случае параметрами взаимодействия являлись: магнитное поле, состав, давление и температура буферной газовой смеси и условия оптической накачки.

Теоретические расчеты и экспериментальные исследования показали, что колебания необходимого магнитного остаточного поля порядка 0,5 мкТл обуславливают относительную погрешность частоты порядка $2 \cdot 10^{-11}$. Буферные газы, находящиеся в газонаполненном элементе, создают сдвиг резонансной частоты, зависящий от давления этого газа, причем сдвиг для легких буферных газов положителен, а для тяжелых — отрицателен. Мы применяли смесь из 25% неона и 75% аргона, при этом сдвиг резонансной частоты был весьма незначительный. Однако хорошие результаты (амплитуда резонанса и отношение сигнал/шум) можно получить также и при заполнении элемента азотом под давлением 5 торр.

Наши эксперименты показали, что для газонаполненной ячейки наиболее благоприятна температура 45–50°С.

Точность, с которой может быть обнаружена резонансная частота, определяется с помощью электронной системы, но в первую очередь отношением сигнал/шум и шириной линии резонансного сигнала. Последняя зависит в основном от интенсивности света накачки, мощности микроволн при облучении и от температуры элемента.

При указанной выше температуре 50°С и облучении энергией порядка 1–2 мкВт, используя частоту модуляции 85 Гц, мы получили следующие параметры резонансного сигнала:

- 1) ширина линии — 500 Гц;
- 2) отношение сигнал/шум — от 120 до 150;

при этом, постоянная времени электронного устройства составляла 4 сек.

Исследования моментов настройки, проведенные на данной эталонной модели, ограничивались лишь процессами установления колебаний по окончании действия внешних помех. Эти помехи были вызваны внезапным изменением частоты кварцевого генератора, т. е. изменением напряжения на параметрическом

диоде, подключенном параллельно кварцу. Вследствие этого частота кварцевого генератора уже не совпадала с атомной частотой.

Наш метод позволяет получить поправочный сигнал, который через интегрирующее звено снова приводит в соответствие обе частоты. Наряду с переходными процессами при настройке прежде всего представляет интерес точность воспроизведения, с которой по окончании действия помех снова можно обнаружить атомную частоту. Само собой разумеется, что при этом помехи не должны быть слишком большими, т. е. такими, при которых возникнет опасность превышения диапазона настройки. Этот диапазон ограничивается шириной линии резонансного сигнала.

В результате процесса настройки еще не оптимизированной системы, которая производилась по окончании воздействия искусственных помех на частоту кварцевого генератора в положительном и отрицательном направлении, была достигнута точность воспроизведения атомной частоты порядка $5 \cdot 10^{-11}$.

Исследования постоянства модели атомного эталона частоты за большой промежуток времени еще не закончены. Однако можно считать, что долговременная стабильность опытной модели равна $1 \cdot 10^{-10}$.

Предполагается улучшить это временное постоянство эталона путем оптимизации системы настройки, исследования и усовершенствования ламп и некоторых других параметров, влияющих на амплитуду сигнала и ширину линии. Наряду с этим следует попытаться усовершенствовать сам метод обнаружения резонансной частоты, чтобы достичь лучшей разрешающей способности и лучшей воспроизводимости.

Поступила в редакцию

26/11 1969 г.

СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ ТОЧНЫХ РАДИОИЗМЕРЕНИЙ

Особенностью радиотехнических измерений является чрезвычайно широкий диапазон частоты значений измеряемых величин и широкая номенклатура приборов для их измерений. С этим связаны специфика и трудности, возникающие в метрологии, обеспечивающей эту область.

Современная радиотехника использует сигналы, частоты которых простираются практически от постоянного тока вплоть до оптического диапазона. Известно, например, что в современной радиотехнике необходимо измерять мощности, лежащие в пределах от 10^{-18} Вт и до нескольких десятков мегаватт.

Объектами измерений являются разнообразные радиотехнические сигналы и параметры цепей, а также большое количество параметров, которые описывают эти сигналы и цепи.

При переходе от одного участка диапазона частот к другому применяют принципиально различные методы измерений, к тому же номенклатура применяемых трактов и соединительных размеров очень широка. Это влечет за собой увеличение парка различных рабочих средств измерений и, как следствие, чрезвычайное возрастание числа образцовых средств.

Серьезным вопросом является выбор модели для объекта измерения. По существу в большинстве случаев, когда нужно измерить радиотехнические сигналы, имеют дело с функцией времени, причем очень часто отрезки времени, которыми располагают для измерения, бывают очень короткими. Для этой функции нужно выбрать подходящую модель, параметры которой приписывают реальному сигналу, а затем идентифицируют параметры реального сигнала с параметрами идеальной модели. Эта задача сама по себе очень часто сложна, и устранить

методические погрешности, связанные с выбором модели и с идентификацией сигнала с моделью, зачастую нелегко.

В силу изложенного во многих случаях непосредственное приведение значений параметров и характеристик, измеряемых в радиотехнике, к эталонам единиц электрических величин встречает большие трудности, и возникает необходимость создания эталонных средств измерения по диапазонам частот и даже по значениям измеряемых величин.

Нужно отметить, что в Советском Союзе развитие радиотехнических измерений началось во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии (ВНИИМ). Еще в 1910 г. здесь по инициативе Н. Г. Егорова, одного из учеников Д. И. Менделеева, была организована радиотелеграфная лаборатория. Радиотехническая лаборатория ВНИИМ — старейшая в мире метрологическая лаборатория в области высокочастотных измерений.

В 30-х годах была организована лаборатория радиоизмерений в Харькове в Институте мер и приборов, которая начала особенно быстро развиваться с 1945 г. Во время Великой Отечественной войны в Новосибирском институте организована лаборатория радиотехнических измерений. В 1953 г. создан Центральный научно-исследовательский институт радиоизмерений, реорганизованный затем во Всесоюзный научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ).

К сожалению, в краткой статье невозможно охватить все отрасли радиоизмерительной техники, поэтому остановимся лишь на некоторых областях радиоизмерений, которые, на наш взгляд, являются основными и состояние которых достаточно показательно.

Первая область — измерение электрического напряжения при высоких и сверхвысоких частотах. Основные работы здесь велись во ВНИИМ. Начинали их видный советский метролог Б. Е. Рабинович и его ученик А. М. Федоров, ныне один из ведущих сотрудников ВНИИМ.

Основной метод, который они разрабатывали и который применяется в их установках, — компенсационный, основанный на сравнении постоянного напряжения с амплитудой переменного высокочастотного напряжения. В качестве компаратора использовался высокочастотный диод. Диодные компенсационные вольтметры, разработанные во ВНИИМ, обладают наилучшими характеристиками из известных приборов такого назначения. Примерно до 10 Мгц прибор практически лишен частотной погрешности. При частотах более 10 Мгц уже начинают сказываться частотные погрешности, вначале пролетные, затем и резонансные, и возникает необходимость в соответствующих частотных поправках. Методика введения их разработана для

диапазона частот до 1000 Мгц. В результате приборы при этих частотах имеют погрешности от 0,2 до 2,5% в зависимости от измеряемого напряжения и диапазона частот.

Во ВНИИМ разработана установка для поверки вольтметров. В качестве основного узла в ней применен компенсационный вольтметр. Разработана также метод поверки вольтметров при частотах до 3000 Мгц, основанный на применении термисторных приборов, в котором напряжение определяют через мощность и известное сопротивление терморезистора. В этом диапазоне частот такие приборы имеют погрешности от 2,5 до 7%.

Компенсационные вольтметры ВНИИМ могут быть использованы для измерения напряжения не только синусоидального сигнала, но и напряжения видео- и радиоимпульсов. При этом их погрешность лежит в пределах до 5% в зависимости от частоты заполнения и параметров видеоимпульсов.

Очень перспективен метод компарирования постоянного напряжения с мгновенным значением импульсного напряжения, предложенный во ВНИИФТРИ Л. С. Неустроевым. В качестве компаратора применяется электронно-лучевой нуль-индикатор. На базе этого метода во ВНИИФТРИ построены два прибора. Один из них (рис. 1) может работать, начиная от длительности импульсов порядка 30 нсек. Погрешность его 0,3% при разрешающей способности порядка 3 мв. Прибор экспонировался на советской торгово-промышленной выставке в Лондоне и получил высокую оценку английских специалистов.

На аналогичном принципе построен прибор для наносекундного диапазона. В нем применен электронно-лучевой нуль-индикатор с большей полосой пропускания. Этот прибор может измерять амплитуду видеоимпульсов длительностью от 1 нсек. Погрешность его примерно такая же, как у предыдущего, а разрешающая способность примерно 20 мв.



Рис. 1. Измеритель мгновенных значений импульсных напряжений микросекундного диапазона

Следующий вид измерений, на котором необходимо кратко остановиться, — измерения мощности.

Сейчас для верхнего звена поверочной схемы в качестве основного для наиболее точных приборов принят калориметрический метод. Коаксиальный калориметр разработан и применяют во ВНИИМ, волноводный калориметрический измеритель мощности разработан во ВНИИФТРИ. Эти приборы имеют погрешность, лежащую в пределах примерно от 0,2–0,3 до 1% в зависимости от диапазона частот и применяемых трактов. Точность и чувствительность приборов (они могут измерять мощность порядка милливатт) находятся на уровне лучших мировых образцов.

Во ВНИИМ калориметрические ваттметры впервые были осуществлены под руководством Т. Б. Залуцкой и В. И. Кржиговского, во ВНИИФТРИ — под руководством В. И. Проненко.



Рис. 2. Установка для проверки коаксиальных измерителей мощности

Очень интересны калориметры изотермического типа с охлаждающим термоэлементом Пельтье, созданные в Харьковском институте под руководством видного советского радиометролога А. И. Бродского. Впервые они были предложены примерно в 1953—1954 гг. Насколько нам известно, аналогичные конструкции сейчас используют в Японии в качестве исходных приборов.

Довольно трудную задачу в измерении мощности при сверхвысоких частотах представляет передача значений от исходных средств — калориметров к рабочим мерам и приборам. Особенно серьезной задачей является исключение погрешности, связанной с несогласованностью трактов передачи.

Во ВНИИМ эта задача решена в работах Т. Б. Морозовой, применившей измеритель проходящей мощности (рис. 2) — поворотный ответвитель, который отдельно измеряет падающую и отраженную мощность и является центральным узлом установки, а во ВНИИФТРИ применен калибратор падающей

мощности, аттестуемый непосредственно по калориметру и используемый затем для поверки рабочих измерителей мощности. Прибор довольно прост и очень удобен в работе (также экспонирован на выставке в Лондоне).

Нужно заметить, что во ВНИИФТРИ ищут и другие пути измерений мощности. В частности, интересны разрабатываемые школой Р. А. Валитова пондеромоторные измерители мощности. Сейчас имеются определенные перспективы, что точность этих приборов будет приближаться к точности калориметров, и это имеет важное значение, поскольку возможность сличения таких,

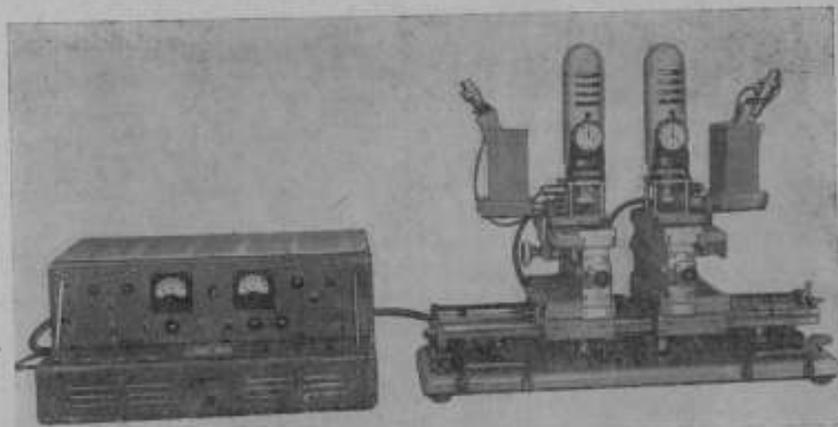


Рис. 3. Воздушный электродинамический амперметр.

принципиально различных, приборов существенно может повысить достоверность измерений.

Во ВНИИФТРИ построены коаксиальные измерители мощности проходящего типа на базе точного измерения тока.

Методы измерения тока при высоких и сверхвысоких частотах, как правило, основаны на компарировании постоянного и высокочастотного тока по одинаковым тепловым эффектам.

При очень высоких частотах более точным и, на наш взгляд, более перспективным является метод, основанный на пондеромоторном взаимодействии магнитного поля в коаксиальной линии с короткозамкнутым витком. Этот метод разработан в Советском Союзе под руководством В. Р. Лопаня.

На рис. 3 показан так называемый воздушный электродинамический амперметр. Короткозамкнутый виток, висящий на длинном безмоментном подвесе, находится в коаксиальной линии. Измеряемый ток отсчитывают, по периоду крутильных колебаний, возникающих в системе при протекании

высокочастотного тока по линии. Одна из интересных особенностей таких амперметров — возможность градуировать их, непосредственно привязывая к единице времени, массы и к линейным размерам. Произведенная таким способом градуировка очень хорошо совпала с экспериментальной градуировкой посредством радиальной фотолампы. Частотный диапазон электродинамических амперметров простирается до 500 Мгц.

Во ВНИИФТРИ имеется такая же по идее конструкция (рис. 4), но подвижная система в ней заключена в вакуум, что

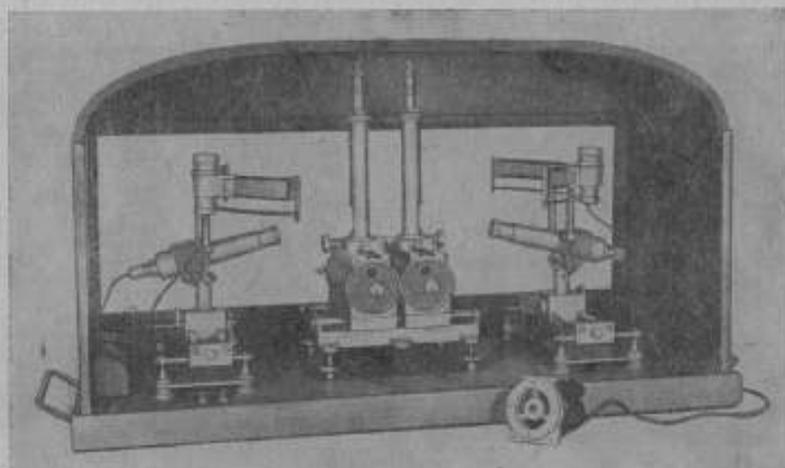


Рис. 4. Вакуумный электродинамический амперметр

позволяет измерять токи примерно от 50 ма и, кроме того, частотный диапазон измерителя тока расширен до 2000 Мгц. На базе такого измерителя тока удалось построить измеритель проходящей мощности. Погрешность таких приборов менее 0,5%. Значение измерений тока заключается не только в том, что на основе этих измерений в Советском Союзе удалось наладить выпуск хороших рабочих высокочастотных амперметров, но и в том, что от точного измерения тока зависит, например, возможность измерения высокочастотного поля. Точность измерения тока дает также возможность создать калибраторы напряжения. Во ВНИИФТРИ разработаны калибраторы напряжения, работающие достаточно хорошо в диапазоне частот до 400 Мгц. В них точно измеряется ток, протекающий по известному сопротивлению.

В области измерений напряженности электромагнитного поля и параметров антенн практические работы ведутся под руководством В. С. Бузинова, М. М. Левина, а теоретические — под руководством Б. Е. Кинбера.

Для различных диапазонов частот применяются различные методы. Так, от 10 кГц до 50 МГц применяется метод образцового поля, при котором магнитное поле, излучаемое рамочной антенной, рассчитывают с очень высокой точностью, и в этом поле можно калибровать высокочастотные измерители напряженности поля. Погрешность метода лежит в пределах 5%.

Для частот от 30 до 1000 МГц применяют образцовые дипольные резонансные антенны, для которых можно очень точно

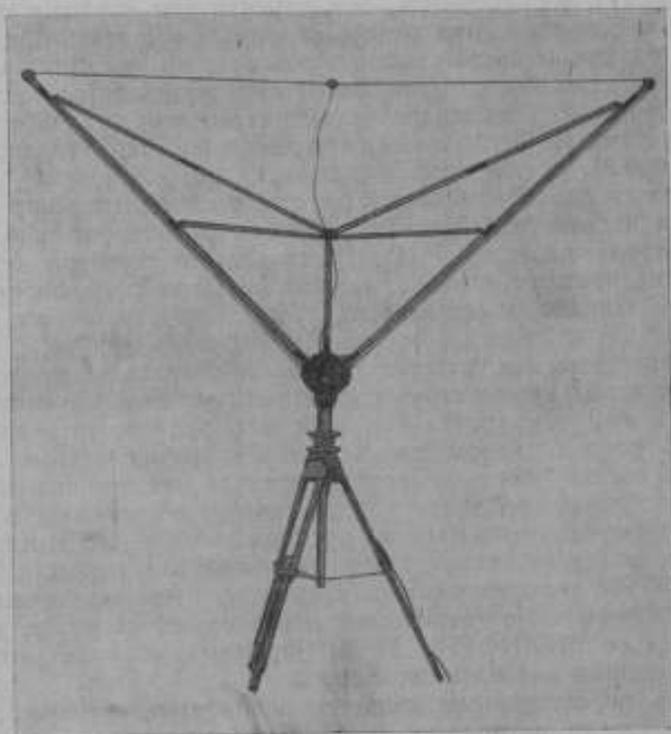


Рис. 5. Образцовый резонансный диполь

рассчитать действующую высоту и, если известна с высокой степенью точности сила тока, протекающего по антенне, можно определить поле в месте размещения антенны.

На рис. 5 показан один из образцовых резонансных диполей. В центре помещен термопреобразователь для точного измерения высокочастотного тока.

На более высоких частотах, где в качестве измерительных применяют рупорные антенны, как правило, градуировку антенн ведут методом взаимности, а поверку рабочих приборов —

методом замещения. Погрешность градуировки рупорных антенн порядка 5%.

Чрезвычайно важен в радионизмерениях раздел измерения параметров цепей на высоких и сверхвысоких частотах. Методы и средства для измерения параметров цепей в различных участках диапазона радикально различаются. В относительно низкочастотном участке — это высокочастотные мосты. Сейчас они работают на частотах примерно до 300 Мгц. Образцовые меры в этих участках диапазона представляют собой меры с сосредоточенными постоянными — это емкости или катушки самоиндукции и сопротивления, которые можно рассчитать или аттестовать с очень высокой степенью точности на относительно низких частотах, и можно точно рассчитать поправку на частотный ход. В частности, цилиндрический конденсатор, разработанный в свое время А. Л. Гроховским, аттестован таким способом до частот 300 Мгц с погрешностью порядка 0,01%.

Надо заметить, что высокочастотные мосты в районе частот порядка нескольких мегагерц работают довольно хорошо, так, на частотах порядка 1 Мгц погрешность прибора порядка 0,05%, на частотах в несколько сот мегагерц погрешность уже 1,5—2%. Однако, к сожалению, лучших приборов пока мы не имеем.

На сверхвысоких частотах в качестве образцовых средств измерения используют нагрузки с известным коэффициентом отражения как в коаксиальном, так и в волноводных трактах, а также рефлектометры, импедометры и измерительные линии. На наш взгляд, для волноводных трактов наилучшими эталонными свойствами обладает нагрузка с индуктивными полусилиндрическими диафрагмами, предложенная в НБЭ Кернсом. Ее можно рассчитать с высокой степенью точности и во ВНИИФТРИ ее применяют как одну из наиболее точных нагрузок. Коэффициент отражения волноводных нагрузок, разработанный во ВНИИФТРИ М. А. Черемных, обладает высоким постоянством в диапазоне волновода.

Очень перспективным является разрабатываемый в Сибирском институте метрологии В. П. Петровым метод измерения коэффициентов отражения, при котором в большом числе ячеек по длине измерительной линии снимают дискретное распределение поля, а затем данные измерений обрабатывают на вычислительной машине по известному алгоритму, в результате чего точность резко повышается. Погрешность измерения в коаксиальных трактах по этому методу приближается к 0,5%, что является очень хорошим результатом.

Важную область представляют измерения интенсивности высокочастотных шумов. В качестве исходного средства для таких измерений применяют эталон в виде абсолютно черного тела (согласованной нагрузки), нагретого до известной температуры. Шумовое радионизлучение такого эталона можно

рассчитать очень точно, с погрешностью порядка нескольких сотых долей децибела. В низележащем разряде применяют газоразрядный генератор шума. Значение единицы передается к нему при помощи широкодиапазонного компаратора (рис. 6). Компаратор работает в диапазоне от 1000 до 16 700 Мгц и позволяет аттестовать образцовые средства с погрешностью порядка 0,15—0,2 дб на любой из частот этого диапазона.

Важную роль в радиотехнике играют применяемые в СССР методы измерения ослаблений, в общем идентичные с такими же методами, применяемыми в метрологических организациях других стран. Это преимущественно преобразование сигналов

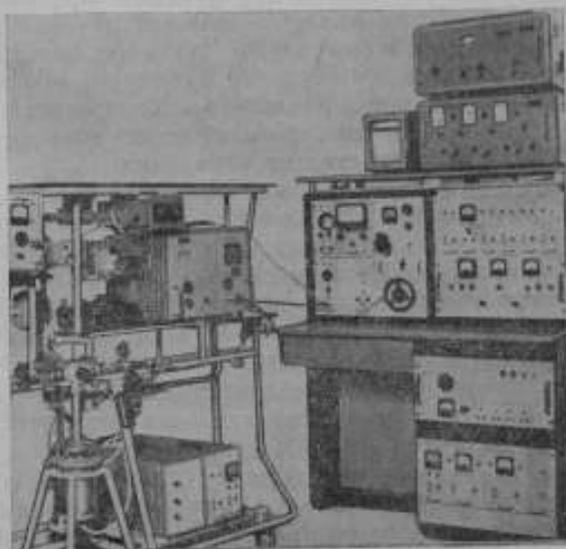


Рис. 6. Образцовый компаратор шума

высокой частоты в сигнал промежуточной частоты с дальнейшим компарированием ослабления. Такие методы разрабатывают как в системе метрологических учреждений, так и в промышленности. Сейчас хорошие успехи имеются в этой области благодаря применению разновидности когерентного приема, в результате чего удается значительно повысить чувствительность приемников и на базе этого расширить диапазон измеряемых отношений интенсивности сигналов до 100—120 дб.

В заключение остановимся на некоторых задачах и перспективах в области радиотехнических измерений.

Система образцовых средств, сложившаяся сейчас в СССР, формировалась преимущественно под давлением необходимости удовлетворения насущных вужд радиотехнической

промышленности. Существующая система образцовых средств в той или иной степени удовлетворяет первоочередным нуждам радиотехнической промышленности, но нам необходимо перейти на создание комплекса эталонов и образцовых средств, рационально увязанных с системой рабочих средств измерения и обеспечивающих наиболее экономным способом все многообразие потребностей радиоэлектроники. Пути и задачи, которые должны быть решены в процессе создания такого комплекса, следующие.

Первая задача — максимальная унификация самих объектов измерения, параметров радиотехнических сигналов и цепей, группирование этих объектов по сходным признакам с тем, чтобы обеспечить минимальную номенклатуру эталонов. Решение этой задачи имеет колоссальное значение, даже не столько для эталонных средств, сколько для рабочих приборов, потому, что, унифицируя параметры радиотехнических сигналов и цепей, подлежащих измерению, можно существенно сократить и модифицировать парк рабочих средств измерения.

Далее, важнейшей задачей является разработка методов и средств компарирования с высокой точностью однородных величин, существенно отличающихся по диапазонам значений и частот, так как сейчас приходится создавать различные исходные образцовые средства для разных диапазонов измеряемых величин и частот. Некоторые успехи в этой области уже имеются. Например, установка для измерения шумов, о которой упоминалось выше, позволяет сравнивать уровень шумовых сигналов, существенно отличающихся один от другого.

Следующая задача — это расчленение градуировки и поверки приборов на две части: градуировку преобразователя, и поверку логической части прибора. Последняя во многих случаях может сводиться к подаче на прибор ограниченного числа стандартных сигналов и проверке того, как производится обработка сигнала в логической части прибора.

Очень важна автоматизация поверочных средств, которая позволит уменьшить количество приборов и сократить число разрядов в поверочных схемах.

Не менее важно изыскать пути передачи эталонных и образцовых сигналов по каналам связи. Сейчас мы имеем опыт только передачи сигналов времени и частоты, однако возможности решения задачи поверки на местах путем передачи эталонных сигналов по каналам связи в радиотехнике далеко не исчерпаны.

Чрезвычайно важна стандартизация измерений. Она должна идти главным образом по пути выработки стандартных наборов параметров, характеризующих радиотехнические аппараты, радиотехнические средства. Это дает возможность сокращать и унифицировать номенклатуру приборов.

Конечно не снимается и всегда актуальна задача повышения точности в любых звеньях как рабочих, так и образцовых радиотехнических средств измерения, так как потребности промышленности все время сигнализируют об этом. В радиотехнике, как может быть нигде, ситуация сейчас такова, что точность, реализованная в образцовых средствах, практически немедленно же реализуется в рабочих приборах, и снова возникает задача получения запаса по точности, который позволил бы вести поверку.

Очевидно, для выполнения всех этих задач необходимо тесное содружество метрологов с физиками.

Поступила в редакцию

11/11 1969 г.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ В ОБЛАСТИ РАДИОСПЕКТРОСКОПИИ

Как известно, радиоспектроскопия занимается изучением резонансных взаимодействий вещества, в широком смысле этого слова, с радиочастотным излучением. Именно резонансный характер этих взаимодействий объясняет то обстоятельство, что отдельные направления радиоспектроскопии, как правило, содержат в своем названии слово «резонанс». В зависимости от того, какой объект взаимодействует с радиочастотным излучением, мы имеем дело либо с ядерным магнитным резонансом (ЯМР), либо с электронным парамагнитным (ЭПР), либо с ядерным квадрупольным (ЯКР), либо с другими комбинируемыми видами резонанса. Все эти резонансные явления легли в основу чрезвычайно эффективных методов изучения микроскопических свойств вещества.

Ниже мы остановимся только на проблемах, стоящих в области радиоспектроскопии ЭПР, поскольку этот метод нашел самое широкое признание и распространение и именно в этой области несколько лет назад были начаты метрологические работы в лаборатории радиоспектроскопии ВНИИФТРИ.

Быстрое развитие метода ЭПР объяснялось в основном двумя причинами. Во-первых, уже вскоре после первых успешных опытов Е. К. Завойского в 1944 г. (за открытие явления ЭПР Е. К. Завойскому была присуждена впоследствии Ленинская премия) стало ясно, какими большими аналитическими возможностями обладает метод ЭПР. Во-вторых, к концу 40-х годов довольно хорошо была развита техника измерений на сверхвысоких частотах. Это способствовало быстрому освоению наиболее благоприятного для исследований ЭПР сантиметрового диапазона и разработке большого количества спектрометров ЭПР различных типов.

Опуская подробности развития спектроскопии ЭПР, отметим, что в настоящее время трудно представить современную лабораторию, занимающуюся теми или иными физико-химическими исследованиями, в которой не было бы радиоспектрометра ЭПР или ЯМР.

В основе метода ЭПР лежит, как уже упоминалось, резонансное поглощение радиочастотного излучения парамагнитными частицами или центрами, находящимися под одновременным действием постоянного и радиочастотного магнитных полей. При этом должно выполняться условие $\omega = \gamma H$, где ω — частота приложенного радиочастотного поля, γ — гиромагнитное отношение исследуемой парамагнитной частицы; H — постоянное магнитное поле [1].

Парамагнитными центрами являются: ионы элементов переходных групп (железа, платины), редкоземельные ионы, свободные радикалы и другие атомные и молекулярные образования, имеющие отличный от нуля магнитный момент, связанный с электронной оболочкой.

подавляющее большинство веществ, в которых парамагнитные центры имеются постоянно или создаются в ходе исследования, можно изучать методом ЭПР.

Сигналы ЭПР, зарегистрированные общепринятыми методами при медленной развертке магнитного поля, характеризуются следующими параметрами: шириной на уровне 0,5, g -фактором, тонкой и сверхтонкой структурой и временами релаксации. Эти параметры спектра ЭПР несут информацию о внутренних свойствах парамагнитного центра, о взаимодействиях парамагнитных центров друг с другом и с окружающими их частицами. Число объектов, доступных для изучения методом ЭПР, не поддается исчислению. Если добавить к этому, что метод ЭПР является неразрушающим и обладает исключительно высокой чувствительностью, достигающей 10^{-13} моля дифенилпикрилгидразила (ДФПГ), становится ясно, почему спектрометр ЭПР можно обнаружить сегодня в сотнях лабораторий, занимающихся теми или иными физическими, химическими, биологическими и другими проблемами, поскольку парамагнитные центры есть повсюду.

Справедливости ради нужно сказать, что метод ЯМР не менее эффективен и распространен столь же широко, как и ЭПР.

Остановимся несколько подробнее на метрологических задачах в области измерения параметров спектров ЭПР. Учитывая, что в стране имеется около 500 действующих спектрометров ЭПР, понятно, что этот вопрос не является праздным.

Если говорить об измерениях g -фактора, ширины линий ЭПР, о сверхтонкой и тонкой структуре спектров, т. е. об измерениях параметров, связанных исключительно с измерениями

магнитного поля, то дело обстоит относительно неплохо, поскольку здесь используются ЯМР-измерители поля, обеспечивающие точность, до 0,001%. Измерение параметров ЭПР в этом случае сводится к измерению частоты, что и обуславливает высокую точность.

Применение ЯМР-измерителей поля в ЭПР-спектроскопии — один из примеров плодотворной связи различных областей радиоспектроскопии.

Для измерения ширины спектра и расстояния между компонентами сверхтонкой структуры используют иногда так называемые внутренние калибраторы поля. Роль таких калибраторов играют образцы, весом в несколько микрограммов, содержащие парамагнитные центры с подходящей тонкой и сверхтонкой структурой. Спектр таких образцов образует на диаграммной ленте масштабную сетку магнитного поля.

Одним из наиболее удобных калибраторов подобного рода являются монокристаллы MgO с примесью двухвалентного марганца или порошок $CaCO_3$ с той же примесью. Эти вещества помещают в резонатор спектрометра вместе с исследуемым образцом.

Перейдем теперь к проблеме измерения количества парамагнитных центров. Наиболее распространенным при этом является относительный метод, когда последовательно во времени и в одних и тех же условиях записывают спектры исследуемого и калибровочного образцов, количество парамагнитных центров в последнем считается известным. Определяя затем площадь под огибающей спектра, прямо пропорциональную количеству парамагнитных центров, можно найти количество их в исследуемом образце.

На первый взгляд все обстоит хорошо, если иметь надежные калибровочные образцы и удобные методы интегрирования спектров, что необходимо для определения площади под огибающей спектра. Большинство калибровочных образцов изготавливают изДФПГ, каждая молекула которого — парамагнитная. Зная молекулярный вес этого соединения и взяв известную навеску, можно, казалось бы, получить наперед заданное количество парамагнитных центров. Однако это не совсем верно, так как поликристаллическийДФПГ, полученный различными методами и из различных растворителей, содержит различное, трудно контролируемое количество кристаллизационного растворителя, иногда до 100% по весу [2]. Кроме того,ДФПГ, изготовленный различными методами, имеет различные параметры [3]. По этой причине, а также вследствие старения калибровочные образцы в различных лабораториях согласуются друг с другом с весьма низкой точностью. Впрочем, о точности говорить трудно: расхождения достигают двух порядков даже в калибровочных образцах с количеством парамагнитных центров порядка 10^{16} .

При попытках создать калибровочные образцы с количеством парамагнитных центров 10^{15} возникают дополнительные трудности. Дело в том, что с уменьшением размера образца возрастает роль его поверхности, поэтому больше сказывается влияние факторов, приводящих к разложению ДФПГ (в частности, кислорода). Кроме того, вес образца ДФПГ с количеством парамагнитных центров порядка 10^{15} составляет менее 1 мкг; непосредственно взвесить такое количество ДФПГ в обычных лабораторных условиях невозможно.

Самостоятельную проблему представляет задача поместить и фиксировать эту пылинку на дне ампулы длиной не менее 60 мм и с внутренним диаметром порядка 1—2 мм, причем сделать ампулу весом меньше нескольких граммов трудно. Иногда разбавляют относительно большую навеску ДФПГ в соответствующем количестве инертного вещества, и после тщательного перемешивания берут нужную навеску смеси. При этом, кроме ошибки, связанной со старением и разложением ДФПГ вследствие взаимодействия с поверхностью частиц разбавителя [4], добавляется ошибка, связанная с вероятностью, что в навеску не попало желаемое количество парамагнитных центров, т. е. вызванная недостаточной однородностью смеси. Проблема создания таких образцов не решена, и поэтому количественные (концентрационные) измерения в ЭПР-спектроскопии в интервале от 10^{10} до 10^{14} парамагнитных центров характеризуются крайне низкой точностью (как уже сказано, расхождения при измерении количества парамагнитных центров в одном и том же образце в различных лабораториях достигают двух порядков). Выход из этого положения был бы найден в том случае, если бы удалось найти абсолютный метод измерения количества парамагнитных центров, основанный на использовании физических констант и результатов измерений параметров спектра ЭПР, и создать соответствующую установку для таких измерений.

Работы в этом направлении были проведены в начале 60-х годов в США [5] и позднее в Социалистической республике Румынии [6], но предложенные абсолютные методы не позволяют измерять менее 10^{15} парамагнитных центров, тогда как наибольший практический интерес представляют образцы с меньшим количеством парамагнитных центров.

В 1964 г. во ВНИИФТРИ в лаборатории радиоспектроскопии был предложен абсолютный метод [7], позволяющий проводить измерения вплоть до 10^{13} парамагнитных центров в образце с точностью порядка 10% на нижнем пределе. К концу 1966 г. был изготовлен лабораторный макет абсолютного спектрометра и аттестованы первые образцы. В настоящее время заканчивается подготовка к выпуску первых калибровочных образцов из вакуумированного ДФПГ и из некоторых других веществ.

Гарантийный срок службы наших образцов будет сначала равен 1 г. Работы по исследованию веществ с более высокой стабильностью парамагнитных центров будут продолжены, чтобы увеличить срок службы калибровочных образцов.

Другой важной задачей является повышение чувствительности абсолютного спектрометра, чтобы на нем можно было аттестовать образцы для измерения предельной чувствительности рабочих спектрометров ЭПР.

Самостоятельную задачу представляет выпуск аттестованных внутренних калибраторов поля на основе, скажем, MgO с примесью марганца. Такие образцы, аттестованные по величине расщепления, по g -фактору отдельных компонентов и по количеству парамагнитных центров, станут довольно универсальными калибровочными образцами.

Важной характеристикой любого спектрометра ЭПР является, кроме чувствительности, его разрешающая способность. Она определяется стабильностью частоты кlistронного генератора, стабильностью и однородностью магнитного поля. Для определения разрешающей способности того или иного спектрометра нужны соответствующие образцы с заведомо известной формой огибающей спектра, причем наибольший интерес представляют образцы со спектром, состоящим из узких, желательнее менее 1 гс ($1 \cdot 10^{-4} \text{ гл}$), и близко расположенных линий.

Создание таких образцов — наиболее трудная задача, поскольку аттестацию их следует вести на уникальном эталонном спектрометре, который предстоит разрабатывать специально.

Наконец, к числу метрологических задач в области спектроскопии ЭПР мы относим разработку образцового метода измерения времени спин-решеточной релаксации. Работы в этом направлении начаты в Казанском филиале ВНИИФТРИ под руководством П. Г. Тишкова.

В заключение следует заметить следующее. Довольно часто можно услышать мнение о том, что спектроскопия ЭПР существует и развивается вполне благополучно и метрологические работы в этой области не являются важными. В связи с этим стоит напомнить, во-первых, известное высказывание Д. И. Менделеева о том, что точная наука немислима без меры, и, во-вторых, что академик П. Л. Капица придерживается того мнения, что всякое повышение точности измерений на один порядок приводит как минимум к одному крупному научному открытию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bloch F. Phys. Rev., 1946, v. 70, p. 460; Bloembergen N., Purcell E. M., Pound R. V. Phys. Rev., 1948, v. 73, p. 679; Альтшудер С. А., Козырев Б. М. Электронный парамагнитный резонанс, М., Физматгиз, 1961.
2. Lyons J. A., Watson W. F. J. «Polymer Sci.», 1955, v. 18, p. 141. Lothe J. J., Eia G. Acta Chemica Scand., 1958, v. 12, p. 1535

3. Арбузов А. Е., Валитова Ф. Г., Гарифьянов Н. С., Козырев Б. М. О парамагнитном резонансе α - α -дифенил- β -пикрилгидразила, полученного из различных растворителей. ДАН СССР, 1959, т. 126, № 4, стр. 774; Яблоков Ю. В. Парамагнитный резонанс в различных видах α , α -дифенил- β -пикрилгидразила. ДАН СССР, 1960, т. 133, № 2, стр. 424; Swagup P., Mirsa B. N. Z. Phys., 1960, v. 159, p. 384.
4. Matsunaga I., McDowell C. A. Canad. J. Chem., 1960, v. 38, p. 724; Bar-Eli K. H., Weiss K. J. Phys. Chem., 1966, v. 70, p. 1677.
5. Iariy A., Gordon J. P. Rev. Sci. Instr., 1961, v. 32, p. 462.
6. Bódi A., Cioara P. Studia Univ. Babeş-Bolyai. Ser. math.-phys., 1965, v. 10, p. 105.
7. Лесков А. С. и Кубарев А. В. Абсолютный метод измерения количества стабильных парамагнитных центров. «Измерительная техника», 1965, № 5, стр. 27.

Поступила в редакцию

11/II 1969 г.

ПРОБЛЕМЫ МЕТРОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ

Основные положения метрологии, являясь общими для всех видов измерений и измерительной техники, могут быть распространены и на медицинские измерения, на медицинскую измерительную технику.

Однако в каждом отдельном случае, когда речь идет о так называемой отраслевой метрологии, к которой можно отнести строительную и медицинскую метрологию, возникают новые задачи и направления, связанные со спецификой самого объекта исследования, с особенностями измерения его параметров. Поэтому, не останавливаясь на общих положениях медицинской метрологии, хотелось бы большее внимание уделить вопросам, связанным со специфическими особенностями медицинских измерений, а следовательно, и медицинской метрологии. Прежде чем говорить о ее направлениях, задачах и проблемах, остановимся на измерениях в медицине и биологии, на состоянии метрологии этих измерений и медицинского приборостроения.

Измерения в медицине в самом общем виде можно классифицировать следующим образом:

измерения при диагностике, когда по измеряемым параметрам биологического объекта судят о состоянии, работоспособности и функционировании отдельных его органов и систем;

измерения при терапии, когда на биологический объект оказывают какое-то воздействие и по реакции или отклику системы судят о величине или направленности этих воздействий. При этом измеряют параметры как самого биологического объекта, так и искусственных воздействий;

измерения в гигиене, когда исследуют влияние различных факторов окружающей среды на организм и измеряют параметры как окружающей среды, так и биологического объекта.

В свою очередь, измеряемые параметры в медицине и биологии можно выделить в следующие группы: клинко-физиологические параметры отдельных органов и систем организма, таких как сердечно-сосудистая, дыхательная, центральная нервная, вегетативная нервная, нервно-мышечная системы и т. д.; биофизические и биохимические параметры крови, мочи, лимфы, спинномозговой жидкости, биологических субстратов и т. д.; параметры искусственных воздействий, включая фармакологию, наркоз, стимуляцию различного вида, искусственное дыхание, искусственное кровообращение и т. д.; параметры естественных воздействий, т. е. параметры окружающей среды — шумы, вибрации, излучения и т. д.

Даже из такой грубой классификации видно, что в медицине измеряют в настоящее время огромное количество параметров как самого биологического объекта, так и параметров оказываемых на него естественных и искусственных воздействий, и применяют почти все виды измерений. Разработано огромное количество методик измерений медико-биологических величин, и находится в эксплуатации огромный парк медицинской измерительной техники самого различного типа. Многопрофильность и широта применяемых видов измерений и измерительной техники являются, пожалуй, одной из характерных особенностей отраслевой метрологии, а в данном случае медицинской метрологии, которые создают определенные трудности для специалистов, работающих в этих областях.

Достаточно сказать, что в настоящее время измеряют до 30 параметров, характеризующих только деятельность сердца и периферической части кровообращения, и применяют многие виды измерений: электрические (электрической активности сердца, т. е. электрического поля сердца), магнитные (напряженности магнитного поля миокарда), акустические (шумов и тонов сердца) и т. д.

Несмотря на большую роль измерений и измерительной техники в медицине и биологии, до сих пор этим вопросам не уделяли должного внимания как у нас, так и за рубежом. В настоящее время нет ни одной монографии, наиболее полно включающей все виды измерений в медицине. Поэтому основной задачей созданного во ВНИИФТРИ отдела медицинской метрологии явилось обобщение и анализ отечественных и зарубежных работ по этому вопросу, охватывающих методики медицинских измерений, датчики медико-биологической информации и медицинскую измерительную технику.

Анализ методик медицинских измерений позволил сделать следующие выводы:

1. Один и тот же параметр измеряют в медицине и биологии, как правило, несколькими методами, число их порой доходит до 10 и более, как например, при измерениях параметров сердечно-сосудистой системы (давления крови, скорости кровотока и др.),

При этом отсутствуют метрологические исследования методик, нет сравнительной оценки различных методов, неясны преимущества одной методики перед другой, не проводились работы по выявлению информативности этих методик.

2. В большинстве случаев достоверность измеряемых с помощью этих методик медико-биологических величин низка. Видимо, это объясняется тем, что очень трудно установить связь между физическими параметрами измерений и физиологическими процессами, протекающими в организме. Если такая связь установлена для широко распространенной методики электрокардиографических исследований, например, между компонентами («зубцами») электрокардиограммы и процессами при сердечной деятельности, то этого нельзя сказать про большинство остальных измеряемых величин и параметров.

3. Велики методические погрешности измерений, обусловленные рядом неучитываемых факторов, таких как индивидуальный разброс измеряемых величин в зависимости от пола, возраста, конституции тела и т. д., вариабельность их во времени, в течение даже суток, в зависимости от времени года и т. д. Большие методические погрешности вносят различные психо-физиологические факторы, требующие соблюдения определенных условий эксперимента, что большей частью трудно выполнимо, и факторы, связанные с самой процедурой измерения, такие как место отведения или измерения тех или иных величин на теле человека, согласование датчика с биологическим объектом и т. д.

В качестве примера можно привести широко распространенную методику электрокардиографических исследований. При измерении электрокардиограммы, особенно в грудных отведениях, совершенно не принимают во внимание приводящие к большим погрешностям измерений такие факторы, как размеры грудной клетки, которые различны для разных людей, расположение сердца в грудной клетке, направление и поворот электрической оси сердца по отношению к точкам отведения электрокардиограммы, проводимость тканей от сердца до точек отведений, межэлектродное сопротивление и т. д.

Большие методические погрешности медицинских измерений объясняются, видимо, еще тем, что при прямых измерениях вносятся искажения в сам объект исследования, и тем самым нарушается физиологичность эксперимента, как, например, при измерении венозного и артериального давления с помощью электроманометров. При косвенных измерениях этих величин влияют те же факторы, о которых сказано выше.

Нами был обобщен также материал по отечественному и зарубежному медицинскому приборостроению и оценены технические и метрологические характеристики медицинских приборов.

Во всех без исключения крупных странах выпускают медицинские приборы очень большой номенклатуры. В СССР, например, за годы Советской власти выпущено приборов около 5000 наименований, правда, сюда входят оборудование и инструмент, но тем не менее, цифра довольно внушительная. Только электронных приборов выпущено около 800 наименований. В настоящее время одних только электромедицинских приборов выпускают серийно около 200 наименований. Ежегодно разрабатывают около 30 новых приборов и аппаратов. Причем если оценить аппаратные погрешности медицинских приборов, то они в среднем составляют 10% и более, что не всегда удовлетворяет потребности медицины.

Выпускаемые образцы медицинских приборов не проходят государственных испытаний. Испытание опытных образцов приборов ограничивается только их технической приемкой по специальной инструкции Министерства здравоохранения СССР, которая никак не отвечает требованиям государственных испытаний измерительной техники.

Эксплуатируемую медицинскую технику, кроме дозиметрической аппаратуры, почти не проверяют. Объясняется это отсутствием ведомственной метрологической службы в системе Министерства здравоохранения СССР. Насколько нам известно, такая же картина, если не хуже, имеется и за рубежом. Понятно, что низкая точность измерений и несоблюдение их единства приводят в медицине и биологии к несопоставимости результатов, полученных в разных клиниках, и порой кошибочным диагнозам. Это относится и к научно-исследовательским физиологическим работам, проводимым в различных областях медицины.

Исходя из всего этого, можно сформулировать стоящие перед медицинской метрологией основные проблемы:

1. Разработка методов и средств для оценки погрешностей медицинских измерений (имеются в виду погрешности как методические, так и аппаратные). Пути решения этих задач следующие:

1) Постановка специальных физиологических экспериментов по выявлению и оценке различных медико-физиологических факторов, влияющих на методические погрешности измерений.

Эту работу мы думаем проводить совместно с Министерством здравоохранения СССР.

2) Применение методов математического и физического моделирования для оценки методических погрешностей.

Предполагается создать модели, на которых можно изучать влияние различных факторов на погрешности измерений, особенно в тех случаях, когда это трудно выполнимо на живом биологическом объекте (при патологических состояниях).

3) Применение теории тестов к оценке методических погрешностей медицинских измерений. Тесты дают возможность

локально изучать отдельные функции биологических объектов и при статистических методах оценок определять пригодность, достоверность, надежность той или иной методики измерений.

Предполагается разработать методы и критерии для оценки аппаратурных погрешностей и дать научно-техническое обоснование допустимой погрешности в каждом отдельном случае, принимая за основу диагностические ценности измеряемого параметра. При этом мы исходим из того, что задаваемое значение аппаратурных погрешностей должно быть по крайней мере меньше относительных значений измеряемого параметра, по которым ставят диагноз двух близких заболеваний или состояний, с учетом, конечно, индивидуального разброса этих параметров для разных людей.

2. Разработка методов и средств для поверки и испытаний медицинской аппаратуры.

Имеются различные пути решения этого вопроса: например, использование для этих целей уже имеющихся исходных образцовых средств, с помощью которых можно производить и испытание различных характеристик медицинских приборов. При этом для достижения желаемого эффекта, т. е. единства измерений, надо стандартизовать все методы их, применяемые в медицине, и в каждом отдельном случае выявлять и оценивать методические погрешности измерений, которые в большинстве случаев перекрывают аппаратурные и к тому же не всегда поддаются оценке. Поэтому нам кажется более интересным рассмотрение характеристик медицинских приборов в совокупности с объектом исследования и калибровка всего тракта измерений, включая и объект исследования. Важность такого подхода можно проиллюстрировать на следующем примере.

Приборы для измерения шумов и тонов сердца (фонендоскопы) можно калибровать, например, на специальных установках от образцовых громкоговорителей. Однако при измерениях в зависимости от места измерения шумов и тонов сердца на грудной клетке, от степени прижатия датчика к телу, от упругих свойств тканей и других факторов, влияющих на методические погрешности измерений, в корне изменяются акустические характеристики тракта, и в результате мы получаем искаженную информацию о сердечной деятельности, которая перекрывает аппаратурные погрешности измерений.

Этих ошибок можно избежать, если использовать, например, систему модуляции воздушного потока на входе и улавливать сигналы с помощью микрофона через грудную клетку, калибруя таким образом весь тракт измерений.

Наконец, имеется путь создания специальных образцовых мер и приборов, например, образцовых мер для крови, лимфы, и других субстратов биологического происхождения: образцовых электрокардиографов, энцефалографов, с показаниями которых можно сличать характеристики рабочих приборов. Эта

задача совсем не из легких и не всегда реализуема. Трудно, например, говорить о создании образцовых мер биологического происхождения, не обеспечив жизнедеятельность таких субстратов вне биологического объекта.

3. Организация и осуществление контроля за этапами разработки медицинских приборов и государственные испытания.

В настоящее время, помимо Министерства медицинской промышленности, разработкой медицинских приборов занимается ряд ведомств (МРП, МЭП, МОП и др.) и каждое из них руководствуется и пользуется своими инструкциями и положениями. Поэтому совместно с организациями Министерства здравоохранения СССР в настоящее время разрабатывается проект положения о порядке прохождения и разработки научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области медицинской техники, включая государственные испытания.

4. Организация и осуществление поверки медицинских приборов.

Решение этой проблемы надо начать с организации ведомственной метрологической службы в системе Министерства здравоохранения СССР. Сейчас готовится проект положения, где основное внимание уделено вопросам поверки эксплуатируемой медицинской техники и связи с метрологической службой через лаборатории госнадзора и отдел метрологии (медицинской) ВНИИФТРИ.

Наряду с повышением точности медицинских измерений немаловажное значение приобретает автоматизация результатов измерений.

На очереди стоят вопросы контроля, диагностики и управления различными функциями организма с применением аппаратов искусственного дыхания и кровообращения (машинная диагностика состояний и заболеваний организма), которые невозможно решить без точных методов измерения и автоматизации процессов сбора и обработки информации.

Широко применяемые в настоящее время машинные алгоритмы для диагностики заболеваний сердечно-сосудистой системы по электрокардиограммам не привели к должным результатам из-за больших погрешностей измерений.

Наконец, в задачи медицинской метрологии входят вопросы стандартизации в медицине и биологии. Готовится проект положения об организации службы стандартизации в Министерстве здравоохранения СССР. Нам кажется, что с учетом специфики этого Министерства работы следует проводить по следующим направлениям: стандартизация методик измерений, медико-технических требований и условий, предъявляемых к медицинским аппаратам, стандартизация терминологии, используемых обозначений и т. д., методов поверки и испытаний медицинских приборов.

Следует обратить внимание на стандартизацию чисто медицинского профиля — стандартизацию значений параметров или совокупности этих параметров при измерениях в норме и при различной патологии. Такие данные отсутствуют в медицине. Наконец, имеет смысл ставить вопрос об организации в медицине службы стандартных справочных данных о структуре, функциях и свойствах биологических объектов. Несомненно, необходима постановка работ по международной стандартизации в области медицинской метрологии.

Поступила в редакцию

11/II 1969 г.

СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Методы электрических и магнитных измерений столь разнообразны и перспективы их развития столь широки, что кратко их осветить затруднительно, поэтому авторы ограничились лишь рассмотрением наиболее важных работ и задач в области электрических и магнитных измерений, выполненных в метрологических институтах СССР*.

Первые метрологические работы в области электрических измерений в России можно отнести к 1900 г., когда по инициативе Д. И. Менделеева в Главной палате мер и весов было открыто электрическое отделение.

Развитие электротехники, начало промышленного применения электроэнергии и необходимость учета энергии для расчета с потребителями определили основную метрологическую задачу этого отделения — организацию поверки и государственных испытаний счетчиков электрической энергии и стрелочных электронизмерительных приборов, выпускаемых иностранными фирмами.

В то время не было ни отечественного приборостроения, ни отечественных эталонов электрических единиц; в качестве образцовых мер при поверках применяли катушки электрического сопротивления и нормальные элементы, аттестованные в иностранных метрологических учреждениях.

* Содержание доклада в сокращенном виде опубликовано в журнале «Измерительная техника», № 9, 1969 г.

После Лондонской международной конференции по электрическим единицам и эталонам (в 1908 г.) и принятия ею спецификации для осуществления эталонов международных электрических единиц (ома, ампера и вольта) в Главной палате мер и весов А. Н. Георгиевским и М. Ф. Маликовым были начаты работы по созданию ртутных эталонов ома, которые успешно завершились в 1913 г. К тому же периоду относятся первые работы Главной палаты по изготовлению нормальных элементов, а также работы по воспроизведению ампера с помощью серебряного вольтметра. Эти работы явились основой для создания метрологической базы в России.

Становление и широкое развитие всего народного хозяйства страны после Великой Октябрьской социалистической революции, развитие отечественной энергетики, электропромышленности, электромашиностроения потребовали от метрологических и поверочных организаций Советского Союза решения большого числа сложных теоретических и практических вопросов, связанных с поддержанием на требуемом уровне единства электрических и магнитных измерений в стране.

В 1918 г. по инициативе Л. В. Залуцкого организуется магнитная лаборатория, которая на первом этапе была призвана решить проблему испытаний магнитных материалов, необходимых для электромашиностроения. К этому времени можно отнести начало развития в стране магнитных измерений. Дальнейшее развитие работ в этой области связано с созданием эталонов, воспроизводящих единицы магнитных величин в абсолютной мере. В этом отношении ВНИИМ выступил пионером и способствовал созданию абсолютных эталонов магнитных единиц в других странах. На протяжении всего времени существования магнитной лаборатории эти эталоны совершенствовались и в настоящее время удовлетворяют требованиям народного хозяйства. Большой вклад в упомянутые исследования внесли Е. Т. Чернышев, Б. М. Яновский, проработавшие во ВНИИМ более 40 лет.

Зарождение и становление отечественного электроприборостроения в 1924—1930 гг. выдвинуло новые задачи перед метрологическим институтом. В этот период разрабатывается и исследуется новый тип эталонных и образцовых мер электрического сопротивления, возобновляется изготовление нормальных элементов по улучшенной спецификации, создаются образцовые компенсаторы, делители напряжения, магазины сопротивления и другие образцовые приборы для поверочных целей. Организуется работа по государственным испытаниям типа приборов.

Активная деятельность института была прервана Великой Отечественной войной, во время которой часть оборудования ВНИИМ была эвакуирована в Свердловск, где в 1942 г. организуется филиал ВНИИМ.

В 1944 г. началось восстановление ВНИИМ. Несмотря на большие трудности восстановительного периода, темпы и качество исследовательских метрологических работ в области электрических и магнитных измерений были исключительно высоки. Одним из важнейших результатов их является переход к воспроизведению основных электрических единиц в абсолютной мере. Эти работы, начатые во ВНИИМ еще в 1938 г. Л. В. Залуцким и прерванные войной, возобновились в 1945 г. под руководством Б. М. Яновского. В результате глубоких теоретических и экспериментальных исследований были созданы токовые весы, являющиеся государственным эталоном СССР и воспроизводящие единицу силы тока — ампер с погрешностью 0,001% (рис. 1). В то же время создается групповой расчетный эталон, воспроизводящий единицу индуктивности генри также с погрешностью в 0,001% (рис. 2).

Наличие эталонов ампера и генри обеспечило на первом этапе возможность определения в абсолютной мере значений первичных групповых эталонов вольта, ома и фарады. Однако по мере развития техники требования к точности измерений и воспроизведения единиц возрастали.

Несмотря на многообразие электро- и магнитоизмерительных приборов и устройств, применяемых в народном хозяйстве, действие их, в конечном счете, сводилось либо к измерению параметров электрических цепей (R , L , C , M), либо к оценке величин, характеризующих процессы в этих цепях (I , U , P , B , Φ), в различных режимах и при различных условиях. Поэтому основным первоочередным направлением метрологических работ являлось создание эталонов и всей системы передачи размеров единиц именно этих величин на постоянном и переменном токе.

Современные исследования ряда метрологических институтов показали возможность более точного воспроизведения единицы емкости, а следовательно, и единиц сопротивления и индуктивности с помощью расчетного конденсатора, конструкция

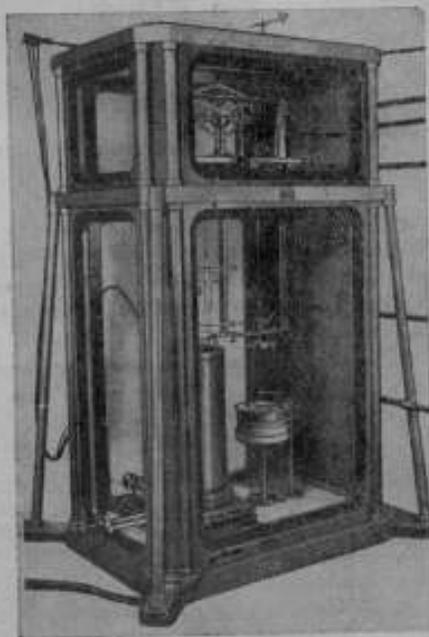


Рис. 1. Государственный эталон единицы силы тока — ампера (токовые весы)

которого удовлетворяет условиям теоремы Томпсона и Лампарда. Емкость такого расчетного конденсатора определяется как функция линейных размеров цилиндрических проводов,

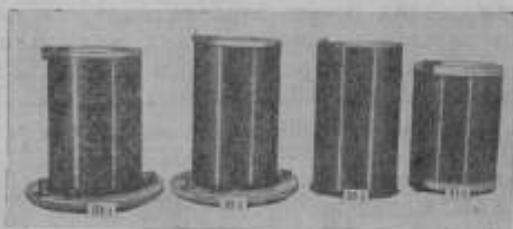


Рис. 2. Групповой расчетный эталон единицы индуктивности

скорости распространения электромагнитных колебаний в вакууме и магнитной постоянной.

Опытные расчетные конденсаторы, созданные во ВНИИМ (рис. 3) и НГИМИП, обеспечивают в настоящее время воспро-

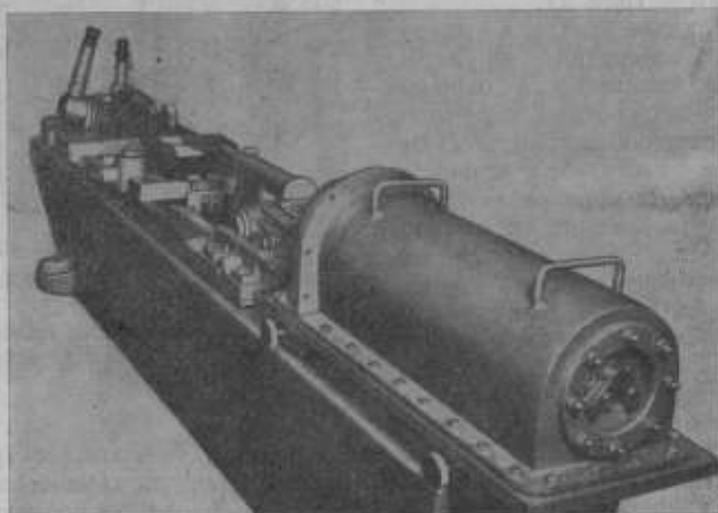


Рис. 3. Расчетный конденсатор ВНИИМ им. Д. И. Менделеева

изведение единицы емкости порядка 1 пф с погрешностью $1 \cdot 10^{-4}\%$. Ведутся работы по повышению точности.

Работа по переходу на новый эталон на основе расчетного конденсатора связана с необходимостью создания комплекса аппаратуры, обеспечивающей хранение и передачу размера

единицы, без которой получаемая точность расчетного конденсатора не может быть практически реализована. На рис. 4 пока-

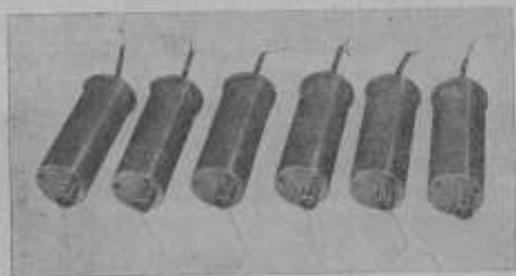


Рис. 4. Конденсаторы (1 пф), входящие в состав рабочего эталона единицы емкости

заны конденсаторы, входящие в состав группового эталона для хранения размера единицы емкости в 1 пф и получающие значение единицы от расчетного конденсатора. Дальнейшая пере-

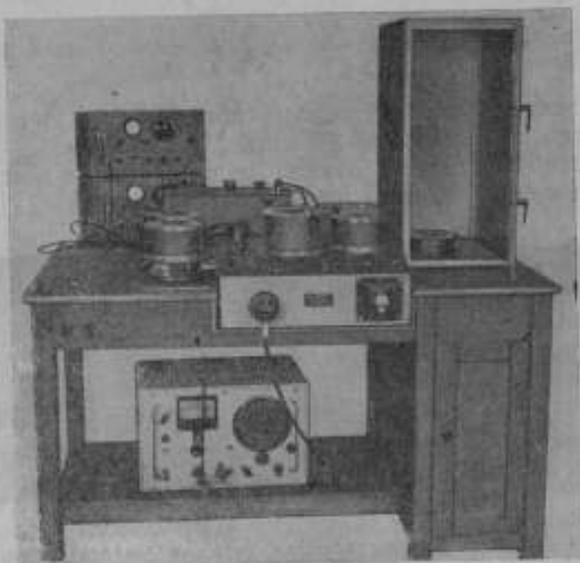


Рис. 5. Емкостный мост типа УМЕ-10-А

дача размера единицы емкости производится при помощи специально разработанного емкостного моста типа УМЕ-10-А (рис. 5), с пределами измерений емкости 1 пф — 100 мкф при

частотах 40 гц — 100 кгц с погрешностью $5 \cdot 10^{-4} \div 1 \cdot 10^{-4}$ (при измерении емкости, превышающей 10 пф), и образцовых мер емкости.

На рис. 6 представлены образцовые конденсаторы с воздушным диэлектриком емкостью от 1 до 4000 пф, а на рис. 7 — об-



Рис. 6. Образцовые конденсаторы с воздушным диэлектриком (емкость 1—4000 пф)

разцовые конденсаторы с твердым диэлектриком (слода, стирол-флекс) емкостью от 0,01 до 10 мкф.

Групповой расчетный эталон индуктивности воспроизводит дольное значение единицы индуктивности порядка $1 \cdot 10^{-2}$ гн при



Рис. 7. Образцовые конденсаторы с твердым диэлектриком (емкость 0,01—10 мкф)

частоте переменного тока 1000 гц. Однако на практике необходимо осуществлять измерения индуктивности от 10^{-6} гн при различных частотах в диапазоне от единиц герца до тысяч мегагерц.

Работы по передаче размера единицы индуктивности и созданию метрологической аппаратуры при частотах до 10 Мгц

выполняются во ВНИИМ, а при более высоких частотах — в Новосибирском научно-исследовательском институте метрологии. Для измерений высшей точности создана аппаратура, состоящая из наборов мер индуктивности и нескольких индуктивно-емкостных мостов.

На рис. 8 приведен внешний вид индуктивно-емкостного моста для передачи размера единицы индуктивности от группового расчетного эталона образцовым мерам высших разрядов. Пределы моста 1 мкГн — 1 Гн, погрешности измерения, в зависимости от пределов, $1 \cdot 10^{-5} \div 2 \cdot 10^{-4}$, диапазон частот 40 Гц — 100 кГц. В течение последних лет существенно снижена погреш-

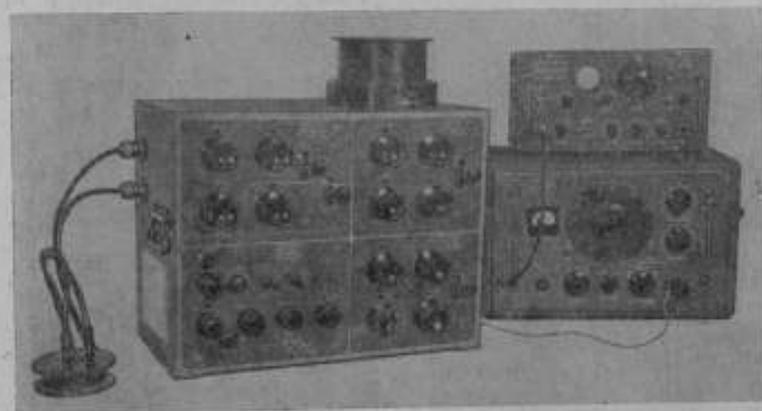


Рис. 8. Индуктивно-емкостный мост типа МИЕ-3

ность воспроизведения единиц магнитной индукции и магнитного потока.

В 1962—1967 гг. был создан новый эталон магнитного потока на основе катушки Кемпбелла (рис. 9), постоянная которой определена по ее геометрическим размерам с погрешностью 0,001%. Единица магнитной индукции воспроизводится групповым эталоном из 7 катушек Гельмгольца (рис. 10) с погрешностью 0,001% в диапазоне индукций $5 \cdot 10^{-5} \div 10^{-4}$ Гн.

Для передачи размера единицы магнитной индукции образцовым мерам и приборам в последние годы получили развитие методы, основанные на явлении свободной и вынужденной ядерной прецессии, которые характеризуются погрешностью $0,0005 \div 0,005\%$ в зависимости от значения магнитной индукции.

Особое внимание уделялось определению гиромангнитного отношения γ протона — важнейшей константы для области как магнитных, так и электрических измерений.

Полученные значения гиромангнитного отношения протона в слабых полях (ВНИИМ) и в сильных полях (ВНИИМ),

представленные в 1968 г. Советским Союзом Консультативному Комитету по электричеству, были учтены Международным бюро мер и весов (МБМВ) как при выводе среднего международного значения γ , так и при определении абсолютного значения ампера. Ведутся работы по воспроизведению ампера через гиромагнитное отношение протона. На рис. 11 представлена основная часть установки для измерения гиромагнитного отношения протона в слабом магнитном поле (ВНИИМ), а на рис. 12 — в сильном поле (ХВНИИМ).

Существенные достижения имеются в области повышения точности хранения ома и вольта и передачи их размеров образцовым рабочим мерам и приборам.

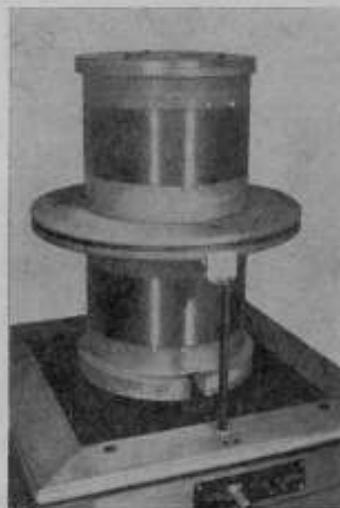


Рис. 9. Эталонная катушка магнитного потока

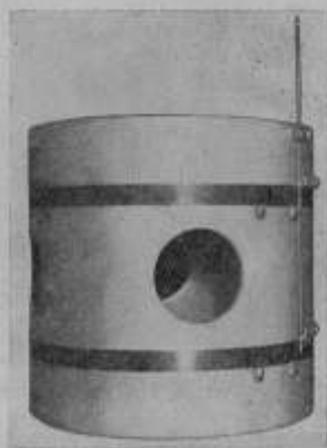


Рис. 10. Эталонная катушка магнитной индукции

Хранение единицы сопротивления осуществляется при помощи созданного и усовершенствованного первичного эталона ома, который в настоящее время состоит из шести герметизированных катушек отечественного производства (ЗИП, Краснодар) с номинальным значением 1 ом. Последние международные сличения в МБМВ в 1967 г. свидетельствуют о высокой стабильности эталона ома. Изменение ома СССР с 1964 по 1967 г. не превышает $0,4 \cdot 10^{-4}\%$. Хранение единицы э. д. с. осуществляется первичным групповым эталоном вольта, состоящим из 20 нормальных элементов, выполненных по усовершенствованной спецификации. Международные сличения эталонов вольта в МБМВ в 1967 г. показали, что изменение эталона СССР за три года не превосходит $0,6 \cdot 10^{-4}\%$. При международных сличениях установлено, что порядок изменений эталонов ома и вольта СССР

тот же, как и для лучших эталонов этих единиц Англии, США, Австралии, что свидетельствует о высоком уровне наших метрологических работ. Этот уровень определяется не только свойствами эталонов, но также и методами и аппаратурой, применяемыми для их сличений и передачи размера единицы образцовым мерам и приборам.

Для взаимных сличений катушек сопротивления, входящих в групповой эталон ома, и для передачи их значений в диапазоне $0,0001-100\,000$ ом с предельной погрешностью результата $1 \cdot 10^{-5}-1 \cdot 10^{-4}\%$ разработаны мост-компаратор и переходные

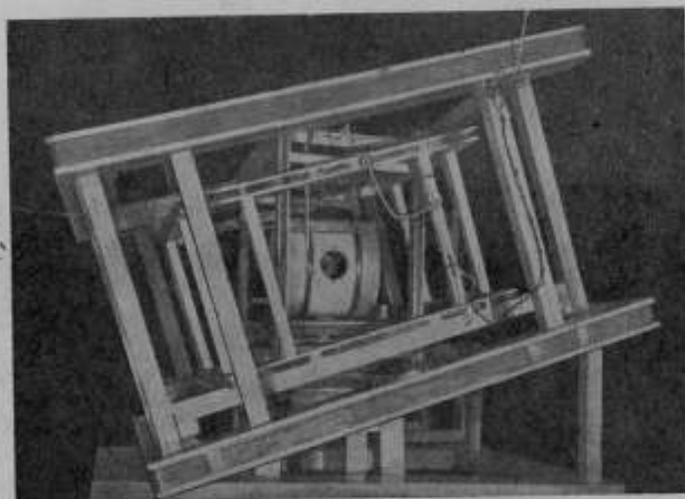


Рис. 11. Основная часть установки для измерения гиромагнитного отношения протона в слабом магнитном поле

меры сопротивления. Ряд модификаций моста-компаратора внедрен в институтах и лабораториях государственного надзора.

Цикл работ по созданию методов и аппаратуры для дальнейшей передачи размера ома от рабочего эталона в 10^5 ом мерам и приборам сопротивления в 10^{14} ом завершился созданием и внедрением в практику метрологических работ ряда новых мер и оригинальных установок. На рис. 13 изображена последняя модель установки для поверки мер и магазинов сопротивлений 10^4-10^{11} ом с погрешностью $5 \cdot 10^{-4}-10^{-2}\%$ (УМПС-5).

Точность взаимных сличений эталонных нормальных элементов и точность передачи размера вольта элементам низшего разряда повышена на порядок в результате разработки и внедрения компаратора (тип КНЭ). Погрешность взаимных сличений нормальных элементов 10^{-7} .

Результаты многолетних исследований позволили последовательно в различные годы разработать ряд стандартов и других нормативных документов на меры сопротивления, нормальные

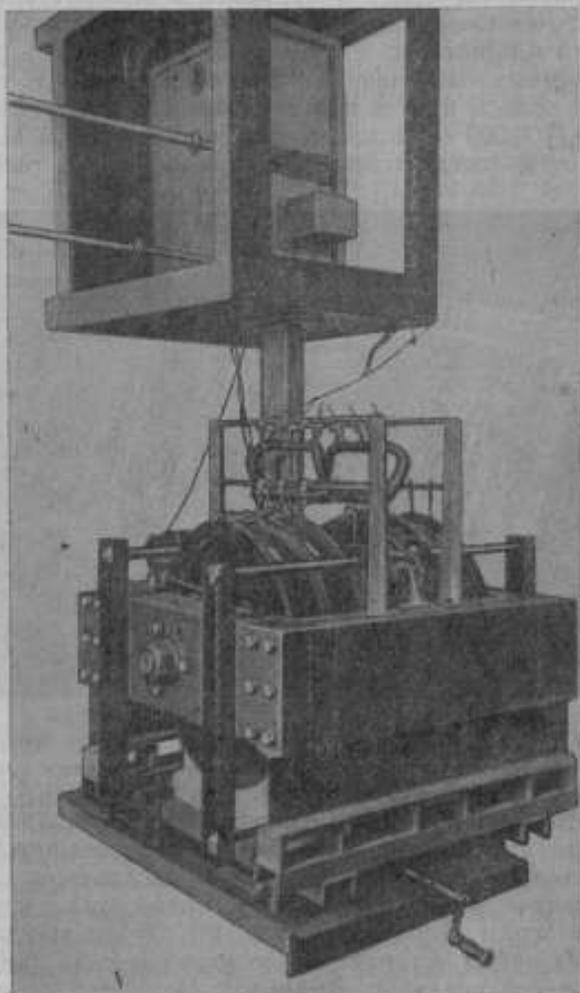


Рис. 12. Установка для измерения гиромагнитного отношения протона в сильном магнитном поле

элементы, мосты постоянного тока, компенсаторы и методы их поверки. Каждый стандарт фиксировал все более высокий уровень создаваемых мер и приборов, обеспеченных метрологической базой.

Наличие упомянутых выше эталонов сопротивления и э. д. с., а также аппаратуры для передачи их значения на постоянном токе обеспечивает необходимую, высокую точность измерений силы постоянного тока в диапазоне от долей микроампер до нескольких десятков ампер и напряжения постоянного тока от микровольт до 2000 в.

Полученные точности в настоящее время удовлетворяют требованиям практики. Однако диапазон измеряемых величин на постоянном токе, особенно в части измерения напряжения, превышающего 1 кВ, становится недостаточным.

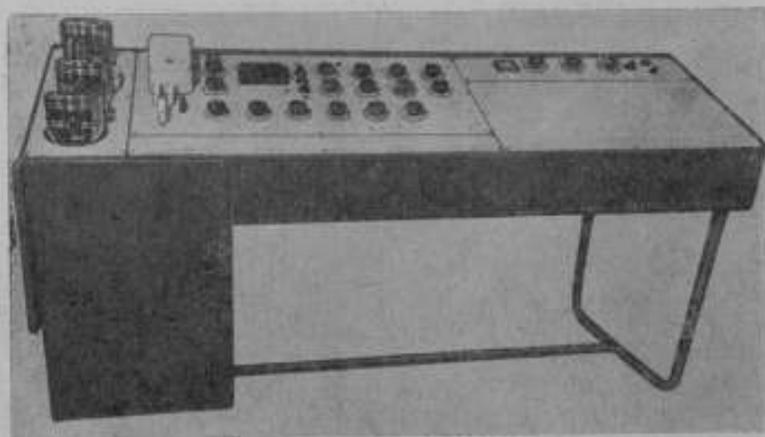


Рис. 13. Установка для проверки мер и магланов сопротивления с пределами 10^0 — 10^{11} ом

В настоящее время во ВНИИМ и ВНИИФТРИ выполняются работы по расширению пределов точных измерений силы постоянного тока в сторону малых значений, 10^{-9} — 10^{-13} а, и созданию метрологической аппаратуры, необходимой для оценки приборов, применяемых в геофизике, химии, медицине. В процессе этих работ во ВНИИМ созданы опытные образцы принципиально новых мер тока и методы их аттестации, на основе которых разработана установка для поверки мер малого тока (рис. 14).

Метрологические работы в области измерений больших постоянных токов, выполненные ВНИИМ (до 10 кА) и Свердловским филиалом ВНИИМ (до 100 кА), обеспечили возможность поверки приборов, применяемых в цветной металлургии — мер сопротивления для больших токов, шунтов, измерительных трансформаторов постоянного тока.

Оригинальными являются работы Свердловского филиала по измерению энергии при больших постоянных токах.

Развитие промышленного применения токов повышенной частоты (звукового диапазона) привело к необходимости создания электроизмерительных приборов (амперметров, вольтметров, ваттметров, фазометров, измерительных трансформаторов) новых типов, обеспечивающих контроль энергетических показателей и технологических режимов промышленных установок. Развитие производства таких измерительных приборов длительное время затруднялось отсутствием точных методов и образцовой аппаратуры для измерения основных величин переменного тока в широком диапазоне значений и частот. Проблема создания



Рис. 14. Установка для аттестации мер малого тока и для точных измерений тока от 10^{-9} до 10^{-14} а

в стране научной базы и технических средств, обеспечивающих единство измерений тока, напряжения, мощности в звуковом диапазоне частот, была поставлена перед ВНИИМ в 1948 г. В результате комплекса теоретических, экспериментальных и опытно-конструкторских работ были созданы как методы передачи размера единицы от эталонов постоянного тока приборам переменного тока звукового и ультразвукового диапазонов частот, так и целый ряд установок для проверок электроизмерительных трансформаторов тока и напряжения и фазометров. В основу этих разработок положен метод сравнения неизвестной величины (I , U или P) переменного тока с точно измеряемой, эквивалентной ей величиной постоянного тока. Сравнение осуществляется при помощи приборов нового вида, названных термоэлектрическими компараторами. Аналогичные по точности методы и аппаратура для перехода с постоянного на переменный ток (dc/ac transfer Instruments) имеются только в метрологических институтах Англии и США.

На рис. 15 показана последняя модель установки для поверок образцовых показывающих приборов, разработанная ВНИИМ в содружестве с Краснодарским ЗИП.

Существенные достижения имеются в области фазометрии, ранее не обеспечиваемой метрологическим обслуживанием. В настоящее время уже созданы меры разности фаз и фазометрическая аппаратура, охватывающие широкий диапазон частот от инфра- до ультразвуковых.

Сравнительно новыми для метрологических институтов являются работы по исследованию материалов, проводимые с целью

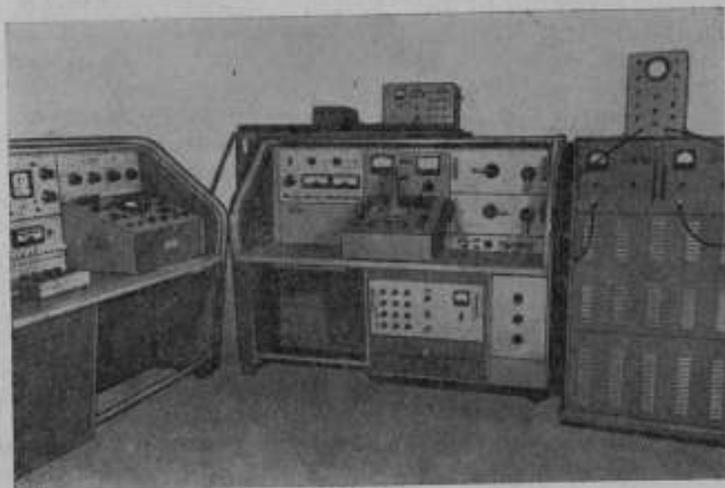


Рис. 15. Установка типа УВАФ-1 для поверки образцовых амперметров, вольтметров, ваттметров и фазометров при частотах 40 гц — 20 кгц

обеспечения Государственной службы стандартных и справочных данных (ГСССД) и создания стандартных образцов (ГСО) электротехнических и магнитных материалов. В результате во ВНИИМ создан ряд приборов и установок для исследования и испытаний различного рода магнитных материалов и диэлектриков.

На рис. 16 показана одна из установок для испытаний стандартных образцов ферритов и магнитодиэлектриков при частотах до 1 Мгц. Такие установки представляют собой мосты переменного тока, позволяющие определить магнитную проницаемость, тангенс угла потерь и коэффициенты потерь на основании измерений индуктивности и сопротивления обмотки с кольцевым сердечником из испытуемого материала с погрешностью соответственно 0,2 и 1%.

Эта аппаратура в сочетании с термокриостатом дает возможность определять температурные коэффициенты магнитной проницаемости и тангенса угла потерь в пределах 10^{-5} — 10^{-2} град $^{-1}$.

Разработанные в 1964—1967 гг. феррометры, построенные на базе фазочувствительных вольтметров средних значений напряжений, дали возможность с погрешностью до 5% аттестовать стандартные образцы листовых магнитомягких материалов по динамическим магнитным циклам при частотах до 10 кГц.

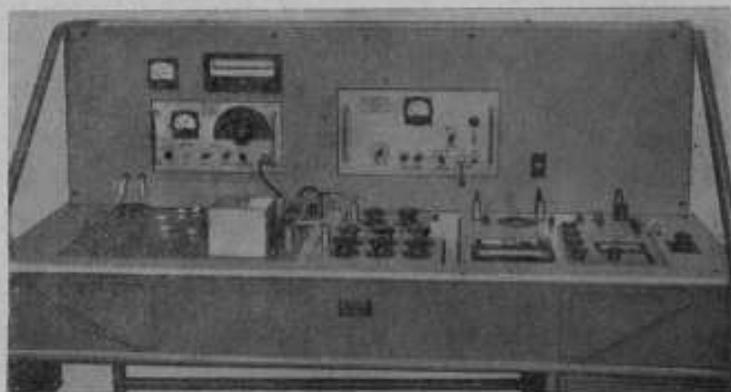


Рис. 16. Мостовая установка для испытания ферритов и магнитоэлектриков при частотах до 1 МГц

На рис. 17 показана установка для испытания листовых магнитотвердых материалов типа викаллоев в переменных магнитных полях частотой 50 гц. При этом с погрешностью 3—5% определяются динамические магнитные циклы, суммарные потери на перемагничивание и основные динамические кривые намагничивания. Созданы меры углов потерь и электроды для испытаний различного рода диэлектриков и ряд других приборов и установок.

Разработанная аппаратура в большинстве своем имеет оригинальные схемные и конструкторские решения и нашла широкое применение в практике поверочных и исследовательских работ.

Созданная в послевоенные годы метрологическая база в основном соответствует потребностям народного хозяйства, однако быстрое развитие новых направлений науки и техники, требования к повышенной эффективности научных разработок, сформулированные в решениях ЦК КПСС, ставят новые задачи опережающего развития метрологических работ в области электромагнитных измерений. К ним относятся:

1. Повышение точности воспроизведения электрических и магнитных единиц. Для чего, наряду с усовершенствованием основных эталонов и эталонных методов (расчетного конденсатора, токовых весов, эталона магнитной индукции), необходимо дальнейшее развитие работ и выполнение поисковых исследований, связанных с переходом к новым эталонам, основанным на использовании новых физических явлений (ядерной прецессии, эффекта Джозефсона, оптической накачки, эффекта Штарка и т. д.).



Рис. 17. Установка для испытания магнитотвердых материалов в переменных магнитных полях

2. Создание новых, более стабильных рабочих мер, основанных на новой технологии, и аппаратуры для их сличения и передачи размеров единиц рабочим приборам. Необходимы меры: э. д. с. на базе стабилитронов со стабильностью $5 \cdot 10^{-6}$ в год; тока с пределами $10^{-10} - 10^{-16}$ а; сопротивления $10^{-6} - 10^{-3}$ и $10^6 - 10^{17}$ ом; напряжения постоянного и переменного тока с пределами $10 - 10^3$ в; емкости со стабильностью 10^{-5} в год; магнитной индукции, магнитного момента; стандартные образцы магнитных материалов и диэлектриков и ряд других.

3. Разработка принципов и создание образцовой аппаратуры, необходимых для метрологического обслуживания медицины, геофизики, метеорологии, органической химии и др.

4. Создание базы для удовлетворения запросов энергетики. Для этого необходимо в первую очередь выполнение работ,

связанных с организацией высоковольтной измерительной лаборатории, обеспечивающей метрологическим обслуживанием все отрасли народного хозяйства, применяющие и разрабатывающие высоковольтную измерительную аппаратуру.

5. Дальнейшее развитие работ по созданию метрологической базы ГСССД и ГСО.

Разработка электроприборостроительной промышленностью агрегатированного комплекса средств электронизмерительной техники, предназначенного для автоматизации измерений при управлении производством, ставит новую проблему оценки погрешностей и создания метрологической базы для исследования, испытаний и поверки многоблочных автоматизированных систем.

Возрастание требований к точности и увеличению объема поверочных работ вызывает необходимость их упрощения и ускорения процесса поверки, что немислимо без применения средств автоматизации и информационно-вычислительной техники.

Развитие новых областей техники вызывает необходимость разработки методов поверки приборов для оценки случайных процессов и для измерений электрических и магнитных величин в переходном процессе и импульсном режиме, а также разработки теоретических основ и метрологической аппаратуры (рабочих эталонов, образцовых мер и приборов, поверочных схем и т. д.) для измерений электрических полей в проводящих и непроводящих средах.

Повседневной задачей является разработка и совершенствование стандартов для электроприборостроения и на методы поверки и испытаний электро- и магнитоизмерительной аппаратуры и материалов.

Для выполнения больших метрологических задач в области электрических и магнитных измерений необходима не только мобилизация научных сил метрологических институтов, но и всемерное привлечение предприятий других министерств и ведомств.

Поступила в редакцию

3/III 1969 г.

КИБЕРНЕТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА В МЕТРОЛОГИИ

Классическое определение метрологии как науки о точных измерениях в современных условиях стало узким и неконкретным, а под понятием «измерительная техника» сплошь и рядом все еще подразумевается совокупность определенных методов и средств получения информации. Сейчас этот термин определяет целую область научно-производственной деятельности людей, а не только совокупность методов и средств для получения информации.

При дальнейшем изложении под термином «измерительная техника» мы будем подразумевать самостоятельную область научно-производственной деятельности людей, а под термином «метрология» — научную основу всей измерительной техники в самом широком смысле [1]. Что же касается совокупности методов и средств для получения информации, используемой в производственных, потребительских или бытовых целях, то эту совокупность будем обозначать термином «техника измерений» или «контрольно-измерительная техника».

Настоящее сообщение посвящается вопросу рационального применения методов математики и кибернетики, а также средств вычислительной техники для решения основных метрологических проблем и задач техники измерения.

Достижения ученых и специалистов-метрологов в повышении точности измерений, воспроизведения единиц измерений и передачи их размеров от эталонов к образцовым и рабочим мерам и приборам поистине велики. Тем не менее темпы развития науки и техники все же предъявляют серьезные претензии к этим достижениям. Не говоря уже о научных экспериментах, даже некоторые отрасли производства, как например, прецизионное станкостроение, приборостроение, требуют измерений

некоторых параметров с точностью, почти равной достигнутой точности воспроизведения эталонов. Разрыв между потребностями и возможностями усугубляется еще более, когда речь заходит об измерениях весьма больших и весьма малых значений давления, вакуума, электрических токов и других физических параметров.

Можно ли считать, что такое положение, противоречащее тезису необходимости опережающего развития метрологии, создается в результате простого отставания метрологических исследований? Анализ и сопоставление таких исследований у нас и за рубежом с большой убедительностью показывают, что выдержавшие испытание временем классические методы повышения точности в целом ряде измерений почти достигли своего предела. Выход, по-видимому, надо искать в качественно новых методах дальнейшего повышения точности измерений. Однако надо иметь в виду, что на уровнях высоких точностей измерительные величины не остаются неизменными в течение процесса измерений, их флуктуации бывают соизмеримы, или даже большими, чем точность измерения, и, следовательно, будущее высокоточных измерений, даже статических величин, уходит в область так называемых динамических измерений, т. е. измерений нестационарных параметров, да еще в условиях шумовых фонов.

Путь дальнейшего повышения точности измерений и воспроизведения единиц измерений лежит через математическое моделирование, самое широкое применение методов кибернетики и средств вычислительной техники [2]. Это приводит к созданию измерительно-вычислительных комплексов и информационно-измерительных систем метрологического и контрольно-измерительного назначения, а также к созданию и использованию новых эталонов, основанных на естественных, природных, предельно стабильных физико-химических явлениях.

Говоря об этих очевидных фактах, мы рискуем оставить впечатление, что ломимся в открытые двери. Но это будет только впечатление, так как эти двери из метрологии в кибернетику, математическое моделирование и вычислительную технику открываются с большим скрипом.

Руководимая мною секция совета директоров метрологических институтов Комитета стандартов по применению методов математики, кибернетики, средств вычислительной техники и автоматизации в метрологии совсем недавно установила, что объем исследований в указанном направлении составляет максимум 7% от общего объема исследовательских работ. Лишь Тбилисский филиал ВНИИМ имеет прямую специализацию в указанном направлении и посвящает ему 75% своего творческого потенциала.

Любые достижения науки и техники всегда были связаны с применением того или иного математического аппарата для

исследования, конструирования и испытаний. Само совершенствование и обогащение математического аппарата обязано этой взаимосвязи. Однако по мере усложнения техники и внедрения результатов научных исследований в несоизмеримые по масштабам пространства и времени области материального мира, по мере постоянного сужения специализации отраслей науки и техники становится необходимым делать различие между математическими методами, носящими вспомогательный характер (обычно сравнительно элементарными), и математическими методами, открывающими дорогу к принципиально и качественно новым решениям (обычно сложными) [3].

Именно эти последние мы имеем в виду, говоря о методах математики, о математическом моделировании в метрологии и в технике измерений. Методы математики позволяют осуществлять математическое описание процесса измерения, его математическое моделирование, а машинная обработка получаемых сложных математических зависимостей позволяет с весьма высокой точностью решать их относительно значения искомых параметров.

Эти методы, таким образом, позволяют измерять, вернее, определять даже такие физические нестационарные величины, которые недоступны для непосредственных контактных измерений. В частности, при размещении чувствительных элементов измерительных преобразователей в замкнутых защитных чехлах или при измерении параметров физических полей, в воздушных, водных или материковых. Именно здесь возникают и находят свое решение вопросы измерения весьма малых и весьма больших значений параметров и проблемы фильтрации, т. е. измерений на фоне шумов.

Методы кибернетики в метрологии и в технике измерений тесно связаны с созданием средств, реализующих математическое моделирование, но имеют и самостоятельное значение, особенно в тех случаях, когда требуется обработка большого количества информации, получаемой при многократных повторных измерениях и большим количеством точек, в которых измеряют физические параметры. Уже сейчас на наших современных производствах встречается необходимость получать информацию в сотнях и тысячах точек, многие из которых недоступны. Программа обработки этого огромного потока информации зачастую весьма сложна, и решающую роль начинает играть время, требуемое для обработки этой информации, которое должно быть сведено до минимума. В идеальном случае результаты обработки большого потока информации должны выдаваться синхронно с изменениями измеряемых величин.

Все это приводит к созданию специальных кибернетических машин, составляющих основные звенья измерительно-вычислительных комплексов и информационно-измерительных систем. Эти машины, комплексы и системы автоматизируют процесс

измерений и в значительной мере исключают факторы, влияющие на степень точности измерений.

Увеличение точности измерений обуславливается также возможностью многократных, повторных измерений, автоматического учета многих изменяющихся внешних факторов и введения нужных поправок, в том числе поправок, восстанавливающих инерционно- и шумоскаженную информацию.

Для дальнейшего развития метрологии представляют несомненный интерес такие кибернетические устройства, как эвристические автоматы в информационно-измерительных системах, решающие с помощью адаптивных устройств большой класс специфических задач. Среди таких задач следует назвать: преобразование, анализ и классификацию измерительной информации, предсказывающие (упреждающие) измерения, распознавание образов, измерение статистических характеристик случайных процессов, сжатие обрабатываемой информации и др. Представляет интерес также оптимизация измерительных и поверочных процессов, в том числе динамических проверок измерительных систем. Большое значение кибернетические автоматы будут иметь для цифровых методов построения измерительных систем, методов разделения взаимокоррелированных величин, метрологических аспектов технической диагностики и для ряда других задач.

Но в метрологии, в отличие от контрольно-измерительной техники, возникают еще и свои, специфические, более сложные задачи — создание новых поверочных схем и соответствующей, обладающей более высокой степенью точности образцовой аппаратуры для обеспечения воспроизведения единиц и проведения государственных проверок и испытаний новых измерительно-вычислительных комплексов и информационно-измерительных систем, содержащих кибернетические устройства.

Исследования в этих направлениях позволили создать математические модели, соответствующие кибернетические устройства и измерительно-вычислительные комплексы, решающие ряд весьма актуальных задач метрологии и техники измерений. Так, например, математические исследования инерционных процессов измерения в динамических режимах позволили установить, что наиболее общая математическая модель таких процессов для подавляющего большинства видов измерений, степени инерционности и частотных диапазонов измерительных преобразователей основывается на интегральном уравнении типа Вольтера [3]. Известные математические выражения, описывающие инерционный процесс измерения нестационарных параметров, которыми широко пользуются в метрологии и технике измерений, являются частными случаями упомянутого уравнения. Такая математическая модель уже позволила построить ряд измерительно-вычислительных комплексов (главным образом, в об-

ласти температурных измерений), осуществляющих синхронное восстановление инерционно-искаженной информации. Эта модель является основой для решения многих задач динамических измерений как статических, так и нестационарных величин.

Ограничения в вопросе точности измерений накладываются точностными и частотными характеристиками применяемых измерительных преобразователей, степенью точности определения физических параметров этих преобразователей и накоплением погрешностей в многоблочной схеме измерительно-вычислительного комплекса.

Эта же математическая модель позволяет решать задачи измерения сквозь толщу защитных устройств [3], имеющие большое прикладное значение, особенно при измерениях как в агрессивных средах, так и различных весьма высоких параметров (например, высоких температур, давлений и т. п.).

Значительный интерес представляют поставленные и решенные математические задачи, а также создаваемые кибернетические устройства для измерений с учетом возмущений, вносимых измерительными преобразователями в исследуемую среду. В этом случае весь процесс измерений представляется в виде единой системы: среда — измерительный преобразователь — измерительно-вычислительный комплекс с выходом на шкалу измерительного прибора.

Большое внимание в работах последнего времени уделяется теории приложения так называемого прогнозирования, т. е. предсказывающего, предупреждающего измерения нестационарных параметров, простейшим примером которого является экстраполяция процессов развития изменений контролируемого параметра [3—7].

Предсказывающие измерения в совокупности с методом измерения сквозь толщу защитных устройств являются одним из путей решения проблемы высокоточных измерений весьма больших и весьма малых величин, что является одним из актуальнейших вопросов метрологии.

Значительная часть методов математического моделирования метрологических процессов, кибернетических измерительных устройств и измерительно-вычислительных комплексов, уже разработанных к настоящему времени, позволила за сравнительно короткий срок создать оригинальные установки, приборы и комплексы метрологического и контрольно-измерительного назначения. Среди них несколько типов измерительно-вычислительных комплексов для практически безинерционного измерения температур инерционными термопреобразователями, которые работают на принципе синхронного восстановления инерционно-искаженной информации [3—5] и комплекс устройств для определения различных параметров и критериев, характеризующих состояние технологических процессов [8,9]. Эти измерительно-вычислительные комплексы предназначены для

исследования доменных и других металлургических процессов и их автоматического регулирования, однако могут быть использованы без каких-либо переделок и для иных целей метрологии и измерительной техники.

Представляют интерес устройства для предсказывающего измерения нестационарных температур путем экстраполяции [3—6] и для бесконтактного измерения температур через селективно поглощающую среду [11—13].

Важную роль начинают играть уже созданные кибернетические устройства, а также измерительно-вычислительные комплексы, осуществляющие вычисления: двумерной плотности вероятности статистических оценок случайных процессов, характеристик сигналов со случайно изменяющимися периодами, математических ожиданий и дисперсий и, наконец, степени связи двух случайных процессов. Ряд уже действующих устройств предназначен для решения таких задач, как: экспресс-определение законов распределения одномерных процессов и экспресс-оценка корреляционных функций, статистический анализ некоторых нестационарных процессов, измерение математического ожидания знакопеременного стандартного сигнала со случайными амплитудами, решение стохастического уравнения, генерация шума и инфранизких и низких частот и др. [3, 14—18].

В качестве примера специальной поверочной аппаратуры следует назвать ряд кибернетических устройств для проверок аппаратуры статистического анализа случайных процессов [19].

Надо отметить, что все измерительно-вычислительные комплексы, измерительные кибернетические устройства в конечном счете дают эффект в повышении точности измерений, но не все обеспечивают этот эффект на первых этапах своего появления и развития. Некоторые перспективные комплексы, требующие дальнейшего совершенствования, пока еще связаны с потерей точности, главным образом за счет накопления погрешностей в многоблочных цепях. Снижается пока и общая надежность таких комплексов и систем по сравнению с простыми измерительными цепями из-за большого количества элементов. Но все это не должно служить аргументом против самого широкого их внедрения. Чтобы обеспечить процесс указанного совершенствования, ведутся теоретические и прикладные работы по методам учета накопления погрешностей в многоблочных измерительно-вычислительных комплексах, по методам автоматического внесения поправок в результаты измерений при измерении как статических, так и нестационарных величин [3]. Разрабатываются высоконадежные коммутационные измерительные и вычислительные блоки на базе электроосмотического эффекта. Созданы новые оригинальные логические информационные устройства для повышения надежности и точности измерительно-вычислительных комплексов. Среди них: накапливающие сумматоры с фиксацией и коррекцией ошибок переноса, двоичный

счетчик с фиксацией сбоев и коррекцией ошибок, реверсивный счетчик в коде Грея и др. [20—22].

Широкое использование в метрологии математического моделирования, методов кибернетики, средств вычислительной техники и достижений электроники открывают качественно новые пути решения метрологических задач не только дальнейшего повышения точности измерений или сличений, но и дальнейшего совершенствования методов метрологического обслуживания народного хозяйства, в частности, обеспечения единства мер и измерений.

В связи с этим следует кратко остановиться на одной перспективной проблеме.

Несмотря на то, что точность измерений значительно повысилась, действующая классическая схема обеспечения единства мер и измерений не изменилась, и сличение рабочих измерительных средств с образцовыми, а образцовых с эталонами осуществляется путем доставки поверочных средств измерений к месту хранения образцовых или эталонных мер.

Таким образом, в этой схеме в качестве одного из звеньев фигурирует транспортировка поверяемых средств измерений на значительные расстояния. В таких условиях достигнутая точность сличения начинает вступать в противоречие с методами и техническими средствами транспортировки поверяемых измерительных средств. Процесс транспортировки, следовательно, начинает играть в классической схеме обеспечения единства мер роль ненадежного звена.

Выход из такого положения следует искать в качественно новых идеях организации государственной поверочной службы. Одна из таких идей, выдвинутая секцией совета директоров метрологических институтов, предполагает осуществление сличений дистанционно с помощью радиосигналов (т. е. телесличение), по аналогии с уже внедренной системой проверки времени по радиосигналам.

В этом направлении предстоят, однако, глубокие теоретические исследования и опытно-конструкторские работы. Первый этап исследований посвящается переводу в код основных единиц: длины, массы, температуры, света, тока, воспроизводимых на эталонных средствах. На втором этапе исследований ведутся работы по передаче кодовых сигналов в эфир и их приему на местах, и, наконец, третий этап предполагает создание аппаратуры для дешифрации кода и сличения результатов ее с тождественными дешифрованными кодами, получаемыми от рабочих и поверяемых приборов.

Актуальность научных и технико-экономических аспектов такой проблемы и своевременность ее постановки совершенно очевидны и не требуют особых доказательств.

Что касается телесличения приборов, измеряющих частоту колебаний и скорость вращения (частотомеры, стробоскопы

и т. п.), то после небольших исследований и конструкторских работ эту систему можно было бы начинать внедрять без особых трудностей, так как дистанционная передача эталонных частот — дело практически решенное.

Имеющиеся идеи и поисковые исследования в отношении телесличения прочих основных и производных единиц измерений, мер и измерительных приборов дают все основания не сомневаться в его технической осуществимости. Конечно, пока будут разработаны совершенные методы и средства телесличения, точность его возможно будет несколько утрачена, но неизбежные на первых этапах потери точности не должны служить аргументом против такого революционного новшества.

Итак, будущее в метрологии в значительной мере зависит от масштабов внедрения в метрологию математического моделирования, методов кибернетики, средств вычислительной техники, автоматики, телемеханики и электроники. Нет необходимости приводить какие-либо дополнительные аргументы, но совершенно необходимо защитить этот очевидный тезис по крайней мере от двух проявляющихся неправильных тенденций. Первая из них ставит под сомнение право существования этого направления в виде самостоятельного раздела метрологии. Вторая тенденция рождает попытки переложить решение этих вопросов на специализированные научно-исследовательские институты и конструкторские организации (математики, физики, кибернетики, автоматизации, электроники и т. п.).

Причины проявления таких тенденций кроются, по-видимому, с одной стороны, в большой инерции метрологии к внедрению математического моделирования, методов кибернетики и средств вычислительной техники и, с другой, — в появлении в последнее время термина «автометрия» со своим довольно широким содержанием. Но все это не исключает одно другого.

Теория и практика создания измерительно-вычислительных комплексов метрологического назначения должна составлять самостоятельный раздел метрологии. Раздробление этого вопроса по видам измерений (например, электрические, магнитные, механические, теплофизические и т. п.) распылит силы специалистов, приведет к снижению научно-технического уровня разработок, лишит возможности централизованной координации научно-исследовательских работ и эффективного использования обобщенных решений.

Ответ на вопрос о месте проведения этих работ должен быть один: теоретические и прикладные работы по созданию измерительно-вычислительных комплексов метрологического назначения должны проводиться в метрологических научных организациях под руководством метрологов с привлечением специалистов по математике, кибернетике, автоматике, телемеханике и электронике. Это не исключает, а предполагает широкое ис-

пользование результатов работы других специализированных институтов.

В вопросах техники измерений мы теряем много именно потому, что они решаются раздробленно, почти во всех специализированных институтах, в которых для этого создаются группы, секторы, лаборатории и отделы техники измерений. Это приводит иногда к кустарным и недостаточно квалифицированным решениям, распыляет силы специалистов в области техники измерений. Видимо, следует ставить вопрос о создании сети специализированных научно-исследовательских институтов «техники измерений» как в системе Академии наук, так и в системе Министерства приборостроения.

Я хочу выразить уверенность, что значительная часть метрологов, активно содействующих внедрению этого нового направления в метрологию, сделает все для того, чтобы в ближайшее время добиться важных успехов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арутюнов В. О. Содержание и основные задачи современной метрологии. «Измерительная техника», 1967, № 9.
2. Арутюнов В. О., Зедгинидзе Г. П., Безикович А. Я., Дюжин А. Г. Состояние и перспективы работ по применению средств электроники, автоматики и вычислительной техники в метрологических исследованиях. Доклад на Всесоюзной конференции по метрологии 17—22 сентября 1968 г., г. Свердловск.
3. Зедгинидзе Г. П., Гогсадзе Р. Ш. Математические методы в измерительной технике. М., Издательство стандартов, 1970.
4. Гордов А. Н. Основы пирометрии. М., «Металлургия», 1964.
5. Тимофеев Б. Б., Арутюнов Г. К. Вычислительное устройство для измерения температуры расплавленной стали. «Труды Тбилисского НИИ средств автоматизации», т. III, М., ЦБТИ, 1962.
6. Зедгинидзе Г. П., Левицкий М. П., Иванов В. В. и др. Вычислительная машина для прогнозирования возможных очагов канального прорыва колошниковых газов. «Труды НИИ средств автоматизации», т. I, изд. Грузинского политехнического института им. В. И. Ленина, 1957.
7. Каминский Г. П. Упреждающий контроль распределения газового потока в доменной печи. «Измерительная техника», 1969, № 1.
8. Зедгинидзе Г. П., Левицкий М. П. О приборах для непрерывного контроля вычисляемых параметров доменного процесса. «Бюллетень НТИ ГНТК СССР», 1959, № 7.
9. Зедгинидзе Г. П., Левицкий М. П., Жамкочия Р. Б. Вычислительная машина для определения коэффициента прямого восстановления и критерия теплового состояния низа доменной печи. «Труды Тбилисского НИИ средств автоматизации», т. I, изд. Грузинского политехнического института им. В. И. Ленина, 1957.
10. Зедгинидзе Г. П. Методы кибернетики в комплексной автоматизации доменных печей. «Сталь», 1962, № II.
11. Зедгинидзе Г. П., Костава Ю. Н., Качарава Р. А. Некоторые вопросы создания аппарата для измерения температуры в условиях вихревых потоков запыленной газовой среды. «Труды Тбилисского НИИ средств автоматизации», т. 2, Л., ВИНТИ Приборпром, 1960.
12. Костава Ю. Н. Способ измерения температуры пламени. Авторское свидетельство № 173457, «Бюллетень изобретений», 1963, № 15.
13. Zedginidze G. P. «Hutnik», sk. 12, MS, 1962.

14. Чхендзе М. В. Многоканальный преобразователь аналог-код с регулируемым диапазоном частоты квантования. «Кибернетика на службе коммунизма», 1966, т. 3.

15. Отхмезури Г. Л., Крештал Л. Н. Счетчик на двухотверстном трансфлюксоре. Авторское свидетельство № 206640, «Бюллетень изобретений», 1967, № 1.

16. Отхмезури Г. Л., Мгеладзе Ш. Г., Меладзе И. В. Устройство для моделирования математического ожидания двумерного сигнала. Авторское свидетельство № 217072, «Бюллетень изобретений», 1968, № 15.

17. Чхендзе М. В., Ладария Г. Г. Устройство для преобразования чисел из позиционной системы счисления в систему счисления остаточных классов. Авторское свидетельство № 238887, «Бюллетень изобретений» 1969, № 10.

18. Чхендзе М. В., Ладария Г. Г. Накопительный сумматор с фиксацией ошибки переноса. Авторское свидетельство № 208338, «Бюллетень изобретений», 1967, № 3.

19. Манукян Ю. С. Реверсивный счетчик в коде Грея. Авторское свидетельство № 190662, «Бюллетень изобретений», 1967, № 2.

20. Чхендзе М. В., Ладария Г. Г. Накопительный сумматор с коррекцией ошибки переноса. Авторское свидетельство № 226270, «Бюллетень изобретений», 1968, № 28.

21. Чхендзе М. В., Гольдштейн Г. А., Демирханова А. С. Устройство для преобразования графических функций, выполненных в виде непрозрачной маски, в электрический сигнал. Авторское свидетельство № 191242 «Бюллетень изобретений», 1967, № 3.

22. Манукян Ю. С., Рогова С. Е., Чхендзе М. В., Вайнер М. В., Джикья К. С., Двоичный счетчик импульсов. Авторское свидетельство № 219897, «Бюллетень изобретений», 1968, № 19.

Поступила в редакцию

18/III 1969 г.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ В ОБЛАСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Приборы для контроля и регулирования технологических процессов находят широкое применение в промышленности. Темпы развития этой области измерительной техники сравнительно высоки. Происходит быстрое обновление номенклатуры выпускаемых приборов на основе использования прогрессивных принципов построения государственной системы приборов. Только в 1966—1967 гг. внедрено в производство около 330 новых моделей приборов. На 1969 г. планируется обновление приборов по объему на 20%.

Успешное решение этих задач в значительной степени зависит от деятельности научных и испытательных организаций метрологической службы страны, среди которых видное место занимает Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева. Институт имеет крупные достижения в разработке, воспроизведении и хранении государственных эталонов единиц измерения, в разработке и развитии методов точных измерений физических величин в области измерения параметров технологических процессов.

Современное развитие приборов контроля и регулирования технологических процессов требует решения ряда новых задач в области метрологии, таких как дальнейшее повышение точности измерений, широкое использование измерительных устройств как датчиков для формирования информации в системах автоматического регулирования и управления в замкнутых циклах, создание большого количества различного рода новых измерительных устройств для сложных условий применения, в частности, при повышенных давлениях и температурах, а также в агрессивных средах. Решение этих задач, в частности,

повышение точности измерительных приборов, требует усовершенствования методов их испытаний.

Следует отметить, что в способах определения точности приборов, предусмотренных действующими государственными стандартами и нормами, не использованы современные возможности обработки результатов измерений на основе теоретико-вероятностных методов. Вместе с тем, у нас в стране некоторые ведомства применяют такие методы обработки результатов измерений при испытаниях приборов. Так, например, точность приборов в авиации определяется как половина их нестабильности плюс три дисперсии.

Для приборов контроля технологических процессов таких узаконенных теоретико-вероятностных методов испытаний нет, и в ряде случаев допускается недостаточно объективная оценка их точности. Поэтому нужно считать целесообразным проведение соответствующих исследований и выпуск необходимых руководящих технических материалов и, по-видимому, общего государственного стандарта.

Следует остановиться еще на определении динамических характеристик приборов. Длительное время точные измерительные устройства использовали, в основном, как показывающие приборы на установившихся режимах работы объективов. Видимо, этим и объясняется то, что оценке динамических свойств измерительных приборов контроля и регулирования технологических процессов в действующих государственных стандартах не уделено должного внимания.

В последнее время характер использования измерительных устройств меняется существенно. Их применяют все более как датчики сигналов информации в различных автоматических системах. При этом значение их динамических и статических погрешностей становится практически одинаковым. И если мы статические погрешности определяем с точностями порядка десятых долей процента, то при определении динамических погрешностей в ряде случаев обходимся точностями порядка процентов и даже в некоторых случаях десятков процентов.

В связи с этим должны быть устранены пробелы в определении динамических характеристик измерительных устройств как путем разработки рациональных методов испытаний приборов, так и путем создания соответствующих средств и установок для осуществления динамических испытаний их.

НИИТеплоприбор совместно с Московским энергетическим институтом проводит комплекс исследований по изучению динамики широко используемых, входящих в государственную систему проборов, в частности, приборов с компенсацией сил. Исследована работа приборов, измеряющих давление, перепады давлений, уровень, расход, усилие и ряда других. Рассматриваются физические процессы, обуславливающие наличие

у приборов инерционности, и возможные методы определения динамических характеристик приборов.

Приборостроительные организации совместно с соответствующими организациями Комитета стандартов должны выбрать рациональные методы определения динамических характеристик приборов и узаконить их.

Г. П. Зедгинидзе в своем докладе осветил интересные проблемы применения кибернетики и вычислительной техники для оценки динамических свойств измерительных устройств. Особенно важно применение средств такого типа для оценки технических показателей регулирующих устройств. Последние выпускают тысячами, числовая же оценка их показателей производится в ряде случаев весьма субъективно.

Чтобы решить эти задачи, целесообразно использовать вычислительную технику для создания соответствующих устройств, автоматически определяющих основные характеристики регулирующих средств.

Столь же важными являются задачи определения метрологических качеств измерительных устройств, используемых в сложных условиях. Особенно большое значение имеет создание установок для поверки приборов измерения расхода жидкостей. Надо сказать, что широкое разнообразие свойств и параметров контролируемых сред, встречающееся на практике при измерении расхода жидкости, обуславливает необходимость применения расходомеров с различными принципами действий.

Предприятия Министерства приборостроения, средств автоматизации и систем управления выпускают и разрабатывают различные расходомерные устройства: дифманометры, основанные на измерении перепада давления при течении потока жидкости, индукционные расходомеры на диапазоны до 25 000 м³/ч, скоростные турбинные и шариковые расходомеры на диапазоны до 630 м³/ч, ротаметры на диапазоны до 120 м³/ч, ультразвуковые расходомеры на диапазоны до 100 м³/ч, вихревые расходомеры и ряд других.

Расходомерные установки на заводах-изготовителях, в научно-исследовательских институтах и конструкторских бюро Министерства приборостроения, средств автоматизации и систем управления, а также и в организациях Комитета стандартов обеспечивают поверку счетчиков и расходомеров, работающих на воде, производительностью до 400 м³/ч и на нефтепродуктах (на Ливенском заводе) до 4000 м³/ч.

Нужно заметить, что за рубежом имеются расходомерные станции на более высокие пределы измерения и в ряде случаев обладающие большой точностью. У нас в стране необходимого комплекса расходомерных установок нет. Мероприятия, намеченные Комитетом стандартов по созданию в Казани центра с комплексом расходомерных установок являются весьма важными, и их реализация должна быть ускорена.

Пока еще не решены у нас задачи проверки и оценки метрологических качеств приборов, находящихся в эксплуатации, хотя технические возможности для этого имеются. Эта работа должна быть проведена организациями Комитета стандартов.

Следует заметить, что не всегда требуется создание расходомерных установок, работающих на реальной жидкости. В ряде случаев удается решить задачи оценки метрологических характеристик расходомеров на установках беспроливного типа. Как известно, сравнительно хорошо такие задачи решаются, например, для расходомеров дифманометрического типа при использовании стандартных сужающих устройств.

НИИТеплоприбор разработал метод беспроливной градуировки индукционных расходомеров, основанный на сочетании электрического моделирования и поэлементной проверки датчика расходомера. Экспериментально метод исследует НИИТеплоприбор совместно с ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. Хотелось бы эту работу ускорить, так как для ряда сред, особенно агрессивных, применение подобных методов даст огромную экономию.

Другой весьма важной задачей является градуировка расходомеров турбинного типа для взрывоопасных, агрессивных и токсичных сред.

Учитывая сложность создания расходомерных станций для градуировки приборов, работающих, например, на таких средах, как желтый фосфор, хлорная кислота, четыреххлористый титан и др., НИИТеплоприбор создает методику пересчета характеристик турбинных расходомеров с воды на другие среды с различными вязкостями и плотностями. Экспериментальная проверка методики на хлорной кислоте, расплавленной сере, желтом фосфоре и четыреххлористом титане показала сходимость расчетов с экспериментом с точностью до 1%.

В последние годы возникла необходимость в испытаниях и градуировке расходомеров, работающих на средах с температурами до 500°С. Для этих целей в НИИТеплоприборе создана расходомерная установка, производительностью до 16 м³/ч. Система изолирована от внешнего воздуха и заполнена нейтральным газом. Расход контролируют с помощью мерного бака и электронных секундомеров с точностью порядка 1%. Однако требуется создать установку, обладающую большей точностью и большей производительностью.

Также важным является создание средств определения метрологических характеристик уровнемеров.

Промышленность выпускает: поплавковые уровнемеры, применяемые при температуре среды до 0,1 мн/м² (~1 кгс/см²), контактно-механические уровнемеры, используемые при нормальных условиях эксплуатации; буйковые уровнемеры для измерения уровня жидкостей при температуре до +200°С и давлении до 10 мн/м² (~100 кгс/см²), емкостные индикаторы уровня и емкостные датчики уровня.

Эти приборы предназначены для измерения уровня сред с вязкостью до 1 лз при температурах от -40 до $+200$ °С и давлений до 25 Мн/м^2 (250 кгс/см^2).

В настоящее время организации Министерства разрабатывают новые уровнемеры индуктивного, емкостно-импульсного и ультразвукового типов для измерения уровня сред, находящихся, как правило, при высоких давлениях и температурах.

НИИ Теплоприбор для поверки уровнемеров, предназначенных для работы в условиях повышенных температур и давлений создал стенды, позволяющие определять метрологические характеристики уровнемеров при температурах: до 300 °С — для воды, до 80 °С — для керосина и масла, до 500 °С — для металла. Однако все они не обладают необходимой высокой точностью.

В метрологических институтах пока еще нет образцовых уровнемерных установок и, как следствие этого, не разработаны методы поверки и аттестации имеющихся установок в научно-исследовательских институтах, конструкторских бюро и на заводах-изготовителях.

В связи с ростом потребности народного хозяйства в приборах для измерения уровня агрессивных сред при высоких давлениях и температурах необходимо провести большую работу по созданию соответствующих образцовых уровнемерных установок и контрольных измерительных средств.

Промышленность выпускает приборы широкой номенклатуры для измерения давления. Класс точности датчиков, в основном, 0,6 и 1.

В настоящее время для аттестации приборов давления применяют:

- жидкостные микроманометры типа ММ-250 с погрешностью $\pm 0,005 \text{ Мн/м}^2$ на диапазон измерения $0-25 \text{ Мн/м}^2$;
- ряд грузопоршневых манометров классов точности 0,05 и 0,02 с пределами измерения до 0,25; 0,6; 6,0 и 250 Мн/м^2 ;
- мановакуумметры грузопоршневые типа МВП-2,5 с погрешностью $\pm 0,05\%$ и пределами измерения до $0,25 \text{ Мн/м}^2$;
- манометры пружинные образцовые классов точности 0,16 и 0,25 на пределы измерения от 0,1 до 60 Мн/м^2 ;
- манометры контрольные МКБ класса точности 0,1 для измерения выходного сигнала пневматических приборов.

Однако необходимо отметить, что для пределов давления $0-40$ и $0-60 \text{ Мн/м}^2$ имеющиеся средства не обеспечивают требуемой точности измерения. Кроме того, отсутствуют средства контроля перепада давлений при высоком статическом давлении. Грузопоршневые и пружинные манометры высокой точности отечественная промышленность выпускает в недостаточном количестве.

Для более полного удовлетворения потребностей промышленности в контрольно-измерительных средствах повышенной

точности НИИТеплоприбор разработал контрольный цифровой манометр типа КМЦ-1,6 и автоматический контрольный задатчик АКЗ-1,6. Приборы предназначены для наладки и поверки серийно выпускаемых приборов (датчиков ГСП, функциональных блоков АУС, элементов и приборов УСЭППА, вторичных приборов, преобразователей и т. п.) в условиях приборостроительных заводов и цехов контрольно-измерительных приборов промышленных предприятий.

Контрольный цифровой манометр типа КМЦ-1,6 прост в эксплуатации. Он рассчитан на предел измерения $0-0,16 \text{ Мн/м}^2$ ($0-1,6 \text{ кгс/см}^2$) и имеет класс точности 0,1 при оценке погрешности, отнесенной к текущему значению измеряемого давления.

Автоматический контрольный задатчик АКЗ-1,6 имеет пределы задания давления $0,01-0,16 \text{ Мн/м}^2$, основная погрешность которого не более $\pm 0,1\%$ от текущего значения задаваемого давления. Прибор оборудован устройством для автоматического задания давления по заранее составленной программе, вводимой с помощью перфокарты.

Выпускаемые в настоящее время контрольно-измерительные приборы давления удовлетворяют, в основном, требованиям приборостроительной промышленности. Дальнейшее развитие контрольно-измерительных приборов давления должно идти как по пути повышения их класса точности, так и по пути создания контрольных приборов, обеспечивающих охват более широких пределов измерения.

Надо отметить, что в последнее время работа институтов Комитета стандартов значительно улучшена. Некоторые организации Министерства приборостроения, средств автоматизации и систем управления, например НИИТеплоприбор, сотрудничают с институтами Комитета стандартов и нужно надеяться, что такое сотрудничество позволит сравнительно быстро, без излишнего дублирования, с использованием современных возможностей измерительной техники решить ряд важных для народного хозяйства метрологических задач.

Поступила в редакцию

4/II 1969 г.

**ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
(РТВ)**

Я хочу начать свой доклад о Федеральном физико-техническом институте в Брауншвейге с выражения сердечной благодарности за любезное приглашение в Ленинград. Мой приезд сюда является ответным визитом на посещение докторами Горбачевичем и Бурдуном института РТВ в 1962 г. по случаю 75-летней годовщины со дня его основания. Все сотрудники РТВ передают через меня коллегам в Ленинграде сердечные пожелания в связи с 75-летней годовщиной института метрологии им. Д. И. Менделеева. И в будущем мы всегда будем рады приветствовать у себя гостей из института им. Д. И. Менделеева и из других учреждений Советского Союза. Мы надеемся, что наше сотрудничество, которое продолжается уже десятилетия, и личные связи в дальнейшем еще более расширятся и окрепнут.

Метрология заинтересована в тесном международном сотрудничестве больше каких-либо других наук. Вся мировая торговля и обмен научным опытом между народами были бы невозможны без совместных усилий по обеспечению единства мер и без согласованных и зачастую чрезвычайно точных измерений. Поэтому я рассматриваю ваше любезное приглашение и мой визит в ваш прекрасный исторический город как символ обоюдного стремления к более тесному сотрудничеству между нашими институтами. Оба наших института вместе с институтами других стран уже давно сотрудничают на международном уровне в соответствии с Конвенцией по метру, а также в Международной организации законодательной метрологии.

Как немец, здесь в Ленинграде, я с ужасом думаю о тех страданиях и огромных жертвах, которые выпали на долю жителей этого города во время нашествия Гитлера. И тем более я вижу в этом любезном приглашении в Ленинград знак того, что наши советские коллеги хотят сегодня работать вместе

с нами, немцами, для дела построения другого, лучшего мира, отличного от мира времен Второй мировой войны. Законы естественных наук и техники везде, во всех странах одинаковы. Политические же взгляды и системы различны. Поэтому в первую очередь ученые и инженеры могут и должны путем личных контактов способствовать взаимопониманию в деле международного развития науки и сотрудничать в устранении политических обострений и опасностей. Своим визитом в ваш известный институт я также хочу внести свой небольшой вклад в это общее дело.

За последние годы лишь некоторые коллеги из Ленинграда побывали в РТВ. Поэтому я более подробно познакомлю участников симпозиума с нашим институтом.

Опустив исторические факты в создании Федерального физико-технического института (РТВ), хотя они содержат очень интересные данные, связанные с развитием метрологии в Германии, рассмотрим некоторые результаты научной деятельности института.

Ежегодно РТВ в своих «Научных записках» публикует отчет о деятельности за минувший год. Выпуск за 1967 г. содержит важнейшие статистические данные, общий обзор, в котором подробно освещен вопрос о международном сотрудничестве и сообщено о работах лабораторий РТВ, число которых в настоящее время превышает 80.

Из более чем 1200 сотрудников в Брауншвейге и Берлине 300 человек имеют университетское и высшее техническое образование — это большей частью специалисты-физики и дипломированные инженеры. Почти все ученые РТВ более старшего возраста имеют ученую степень доктора наук.

В 1967 г. общий годовой бюджет РТВ превысил 40 млн. марок. Почти половину этой суммы составили расходы на зарплату сотрудников, значительная часть была израсходована на строительство новых лабораторий. За счет поступлений от промышленности, научных учреждений и т. д. за выполненные измерительные и поверочные работы погашается лишь десятая часть бюджетных расходов РТВ.

Более 300 иностранных специалистов из 30 государств всех континентов (в том числе из СССР, ПНР, СРР, ЧССР) посетили РТВ в 1967 г. Некоторые из иностранных ученых были командированы к нам и работали по нескольку месяцев, а иногда и более года, в лабораториях РТВ. В 1969 г. наши ученые 25 раз побывали в командировках в СССР, ЧССР, ПНР, ВНР. Всего в 1968 г. состоялось 176 заграничных командировок. В рамках договоров о взаимопомощи в области метрологии в РТВ обучаются иностранные специалисты метрологических учреждений развивающихся стран.

Важнейшие задачи РТВ каждый год определяются внутриведомственным бюджетным планом в соответствии с последними

достижениями в области метрологии. В официальном плане бюджета на 1969 г. говорится:

— К задачам, стоящим перед Федеральным физико-техническим институтом, относятся:

А. Научные исследования и создание новой техники:

1. Исследования и создание новой техники во всех областях физико-технических измерений.

Здесь имеется в виду в первую очередь воспроизведение, хранение и усовершенствование эталонов физических единиц для обеспечения национального и международного единства мер.

2. Исследование и создание новой техники для решения физических и технических проблем большой важности с помощью уже имеющихся совершенных исследовательских установок.

В. Проведение испытаний:

1. Испытания и допуск измерительных приборов к поверке и аттестации.

2. Испытания аппаратуры по технике безопасности и защите от излучений.

3. Технические испытания и аттестация аппаратуры для хранения и транспортировки ядерного топлива.

4. Испытания и разрешение применения аппаратуры для игр.

С. Испытания измерительных приборов, аппаратуры и материалов в тех случаях, когда нет соответствующих учреждений, которые специально занимаются такими испытаниями.

Д. Прочие задачи:

1. Участие в национальных и международных организациях, занимающихся вопросами метрологии, стандартизации, а также проблемами, относящимися к исследовательской деятельности РТВ.

2. Участие в разработке проектов законов и инструкций в областях, перечисленных в пункте В.

3. Общая обработка информации в области физики.

4. Помощь в области метрологии развивающимся странам.

РТВ является высшей технической инстанцией в области поверочной деятельности.

Таковы же его функции по отношению к ведомствам, занимающимся испытаниями в области электрических измерений.

В настоящее время в РТВ имеются отделы механических, электрических и тепловых измерений, отделы оптики, акустики, атомной физики и институт в Берлине, который продолжает и дополняет работы, проводимые в Брауншвейге.

Кроме этого, в состав центрального аппарата, наряду с несколькими управленческими отделами, входят также общетехнические секторы, среди них вычислительный центр, центральная механическая мастерская, технические участки и библиотека.

Рассмотрим работу каждого отдела на примере какого-либо одного исследования.

ОТДЕЛ МЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Атомные часы, воспроизведение единицы времени

Новая лаборатория атомных часов в РТВ называется лабораторией Ганса Колфермана. Кроме обычных серийных атомных часов, здесь под руководством профессора Г. Бекера исследуются и совершенствуются два водородных мазера нашей конструкции. Недавно Бекер и Фишер сообщили [1] о точных международных сличениях водородного мазера конструкции РТВ с переносными цезиевыми часами с выходной частотой 5 Мгц. Здесь имеется в виду так называемый эксперимент «летающие часы». Это название говорит о том, что эти очень точные эталонные часы транспортируют из одного места измерений в другое самолетом. Такой способ позволяет уже сегодня сличать атомные часы наивысшей точности, применяемые в различных институтах всего мира, с относительной погрешностью лишь в 10^{-12} , в то время как сличения частот с применением электромагнитных волн имеют значительно большие погрешности вследствие того, что необходимые для определения времени распространения радиоволн большие расстояния измерить точно очень трудно.

Что касается погрешности измерений времени с помощью атомных часов, то проведенные до сих пор международные сличения еще не дали окончательного результата. Необходимая для таких измерений аппаратура, в которой использовано излучение цезия, также находится еще в стадии разработки. Различия в значениях частот, полученные при сличениях водородных мазеров ряда метрологических институтов, имеют порядок 10^{-11} . Предполагают, что основную роль здесь играет систематическая погрешность вследствие сдвига частоты, который происходит в результате столкновений атомов водорода со стенками сосуда из тефлона. Этот источник погрешностей будет в дальнейшем изучен в РТВ более подробно.

Специалистам, которые занимаются проблемами воспроизведения новой «атомной» секунды, хорошо известно, что профессор Бекер и его сотрудники сделали существенный вклад в разработку нового определения единицы времени.

ОТДЕЛ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Вольтметры высокого напряжения для постоянного тока

В лаборатории высоких напряжений, руководимой доктором В. Клаусницем, для точного измерения постоянных напряжений был разработан вольтметр высоких напряжений [2] по уже известному принципу генератора. Наружный круглый цилиндрический электрод (внутренний диаметр 80 см) обладает потенциа-

дом высокого напряжения, которых следует измерить. Внутренний электрод расположен эксцентрично по отношению к наружному и заземлен. В качестве вращающейся измерительной системы в середине находятся две изолированные друг от друга половинки цилиндра. Одна вращающаяся половина цилиндра соединена с землей через чувствительный амперметр, а другая — через такой же величины сопротивление. В результате коммутации переменного тока, возбужденного полем высокого напряжения, через амперметр будет протекать постоянный ток, который может быть точно вычислен из данных геометрических параметров в зависимости от измеряемого высокого напряжения. Для измерения высоких напряжений в дальнейшем будет использован газ под давлением. По нашему мнению, представляется возможным измерять напряжения до 200 кВ с точностью порядка 10^{-3} — 10^{-4} ; это касается также и переменных напряжений.

ОТДЕЛЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Эти отделы поддерживают тесное международное сотрудничество в области техники безопасности и взрывозащиты. Лабораторией электрических машин руководит доктор Х. Дрейер. Здесь проводится большая работа по испытаниям конструкций приборов с взрывозащитными устройствами, в первую очередь моторов и защитных устройств категории «повышенная безопасность» [3].

ОТДЕЛ ТЕПЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Лучевая дозиметрия с применением экзоэлектронов (эффект Крамера)

Экзоэлектроны, открытые в РТВ профессором Крамером [4], в последние годы вызвали постоянно возрастающий интерес во всем мире, при этом на первый план выступило применение «эффекта Крамера» для дозиметрии рентгеновских и гамма-лучей.

Экзоэлектроны излучаются при нагреве твердых тел, если предварительно с помощью электронного устройства были возбуждены путем облучения (в частности рентгеновскими или гамма-лучами) соответствующие места нарушения кристаллической решетки. Судя по результатам исследований Крамера, проведенных в РТВ в его лаборатории экзоэлектронов, для дозиметрии лучше всего применять окись бериллия, если для повышения проводимости к ней добавлять некоторое количество графита (например, в отношении 50:50) в зависимости от того, какую чувствительность стремятся получить.

В самом благоприятном случае зависимость экзоэлектронной эмиссии от дозы облучения будет линейной.

Кривая экзoeлектронной эмиссии окиси бериллия BeO , возбужденной с помощью рентгеновских лучей при комнатной температуре и скорости нагрева $1^\circ\text{C}/\text{сек}$, имеет два ярко выраженных главных пика: при 240° и 570°C . Их образование объясняется наличием ловушек захвата с различными энергиями активации. Экзoeлектронная эмиссия, измеренная счетчиками Гейгера — Мюллера, является мерой дозы излучения, полученной при комнатной температуре. Можно наблюдать строгую пропорциональность между экзoeлектронной эмиссией и дозой в случае применения BaSO_4 и CaSO_4 .

Более подробно приготовление твердотельных слоев и вся экспериментальная аппаратура описаны в многочисленных публикациях.

ОТДЕЛ ОПТИКИ

Термический приемник излучения простой конструкции

На заседании Германского общества по прикладной оптике в Бадене под Веной в 1968 г. доктор К. Бишофф (РТВ) сделал сообщение о разработке радиометра простой конструкции, основанного на абсолютном методе измерений [5].

Конструкция, предложенная доктором Бишоффом, по всей видимости, обеспечивает измерения в спектральном диапазоне между $400\text{--}2000\text{ мкм}$ при плотности облучения от 100 до $1000\text{ мквт}/\text{см}^2$ с систематической погрешностью менее $\pm 0,3\%$; воспроизводимость измеряемых значений лучше $\pm 0,1\%$.

Конструкция приемника излучения следующая. На слюдяную шайбу толщиной 20 мкм и диаметром 55 мм с облучаемой стороны нанесен методом напыления нагревательный элемент прямоугольной формы; диаметр вписанной в него окружности равен примерно 15 мм . На этот элемент в качестве поглотителя измеряемого облучения нанесено черное пятно диаметром 20 мм . На другой стороне слюдяной шайбы нанесен слой серебра толщиной $0,15\text{ мкм}$; он служит для выравнивания температуры в случае неравномерного нагрева вследствие неоднородностей нагревательного элемента или измеряемого поля излучения. Наружная поверхность серебряного слоя, так же как и поверхность поглотителя, покрыта черным матовым лаком, так как для определения возрастания температуры, которое происходит вследствие поглощения излучения или соответствующего электрического нагрева, измеряется тепловое излучение серебряной шайбы. В качестве датчика температуры здесь служит термоэлектрическая батарея, элементы которой находятся позади серебряной пластинки на расстоянии 2 мм . В основу измерения положен метод сравнения электрической мощности, которая может быть точно измерена, с мощностью излучения, вызывающего тот же нагрев.

Исследования качества звука старинных и современных скрипок

В лаборатории музыкальной акустики, которой руководит профессор Лоттермозер, проводился эксперимент, результаты которого В. Лоттермозер и Ю. Майер (РТВ) опубликовали в феврале 1968 г. в журнале «Конструирование музыкальных инструментов» в статье под заглавием «Звучание скрипки Страдивари «Принц Кевенхюллер» [6].

Иегуди Менухин предоставил эту известную скрипку из своей коллекции нашему институту для исследования ее физико-акустических свойств. В более поздней работе, вышедшей в свет в том же журнале в апреле — мае 1968 г., В. Лоттермозер дополняет указанные выше эксперименты сравнительными исследованиями свойств двух скрипок Страдивари из коллекции Иегуди Менухина («Кевенхюллер» 1733 года и «Сойль» 1714 года) и двух скрипок Гварнери дель Изу («Дональдсон» 1739 года и «Дэгвиль» 1735 года).

В результате измерений, проведенных в РТВ без применения струн, была получена кривая резонанса скрипки Страдивари «Кевенхюллер». Чтобы получить такую резонансную кривую, исследования проводят в помещении со звукоизоляцией. При этом колебания возбуждают с помощью иглы, расположенной у подставки и связанной с электродинамическим датчиком (аналогично конструкции громкоговорителя). Частота рабочего напряжения поддерживается постоянной в диапазоне от 100 до 10 000 гц. Во время постепенного изменения частоты датчика звуковое давление, создаваемое скрипкой, измеряют с помощью микрофона.

У скрипок более низкого качества, особенно на частотах менее 1000 гц, собственный резонанс корпуса скрипки сложной формы выражен значительно ярче, чем у замечательной скрипки Страдивари, т. е. он является музыкальной помехой.

В результате исследования 10 скрипок старых итальянских мастеров в РТВ была получена резонансная кривая и отклонения резонансной кривой скрипки Страдивари «Кевенхюллер» от средних значений. Очень малые отклонения этих кривых подробно рассматриваются в работе Лоттермозера и Майера. Что касается других специфичных моментов, то они рассмотрены в трудах упомянутых сотрудников РТВ, снискавших уважение у музыкантов и изготовителей музыкальных инструментов во всем мире. Сотрудникам РТВ хорошо известны также плодотворные труды московских ученых, которые проводят аналогичные исследования свойств скрипок, например, труды Б. А. Янковского.

ОТДЕЛ АТОМНОЙ ФИЗИКИ

Дифференциальный микрокалориметр для определения активности радиоактивных источников, обладающих тепловой мощностью менее 10^{-7} Вт в качестве нижнего предела чувствительности

Руководитель лаборатории радиохимических измерений, доктор Х. Рамтун в последние годы разработал и испытал дифференциальный микрокалориметр, служащий для калориметрического определения активности радиоактивных источников. Схема микрокалориметра имеет следующие особенности.

Прибор состоит из двух калориметрических сосудов, в которых интенсивность теплообразования, обусловленного измеряемым радиоактивным источником с высокой чувствительностью, сравнивается с эквивалентным количеством тепла, выделяемого электрическим нагревательным элементом. При применении термоэлектрической батареи из меди и константана измерительная система срабатывает даже в том случае, когда разность температур составляет 10^{-6} град. Благодаря своей высокой чувствительности этот микрокалориметр может быть использован для измерения более малой активности, вплоть до диапазона, выражаемого в милликюри.

Основным преимуществом калориметрического метода измерений по сравнению с обычным подсчетом испускаемых источником частиц или гамма-квантов является возможность не вносить поправку на собственное поглощение радиоактивного источника даже в том случае, когда при относительных сличениях применяемый стандартный источник обладает поглощающей способностью, отличной от поглощающей способности объекта измерения.

Несмотря на то, что микрокалориметр предназначен преимущественно для исследования альфа- и бета-источников, во многих случаях он может быть применен и для исследования неполной абсорбции первичных гамма-лучей и обеспечивает при этом достаточно точную коррекцию. В опубликованных работах доктора Рамтуна [7] можно найти подробные данные о различных поправках и среди них данные для вторичных гамма-лучей (тормозное излучение), которое генерируют в рубашке сосуда богатые энергией бета-лучи.

БЕРЛИНСКИЙ ИНСТИТУТ РТВ

Каскадная горелка с плазмой аргона в качестве эталона плотности энергетической яркости в диапазоне от 250 до 700 нм

В Берлинском институте РТВ доктором В. Венце и его сотрудниками в последние годы были проведены обширные исследования плазмы аргона при различных физических условиях [8]. Ранее эти работы проводились под руководством профессора

Шлея, который в настоящее время является руководителем отдела тепловых измерений в Брауншвейге. Сейчас работы в области исследования плазмы в Берлинском институте возглавляет приват-доцент Г. Заурбрей. Цель этих исследований заключается в разработке стандартных излучателей для измерения высоких температур (до 10 000 К и более).

В результате этих исследований был разработан также эталон энергетической яркости, с помощью которого, особенно в ультрафиолетовом диапазоне при длине волны 200—400 нм, обеспечивается воспроизведение яркости на два порядка выше, чем с помощью угольной дуги.

В каскадной горелке плазма аргона возникает между полыми графитовыми электродами в канале диаметром 7 мм. Этот канал образован 13 полыми медными шайбами толщиной 8 мм с водяным охлаждением, между которыми находятся изолирующие пластинки из тефлона толщиной 1,5 мм.

Давление плазмы аргона составляет 760 торр, сила тока дуги 90 а, напряжение дуги 113 в, чистота применяемого аргона 99,99%. При условиях, описанных более подробно в специальной литературе [8], погрешность воспроизведения яркости плазменного излучения составляет $\pm 2\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Becker G. und Fischer B. PTB — Mitteilungen 3/1968, S. 177/183; «Beiträge zum internationalen Wasserstoffmaser — Vergleich mit transportabler Atomuhr».
2. Claußnitzer W. JEEE — Transactions on Instrumentation and Measurement 1968, December, «A generating Voltmeter with calculable Voltage — Current — Ratio for Precise High — Voltage — Measurements», vgl. Physics Today, 21 (1968), S. 107.
3. Dreier H. s. Broschüre «Der Explosionsschutz in der Elektrotechnik» des VDE — Bezirksvereins Frankfurt/Main, 2. Aufl. 1968, «Der Explosionsschutz in internationaler Sicht».
4. Kramer J. Z. angew. Phys. 20 (1966), S. 411; Holzapfel G. und Kramer J. 4-th Czech. Conf. on Electronics and Vacuum Physics Transactions, Prague 1968, S. 388/394, «Exoelektronen-Emission von Berylliumoxid»; Becker K. and Robinson E. M. Health Phys. (1968), 463/466, «Integrating Dosimetry by Thermally Stimulated Exoelectron (After-) Emission».
5. Bischoff K. Z. Optik 28 (1968/69), im Druck, «Ein einfacher Absolutempfänger hoher Genauigkeit».
6. Lottermoser W. und Meyer J. Instrumentenbau — Zeitschrift, Heft 2 (1968), «Über den Klang der Stradivari-Geige «Price Khevenhüller»; Lottermoser W. Instrumentenbau — Zeitschrift, Heft 4/5 (1968), «Analysen von Geigenklängen aus solistischen Darbietungen».
7. Ramthun H. PTB — Mitteilungen 1964, S. 117/121, «Mikrokalorimetrische Aktivitätsmessung von Radionukliden»; Ramthun H. Z. Nukleonik 8 (1966), S. 244/247, «Halbwertszeit und spezifische Aktivität von Radium-226».
8. Wende B. Z. angew. Phys. 20 (1966), S. 473/476, «Ein Kaskadenbrenner als Strahldichte-Normal hoher Strahldichte»; B. Wende Z. Optik 25 (1967), S. 284/288, Strahldichtewerte des Kaskadenbrenner — Strahldichtenormals.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПИРОМЕТРИИ

Метрологические основы измерений высоких температур, удовлетворяющие современным требованиям науки и техники, должны включать:

физические обоснования практической температурной шкалы и методов ее реализации;

эталонную аппаратуру, реализующую эту шкалу, безотказно действующую и обеспечивающую предельную точность;

методы и средства применения этой шкалы к пирометрам разных принципов действия в широком спектральном и температурном диапазоне;

образцовую аппаратуру, обеспечивающую градуировку, поверку и испытания пирометров на всей территории страны.

Физические обоснования температурной шкалы

Для промышленных измерений температуры, где требуемый тепловой режим обычно устанавливают или уточняют экспериментально, выбор температурной шкалы, как правило, не имеет существенного значения: пригодна любая условная, но точно воспроизводимая температурная шкала.

Совершенно иная картина возникает при теплофизических исследованиях, где для установления тепловых свойств веществ и устройств необходимо применение термодинамической температурной шкалы. В то же время единство измерений требует применения одной температурной шкалы для всех нужд народного хозяйства. Поэтому практическая температурная шкала должна совпадать со шкалой термодинамической с предельно возможной точностью.

Термодинамическая температурная шкала должна строго соответствовать общим физическим законам, справедливым для всех веществ. Главным инструментом для построения такой шкалы служат газовые термометры различных типов, показания которых могут быть приведены к законам идеального газа. В области низких температур для этой цели используют также закономерности адиабатического размагничивания парамагнитных солей и некоторые другие явления, подчиняющиеся общим законам термодинамики. В последнее время становятся реальными попытки осуществления термодинамической шкалы, использующие новые методы: термозумовой, акустической и др. Для экстраполяции термодинамической температурной шкалы в область высоких температур, где газовый термометр теряет точность, используют законы излучения абсолютно черного тела.

Дмитрий Иванович Менделеев в 1874 г. опубликовал ряд теоретических исследований, касающихся принципов построения термодинамической температурной шкалы. Основной научный вывод этих исследований — предложение применять термодинамическую температурную шкалу с одной реализуемой опорной точкой — было принято Генеральной конференцией по мерам и весам 80 лет спустя — в 1954 г. Таким образом, гениальный русский ученый предсказал пути развития температурной метрологии на много лет вперед.

Позднее, будучи управляющим Главной палатой мер и весов, Д. И. Менделеев совместно с сотрудниками поставил экспериментальные исследования в области газовой термометрии. С тех пор в нашей стране газовая термометрия активно развивается.

В настоящее время во ВНИИМ функционирует газовый термометр № 3. Этот термометр рассчитан на высокую точность измерений в широком температурном диапазоне, что необходимо по соображениям единства практической температурной шкалы и обеспечения возможности составления и обоснования конкретных предложений по ее уточнению.

С газовым термометром № 3 проведен ряд исследований термодинамической шкалы в диапазоне от тройной точки воды до точки золота. Принятая в 1968 г. новая температурная шкала МПТШ-68 во всей области выше 0°C построена по результатам исследований, выполненных в двух лабораториях — ВНИИМ и РТВ (ФРГ).

Точность шкалы МПТШ-68 — ее совпадение с термодинамической шкалой, достигнутое в результате исследований с помощью газовых термометров, составляет в этом диапазоне около $0,01$ град до 500°C и около $0,1$ град в точке золота. Можно считать, что такой уровень газовой термометрии обеспечивает в настоящее время возможность применения МПТШ-68 для всех практических измерений температуры, в том числе и для точных измерений при теплофизических экспериментах.

Для дальнейшего развития исследований термодинамической температурной шкалы с учетом роста требований к точности, необходима разработка новых принципов измерения, позволяющих устранить неисключенные остатки систематических погрешностей, присущих известным методам газовой термометрии. Во ВНИИМ с этой целью исследуют газовый термометр, работающий по методу двух резервуаров, а также термометры, использующие методы: термошумовой, электроакустический и ядерного квадрупольного резонанса.

МПТШ основана на применении естественных эталонов: реперных точек и интерполяционных приборов, использующих чистые вещества. Благодаря этому результаты исследований термодинамической температурной шкалы становятся всеобщим достоянием и используются в равной мере как в стране, выполнявшей эксперименты с газовым термометром, так и в любой другой стране. При этом отпадает необходимость хранения каких-либо эталонов термодинамической температурной шкалы. Главное требование к эталонам МПТШ — высокая воспроизводимость реализуемой ими шкалы.

Выше точки золота различия между МПТШ и термодинамической шкалой малы, так как МПТШ строится здесь по законам излучения абсолютно черного тела. При этом решающее значение для обеспечения точности построения шкалы имеют совершенство моделей черного тела и точность уравнивания монохроматических яркостей излучателей, различающихся конструкцией.

Эталонные высокие температуры

Для построения шкалы высоких температур во ВНИИМ с 1964 г. применяют фотоэлектрический метод измерений.

Начало применения этого метода в температурной метрологии было положено в ХВНИИМ, который является ведущей организацией в СССР в области высокотемпературного научного приборостроения. Здесь в 1956—1958 гг. была создана серия прецизионных спектропирометрических фотоэлектрических компараторов для градуировки температурных ламп (СПК-1, СПК-2, СПК-3), которыми оснащены все метрологические институты СССР и ряда социалистических стран. Действие их основано на использовании фотоумножителей, работающих в нулевом модуляционном режиме, когда на ФЭУ попеременно попадают два сравниваемых световых потока, причем один из них изменяется до тех пор, пока не сравняется с другим. Такой метод позволяет полностью использовать положительное качество ФЭУ — малый порог чувствительности и существенно ослабить трудности, связанные с главным недостатком ФЭУ — непостоянством его чувствительности.

Первые эксперименты по построению шкалы высоких температур фотоэлектрическим методом проводились во ВНИИМ на

компараторе СПК-1, изготовленном в ХВНИИМ. Эти эксперименты позволили выявить ряд источников погрешностей, неощутимых ранее из-за низкой чувствительности визуального метода. Основными из них являются: рассеяние света в оптических устройствах, поляризация света, возможная нестабильность юстировки отдельных деталей, нестабильность температурных ламп.

По данным этих предварительных исследований во ВНИИМ были разработаны новые фотоэлектрические компараторы СП-4К и СПКУ, в конструкции которых приняты меры к исключению выявленных источников погрешностей. Для построения температурной шкалы фотоэлектрическим методом был применен компаратор СП-4К. После того, как результаты советских работ были доложены Международному бюро мер и весов, аналогичные работы были начаты за рубежом (США, Англия, ФРГ, Канада, Япония).

Поскольку для ФЭУ закон Тальбота неприменим, в ХВНИИМ был разработан новый метод экстраполяции значений температуры выше точки золота при построении температурной шкалы, основанный на принципе сложения яркостей. Этот метод реализован с помощью разработанного во ВНИИМ зеркального устройства для удвоения яркостей.

Эти работы привели к созданию «фотоэлектрической шкалы» высоких температур — официальной шкалы выше точки золота, утвержденной во ВНИИМ в 1966 г. Еще в 1964 г. эта шкала была введена в метрологическую практику: по ее эталонам градуируют (также фотоэлектрическим методом) рабочие эталоны всех метрологических институтов, что обеспечивает применение этой шкалы на всей территории страны.

Новая шкала высоких температур обеспечила повышение точности эталонов в 3—5 раз по сравнению со шкалой, осуществляемой прежним, визуальным методом. Дальнейшее снижение погрешностей эталонов требует как продолжения работ по совершенствованию фотоэлектрических компараторов и моделей черного тела, так и главным образом повышения стабильности температурных ламп.

Нестабильность высокотемпературных излучателей, связанная с изменениями структуры, испарением вещества и другими неизбежными при высоких температурах процессами, приводит не только к погрешностям эталонов и образцовых приборов. Эта нестабильность заставляет усложнять систему эталонов: приходится вводить в состав эталонов большое число излучателей и часто переградуировать их эталонные методы и взаимно сличать. Экспериментальные работы по совершенствованию эталонов и разработке новых методов измерения также приходится усложнять: каждый эксперимент повторять многократно, используя достаточное число излучателей для обеспечения надежности результатов.

Расширение диапазонов температурной шкалы

Температурная шкала, построенная с помощью моделей черного тела, реализующих точку золота, компаратора СП-4К, зеркального устройства для удвоения яркостей и температурных ламп типа Сн-10-300, охватывает диапазон яркостных температур от точки золота до 2500°C и спектральный диапазон от $0,47$ до 1 $\mu\text{км}$.

Особенностью метрологии высоких температур является применение технических пирометров излучения с различными принципами действия: яркостных, радиационных, цветовых, к тому же использующих разные области спектра. Это вызвано многообразием условий и косвенным характером измерения температур по тепловому излучению, что требует возможности выбора пирометра с принципом действия, обеспечивающим минимум методических погрешностей, т. е. выбора такой характеристики излучения, которая применительно к каждому конкретному объекту и условиям дает наибольшее приближение к истинной температуре тела. Общими тенденциями развития современного пирометрического приборостроения являются: повышение точности измерения, преобладание фотоэлектрических методов измерения, использование новых характеристик излучения, расширение температурного и спектрального диапазонов. В связи со сложностью градуировки и поверки метрологическое обеспечение этих новых, прогрессивных методов пирометрии требует богатого арсенала образцовой аппаратуры, как правило — отдельной для каждого типа технических приборов.

Спектральный диапазон основных эталонов шкалы высоких температур обеспечил возможность градуировки цветовых пирометров в видимой части спектра. Для этого во ВНИИМ и некоторых других метрологических организациях имеются рабочие эталоны и образцовые приборы — температурные лампы типа Сн-10-300, градуированные на цветовые температуры. Температурный диапазон градуировки на яркостные и цветовые температуры в видимой части спектра доведен до 6000°C , для чего во ВНИИМ имеется соответствующая образцовая аппаратура.

Для метрологического обеспечения инфракрасной пирометрии в ХВНИИМ был разработан инфракрасный пирометр метрологического назначения типа ИКП-57 с порогом чувствительности $0,2$ град в точке золота. Прибор отградуирован во ВНИИМ с помощью моделей черного тела в диапазоне яркостных температур от 400 до 1800°C в области спектра от $0,8$ до $2,2$ $\mu\text{км}$. Он применяется для градуировки излучателей на яркостные и цветовые температуры в этой области спектра. Позднее в ХВНИИМ на базе пирометра ИКП-57 был разработан универсальный автоматический спектропирометр УСП-1, предназначенный для применения в качестве образцового при градуировке пирометров, использующих как видимое, так и инфракрасное излучения.

В настоящее время во ВНИИМ и ХВНИИМ проводятся работы по дальнейшему расширению спектрального диапазона температурной шкалы.

Метрология цветовых температур предъявляет весьма высокие требования к спектральной характеристике образцовых излучателей. Отступление от этих требований делает образцовые лампы пригодными для градуировки цветовых пирометров, спектральные характеристики которых достаточно строго фиксированы, что неоправданно усложняет требования к техническим приборам. Так, например, вольфрам является удовлетворительным материалом для этой цели только в видимой части спектра, и то с существенными ограничениями. Во ВНИИМ разрабатываются и имеются опытные образцы излучателей для цветовой пирометрии в ближней инфракрасной области спектра.

Существенные перспективы усовершенствования образцовых излучателей открываются при изготовлении их тела накала не в виде ленты, а в форме излучающей полости. По такому принципу устроены лампы, разработанные в Англии и получившие название «лампы черное тело». Эти лампы, по имеющимся сведениям, обладают повышенной стабильностью и улучшенной спектральной характеристикой. При такой конструкции ламп необходимо предъявить повышенные требования к однородности температурного поля их тела накала, что не учтено в английских лампах. Тем не менее такой путь усовершенствования ламп безусловно перспективен.

В ХВНИИМ и во ВНИИМ разрабатываются методы и аппаратура для измерения коэффициентов черноты излучения различных материалов и ведутся другие работы, необходимые для повышения точности измерения истинных температур оптическими методами. Для этого разработаны новые измерительные установки, в том числе в ХВНИИМ — установка с солнечной печью.

Во многих метрологических институтах имеются модели черного тела большого размера, предназначенные для градуировки радиационных пирометров в диапазоне от 100 до 2000—2500° С. В области радиационной пирометрии ХВНИИМ является головным институтом.

В связи с развитием исследований плазмы и техники ее практического применения перед метрологией встает задача разработать как наиболее универсальные методы исследования, достоверность и точность которых не должна вызывать сомнений, так и методы определения стандартных справочных данных, необходимых для диагностики плазмы. В ХВНИИМ и ВНИИМ проводятся в этом направлении некоторые исследования. Указанная задача, связанная с экстраполяцией температурной шкалы в область высоких температур, не может быть решена без стабильных высокотемпературных плазменных излучателей.

Образцовая аппаратура

Для оперативного метрологического обеспечения оптической пирометрии необходимо, чтобы массовые градуировки, поверки и испытания пирометров выполнялись без применения моделей черного тела. Эти модели в принципе позволяют при градуировке пирометров разных типов пользоваться образцовыми приборами одного типа, например визуальными яркостными пирометрами ОП-48 и ЭОП-51, разработанными в ХВНИИМ. Их применение существенно сократило бы объем метрологических работ по разработке и градуировке образцовых приборов. Однако работа с моделями черного тела слишком сложна для повседневной технической практики и обеспечивает требуемую точность лишь при весьма тщательной постановке эксперимента.

Поэтому целесообразно упрощать градуировку, поверку и испытания пирометров серийного производства, в частности, уже при их разработке. Средством такого упрощения является создание образцовых пирометров или образцовых излучателей, позволяющих градуировать технические приборы методом непосредственного сличения без применения моделей черного тела. Все работы с моделями черного тела при этом могут быть сосредоточены в метрологических институтах.

Однако такое упрощение методики градуировки и поверки не приводит к потере точности только в том случае, если основные спектральные характеристики образцовых и поверяемых пирометров совпадают, либо если градуировка образцовых излучателей выполнена в той же спектральной области и по тем же характеристикам излучения, которые использованы в поверяемых пирометрах. Поэтому возникает необходимость создания образцовых пирометров или образцовых излучателей отдельно для каждого типа технических пирометров массового производства, а иногда и для каждой модификации.

В этом направлении и работают ХВНИИМ, ВНИИМ и другие метрологические организации, осуществляя метрологическое обеспечение оптической пирометрии на всей территории страны.

Поступила в редакцию

11/IV 1969 г.

ЗАДАЧИ МЕТРОЛОГИИ В ОБЛАСТИ ТЕПЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В последние годы быстро расширяется круг тепловых задач, решаемых во многих отраслях науки и техники. Исследование теплового состояния различных систем и их теплофизических свойств, а также законов теплопередачи входит в задачи теплофизики. К теплофизике близко примыкает термохимия — раздел физической химии, в котором изучаются тепловые эффекты химических реакций и процессов. Экспериментальные способы и средства количественных оценок тепловых процессов и свойств в теплофизике и термохимии имеют много общего, что позволяет объединить их в одну область тепловых измерений.

К тепловым сейчас относят измерения, направленные на изучение тепловых, магнитных, электрических, оптических, механических и других свойств в широком температурном диапазоне. Наиболее прочно установилось мнение, что к тепловым следует относить следующие величины: количество теплоты (в частности, выделяющееся при сгорании, растворении, фазовых переходах), тепловую мощность, энтальпию, теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность, коэффициенты черноты излучения, температурные коэффициенты расширения, вязкость и параметры состояния (давление, объем, температура).

Область тепловых измерений и, прежде всего, калориметрия начала свое развитие вместе с термодинамикой. Измерения тепло- и температуропроводности развивались главным образом в связи с потребностями современной техники, энергетики, строительной индустрии, металлургии, а также в связи с развитием физических исследований. Ведущая роль указанных технических и научных направлений сохранялась примерно до 50-х годов. К этому времени советскими и зарубежными теплофизиками и

термохимиками были значительно усовершенствованы стационарные методы измерения теплопроводности, калориметрические методы смешения для измерения энтальпии и средней теплоемкости, методы температурных волн для измерения температуропроводности и предложены новые методы измерения тепловых величин. В частности, появились методы регулярного режима первого, второго и третьего рода; мгновенного источника тепла, неограниченного «эталона»; методы, основанные на измерении теплового потока [1].

В начале 50-х годов, в связи с развитием атомной энергетики и реактивной техники, требования к точности измерений расширились и стали жестче. Необходимо было изучить новые материалы, устойчивые к весьма низким и высоким температурам и обладающие заданными тепловыми свойствами при самых различных температурных, радиационных и других воздействиях. Но не только атомная энергетика и реактивная техника заставили развиваться область тепловых измерений. Современный уровень практически всех отраслей народного хозяйства немалозначимо представить себе без количественных тепловых характеристик свойств объектов. Развитие химической промышленности привело к необходимости значительно расширить объем измерений теплофизических и термодинамических величин для расчета оптимальных параметров технологических процессов и аппаратов. Появление полупроводниковых термоэлектрогенераторов заставляет всесторонне изучать теплопроводность полупроводников — одну из основных характеристик, определяющих эффективность создаваемых устройств. Проблемы космической медицины и биологии стимулируют развитие микрокалориметрии. Для нефтехимии и газовой промышленности требуется знание теплофизических свойств нефтепродуктов и естественных газов. Технические и экономические оценки работы ТЭЦ не могут быть произведены удовлетворительно без калориметров, позволяющих надежно и точно определить теплоту сгорания топлива. В пищевой промышленности необходимо оценивать калорийность всех продуктов.

При таком обилии задач естественно многообразие условий измерения. Объекты исследования могут находиться в различных фазовых состояниях (твердое, жидкое, газообразное, плазма), при различных температурах (от 0 до 3000 К и выше) и давлениях (от глубокого вакуума до многих тысяч атмосфер). Специальными условиями измерений является наличие радиоактивности, электромагнитного поля, необходимость исследовать образцы весьма малых или больших размеров.

Требуемая точность колеблется в зависимости от целей и условий измерения, а также от того, какая величина измеряется. Например, наиболее точные измерения теплоты сгорания при 25°С выполняются с погрешностью 0,02—0,03%, теплопроводности твердых диэлектриков — с погрешностью 3%. При техниче-

ских измерениях соответствующие погрешности достигают значений 0,1 и 15%.

Цели измерений различны. Чаще всего задача сводится к получению конкретных числовых значений измеряемой величины, используемых в дальнейшем для расчетов при проектировании новых технологических процессов или сооружений. Значительный объем измерений связан с физическими и физико-химическими исследованиями (изучение структуры, состава, энергии связи, исследование механизма переноса энергии, корреляция между теплофизическими и иными свойствами и т. п.), результаты которых в итоге также используются при проектировании.

Возникновение перечисленных практических и научных задач, а также новых технических требований способствовало развитию теплофизических исследований во всем мире. Большая часть освоенных к началу 50-х годов методов оказалась или малоприменимой для решения новых задач, или недостаточно разработанной для создания приборов [1]. В связи с этим фронт научно-методических исследований значительно расширился.

В нашем распоряжении нет данных, количественно характеризующих качество информации в области измерения теплофизических свойств. Однако литературные источники позволяют подметить основные черты последней, характерные как для отечественных, так и для зарубежных работ [2].

Наблюдается процесс свертывания информации в ущерб ее качеству. В статьях часто отсутствуют всесторонняя характеристика исследуемого вещества, подробный анализ погрешностей измерений, табличные данные не только о промежуточных измерениях величин при косвенных определениях, но даже об окончательных результатах. Ценность таких исследований для последующих обобщений чрезвычайно мала. Например, анализ методики Егера и Диссельхорста по определению теплопроводности металлов показал, что отсутствие учета температурной зависимости электропроводности приводит к систематической погрешности, достигающей 4% от измеряемой величины. Так как авторы не приводят таблиц промежуточных измерений, то для достижения требуемой точности 2% необходимо повторить практически все выполненные к настоящему времени измерения теплопроводности металлов по этой методике. По-видимому, должны быть повторены работы, посвященные теплопроводности полупрозрачных веществ и, в частности, жидкостей, так как они не содержат данных, позволяющих ввести поправку на перенос энергии излучения при умеренных и высоких температурах [3].

Для данных о теплофизических свойствах веществ характерна несогласованность результатов, полученных авторами на различных приборах. Объясняется это в значительной мере тем, что подавляющее большинство работ выполняется на «кустарно» созданных приборах. Практически нет серийно

выпускаемых стандартных приборов для теплофизических измерений. В результате почти все данные имеют систематические погрешности, значительно превосходящие погрешности, которые гарантирует тот или иной автор [4].

Продолжают оставаться основными «классические» методы измерения теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости веществ: методы стационарного одномерного потока через пластину и трубу с охранными кольцами — для измерения теплопроводности; методы температурных волн в стержне и пластине — для измерения температуропроводности; методы смещения и периодического ввода тепла — для измерения энтальпии и теплоемкости [1]. Несмотря на то, что «классические» методы имеют большую историю, они непрерывно совершенствуются. Глубина проработки особенностей конструирования и применения этих методов позволяет считать, что в настоящее время с их помощью могут быть получены наиболее точные результаты.

Наряду с «классическими» появляется множество новых методов, основывающихся на закономерностях нестационарного теплового режима. За последние 20 лет опубликовано не менее тысячи статей, в которых предлагаются новые методы измерений или конструкции приборов. Объективно такое изобилие в какой-то мере оправдано многообразием задач и невозможностью создания универсальных приборов для теплофизических измерений. Однако необходимо учесть, что любое решение задачи теплопроводности может служить основой для создания нового метода, что таких решений (а следовательно, и методов) может быть бесчисленное множество и что, наконец, далеко не всегда применяются объективные критерии оценки достоинств и недостатков тех или иных методов. К сожалению, многие работы содержат описание новых и оригинальных методов, но не имеющих преимуществ перед существующими.

Наиболее специализированными достоверными являются данные, получаемые в области теплофизических измерений организациями. В СССР — это Институт высоких температур АН СССР (ИВТ), Институт тепло- и массообмена АН БССР (ИТМО), Московский энергетический институт (МЭИ), Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии (ВНИИМ), Всесоюзный научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ), Ленинградский институт точной механики и оптики (ЛИТМО), Московский государственный университет (МГУ), Московский авиационный институт (МАИ), Центральный котлотурбинный институт (ЦКТИ), Всесоюзный теплотехнический институт (ВТИ) и другие. В США такими центрами являются Национальное бюро эталонов, Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства, Департамент горных дел, Центр исследований теплофизи-

ческих свойств, Массачусетский технологический институт, Калифорнийский и Филадельфийский университеты и ряд других организаций. В Англии теплофизические измерения сосредоточены в Национальной физической лаборатории, в ФРГ — в Институте реактивных веществ и в Физико-техническом институте (г. Брауншвейг), в Канаде — в Национальном исследовательском совете, во Франции — в Министерстве просвещения и Комитете по атомной энергии, в Индии — в Национальной физической лаборатории и т. д.

Приведенный выше анализ показывает, что при сложившемся положении традиционный подход к проблеме, при котором каждая новая задача решается путем создания макета прибора и выполнения с его помощью серии измерений (после чего макет разбирают), не позволяет определять теплофизические свойства всех веществ, предлагаемых современной техникой. Кроме того, такой подход при своей экономической нецелесообразности одновременно не позволяет обеспечить требуемую надежность получаемых данных.

Проблема должна решаться комплексно. Во-первых, большие потребности в массовых измерениях теплофизических свойств веществ при ограниченных требованиях к температурному интервалу, к точности измерений и т. п. должны быть обеспечены серийным выпуском приборов нескольких типов. В СССР к настоящему времени созданы такие приборы, как серия калориметров ВНИИМ для определения теплоты сгорания веществ, приборы для теплофизических испытаний материалов ИТМО АН БССР, для комплексного измерения теплофизических веществ ЛИТМО, прибор «Лямбда» для измерения теплопроводности плоских проводников тепла ВНИИМ, тепломеры ОРГГРЭС, тепломеры Института технической теплофизики и т. д.

Во-вторых, должна быть достаточно развита теория, позволяющая рассчитывать свойства веществ по их структуре, концентрации компонентов и другим параметрам. Решение этой задачи позволило бы существенно сократить объем экспериментальных исследований, научно предсказывать теплофизические свойства вновь создаваемых веществ и активно влиять на технологический процесс их производства. В настоящее время расчетным путем можно определить теплофизические свойства весьма ограниченного класса веществ. Основной объем информации, к сожалению, продолжает давать эксперимент.

В-третьих, необходимо точно определять теплофизические свойства чистых веществ — компонентов, из которых состоят исследуемые технические материалы. Это возможно как путем проведения высокоточных измерений, так и путем оценки надежности существующих экспериментальных данных.

Изложенный комплексный подход может быть реализован только при условии существенного подъема уровня метрологии

в данной области измерений, т. е. при условии решения задачи обеспечения единства измерений теплофизических свойств веществ.

В СССР первые метрологические работы в области измерения тепловых величин были выполнены во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ). Эти работы относятся к установлению единства измерений количества теплоты с помощью бензойной кислоты, служащей образцовым веществом для определения теплового эквивалента (теплового значения) калориметрических установок.

В СССР бензойная кислота была принята в качестве образцового вещества в 1926 г. пленумом III Всероссийского тепло-технического съезда [5]. Бензойную кислоту для калориметрических определений выпускал ВНИИМ. Для измерения удельной теплоты сгорания образцовых веществ в период 1933—1936 гг. во ВНИИМ под руководством С. В. Липина был создан прецизионный калориметр [6]. Работы в области единиц измерения тепловых величин завершились во ВНИИМ известным исследованием С. В. Липина о числовом значении механического эквивалента теплоты и соотношении между 15- и 20-градусной калориями [7]. В результате дальнейших работ в этой области в 1958 г. создан образцовый калориметр ВНИИМ для относительных определений теплоты сгорания стандартных образцов бензойной кислоты [8].

В лаборатории тепловых измерений ВНИИМ, созданной в 1958 г. по инициативе Г. М. Кондратьева, а затем в отделе тепловых измерений ВНИИМ, объем исследований в области калориметрии был существенно увеличен. За период 1958—1968 гг. создан первичный эталон единицы количества теплоты — джоуля для обеспечения единства термодимических определений, а также калориметрическая установка 1-го разряда. Разработаны стандартные калориметры для определений теплоты сгорания топлива [9]. Точность измерений на образцовой аппаратуре повышена до 0,01—0,02%, а на рабочей аппаратуре до 0,05—0,1%. Разработаны методы очистки бензойной кислоты для калориметрических целей путем возгонки при небольшом давлении и чистоту оценивают криоскопическим методом [10].

Выполнены теоретические работы в области калориметрии. Рассмотрены новые модели калориметрических систем, учитывающие различие тепловых свойств разных частей сложной системы, выведены уравнения связи температурного поля системы с физическими свойствами и геометрическими особенностями входящих в нее тел. Разработана теория термической инерции калориметрического теплоприемника и выведены уравнения его показаний. На этой основе вводятся поправки к показаниям термометра. Эта работа позволила установить

возможные пределы повышения точности измерений количества теплоты с помощью водяных и массивных калориметров, применяемых при абсолютных измерениях и точных калориметрических определениях [11].

Первые работы по определению теплофизических коэффициентов были выполнены в термометрической лаборатории ВНИИМ под руководством Г. М. Кондратьева. На основе теории регулярного теплового режима Г. М. Кондратьева экспериментально разрабатывались методы определения коэффициентов тепло- и температуропроводности, удельной теплоемкости (методы α -калориметра, двух точек, лямбда-калориметра) [12, 13].

С 1958 г. во ВНИИМ решаются задачи:

воспроизведения единиц теплофизических величин (теплоемкости, тепло- и температуропроводности);

передачи значений единиц от образцовых к рабочим установкам;

изучения теплофизических характеристик отдельных веществ для получения стандартных и справочных данных;

исследования погрешностей существующих методов определения теплофизических характеристик;

проведения государственных испытаний приборов.

Для воспроизведения единиц измерения тепло- и температуропроводности [14—18] создана образцовая и рабочая аппаратура:

установка для воспроизведения значений коэффициента теплопроводности от 0,1 до 1,5 $вт/(м \cdot град)$ в интервале 20—90°С (метод радиального теплового потока), погрешность измерения 3%;

установка для воспроизведения значений коэффициента теплопроводности в интервале 1—100 $вт/(м \cdot град)$ при температурах 20—400°С (метод аксиального теплового потока), погрешность 3%;

установка для определения коэффициента температуропроводности плохих проводников тепла в интервале 20—90°С (метод регулярного теплового режима), погрешность 3%;

рабочие приборы типа А-26, А-29 для определения коэффициента теплопроводности плохих проводников тепла при комнатной температуре с погрешностью 5—8%.

Отдел тепловых измерений аттестует и поставляет стандартные образцы:

бензойной кислоты марок К-1 и К-2 (первичный стандартный образец теплоты сгорания);

полиметилметакрилата (стандартный образец тепло- и температуропроводности плохих проводников тепла для интервала 20—90°С) [16].

В области калориметрии в настоящее время во ВНИИМ ведутся работы по изысканию вторичных образцовых веществ

для анализа соединений, содержащих хлор, фтор и бром, для измерения теплоемкости, тепло- и температуропроводности, разрабатывается образцовая аппаратура для температур до 800°C и широкого интервала значений тепловых коэффициентов.

Одним из развивающихся разделов теплофизики являются дилатометрические измерения. Метрологические работы, связанные с установлением единства измерений в области дилатометрии, включают в себя как разработку методов и средств для определения температурных коэффициентов расширения, так и исследования различных материалов с целью создания стандартных образцов этих коэффициентов.

В метрологических институтах одними из первых в этом направлении были работы, выполненные в Московском государственном институте мер и измерительных приборов под руководством П. Г. Стрелкова [19—22] и завершившиеся созданием дилатометра для относительных измерений. Во ВНИИМ решается проблема разработки абсолютных методов измерений температурных коэффициентов удлинения. К настоящему времени создан абсолютный интерференционный дилатометр для измерений в области $300\text{—}1100\text{ K}$ [23], исследованы различные материалы [24, 25], завершаются работы по созданию абсолютного дилатометра для интервала температур $90\div 300^{\circ}\text{K}$ и ведутся разработки дилатометра для $1100\text{—}1800\text{ K}$ [26].

Большой объем работ в области теплофизики выполняется и в других метрологических институтах.

В 1947 г. в Московском институте под руководством П. Г. Стрелкова были начаты исследования по теплофизическим измерениям. В 1955 г. коллектив сотрудников, занимающихся этими исследованиями, был переведен во Всесоюзный научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ), где к настоящему времени выполнены следующие основные работы:

открыто явление слабого ферромагнетизма карбонатов кобальта и марганца ниже температуры Кюри и магнитоэлектрического эффекта в окиси хрома;

изучено влияние давления на смещение температуры Кюри в парамагнетиках;

изучена теплоемкость, магнитная восприимчивость и температура фазовых превращений в твердом кислороде;

проведены исследования термодинамических свойств твердых тел вблизи критической точки чистых веществ;

измерены коэффициенты линейного расширения веществ с алмазоподобной структурой кварца, корунда, сегнетоэлектриков и флюорита, а также бетонов;

измерена изобарная теплоемкость водорода при давлении до 500 бар при низких температурах.

Важная метрологическая работа по определению удельной теплоемкости бензойной кислоты при низких температурах в интервале 4—410 К была проведена в 1960 г. под руководством П. Г. Стрелкова [27]. Данные по теплоемкости, энтальпии и энтропии, полученные в этой работе, рекомендуются в качестве стандартных, обеспечивающих единство измерений на основе привязки к температурной шкале, принятой в СССР. Во ВНИИФТРИ созданы несколько типов калориметров для прецизионных измерений при низких температурах, совершенствуется техника и методика калориметрических определений, выполняются исследования в области термодинамики жидких и газообразных веществ, ставятся работы и в области высокотемпературных тепловых измерений. С 1965 г. начаты работы по исследованию теплофизических свойств веществ, широко используемых в технике (в первую очередь неона, аргона, криптона и ксенона). ВНИИФТРИ принимает активное участие в осуществлении программы Международного союза чистой и прикладной химии (ИЮПАК) по исследованию изохорной теплоемкости одноатомных газов в широком интервале температур при давлениях до 800 бар; по изучению вязкости неона и криптона от температуры нормального кипения до комнатной при давлениях до 800 бар.

В отделе физики твердого тела филиала ВНИИФТРИ* в г. Новосибирске под руководством членов-корреспондентов Академии наук И. И. Новикова и П. Г. Стрелкова выполнены работы по разработке прецизионных методов и средств для определения теплофизических характеристик и свойств различных веществ при высоких температурах [28]. Разработаны модуляционный метод измерения теплоемкости и метод периодического потока тепла для определения температуропроводности при высоких температурах. Впервые удалось измерить теплоемкость и теплопроводность вольфрама до температуры плавления. Проведены определения тепловых характеристик молибдена, тантала, ниобия и других веществ до точек их плавления. Изучены теплоемкость и вязкость ряда жидких металлов до 2000 К. Измерена скорость звука в парах ртути на линии насыщения и вблизи нее. Рассмотрены вопросы определения теплоемкости в связи с образованием вакансий в кристаллической решетке при высоких температурах.

В Харьковском государственном научно-исследовательском институте метрологии (ХВНИИМ) под руководством В. В. Кандыбы в 1958 г. были начаты исследования в области высокотемпературной калориметрии и излучательных свойств твердых тел при высоких температурах. Существенное значение имеют выполненные в 1962 г. методом смешения работы по измерению

* В настоящее время отдел физики твердого тела переведен в Институт неорганической химии Сибирского отделения Академии наук СССР.

энтальпии и теплоты фазового перехода корунда в интервале температур 1200—2500 К [29] и по измерению энтальпии ряда высокотемпературных веществ, металлов и окислов (в том числе окиси бериллия, карбидов ниобия, циркония и кремния, элементарного кремния, бериллия и молибдена). Измерения энтальпии в ХВНИИМ относятся к наиболее точным высокотемпературным измерениям.

Работы в области высокотемпературной калориметрии с 1955 г. по настоящее время выполняются также и в Свердловском филиале ВНИИМ [30, 31], где энтальпия измерена методом смешения в интервале 400—1700 К, проведены некоторые исследования по анализу погрешностей калориметрических определений [32]. В области до 1200 К определены термодинамические свойства окисей свинца, бериллия, лития, бора, а также хлористого лития, фтористого бериллия и гидрата лития. В настоящее время заканчиваются работы по созданию новой калориметрической установки для измерений энтальпии до 1800 К с более высокой точностью.

Как видно из приведенных материалов, создание метрологических основ в области теплофизики и термохимии следует ускорить в направлении:

разработки эталонов единиц тепловых величин и образцовых средств измерений с целью расширения диапазона значений измеряемых величин и температурных пределов;

выбора, изучения и аттестации образцовых веществ тепловых свойств для температур 90—3000 К;

осуществления государственной службы стандартных и справочных данных о теплофизических свойствах веществ и материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дульнев Г. Н., Олейник Б. Н., Платунов Е. С. Современное состояние и основные задачи теплового приборостроения. «Известия высших учебных заведений. Приборостроение», т. IV, 1961, № 6.

2. Олейник Б. Н., Сергеев О. А., Микина В. Д. Метрологические исследования в термохимии и теплофизике. «Измерительная техника», 1969, № 9.

3. Мень А. А., Сергеев О. А. Лучисто-кондуктивный теплообмен в плоском слое. «Труды метрологических институтов СССР», вып. 111 (171). М.—Л., Издательство стандартов, 1969.

4. Кириченко Ю. А., Олейник Б. Н., Чадович Т. З. Полиметилметакрилат—образцовое вещество для теплофизических испытаний «Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов», вып. 84 (144). М.—Л., Издательство стандартов, 1966.

5. Шукарев А. Н. Испытание теплотворной способности топлива методом сжигания его в сдвоенном кислороде. Л., Научн. хим.-техн. изд., 1928.

6. Липин С. В., Коровалова С. А. Калориметр конструкции ВИС. «Труды ВИС», вып. 10 (26), 1936, стр. 84.

7. Липин С. В. О численном значении механического эквивалента теплоты и о соотношении между 15-градусной и 20-градусной калориями.

Сообщение ВИМС VIII Генеральной конференции мер и весов. «Труды ВИМС», № 130. М.—Л., Стандартгиз, 1933.

8. Усков В. С., Ускова Н. С. Исследование образцовой калориметрической установки для воспроизведения единицы количества теплоты. «Труды ВНИИМ», вып. 34 (94). М.—Л., Стандартгиз, 1958.

9. Микина В. Д., Олейник Б. Н. Калориметры для стандартных определений теплоты сгорания веществ. «Труды метрологических институтов СССР», вып. 111 (171). М.—Л., Издательство стандартов, 1969.

10. Олейник Б. Н., Усков В. С. Бензойная кислота — образцовое вещество для калориметрических определений. «Журнал физической химии», т. XXXVIII, № 9, 1964.

11. Олейник Б. Н. Точная калориметрия. М., Издательство стандартов, 1964.

12. Кондратьев Г. М. Регулярный тепловой режим. М., Гостехиздат, 1954.

13. Кондратьев Г. М. Тепловые измерения. М.—Л., Машгиз, 1957.

14. Кириченко Ю. А. Метод и аппаратура для измерения коэффициента температуропроводности с помощью температурных волн. «Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов», вып. 51 (111). М.—Л., Издательство стандартов, 1961.

15. Олейник Б. Н. Аппаратура для измерения коэффициента теплопроводности плохих проводников тепла. «Новые измерительные приборы и методы их проверки», вып. 10. М., Издательство стандартов, 1962.

16. Кириченко Ю. А., Олейник Б. Н., Чадович Т. З. Теплофизические характеристики полиметакрилата. «Новые научно-исследовательские работы по метрологии», вып. 1. Тепловые измерения. М.—Л., Издательство стандартов, 1964.

17. Кайданова А. В., Олейник Б. Н., Сергеев О. А., Чечельницкий А. Э. III Всесоюзная теплофизическая конференция по свойствам веществ при высоких температурах. Тезисы докладов. Баку, Изд-во АН АзССР, 1968.

18. Ипатов Ю. С., Лейкум В. И., Олейник Б. Н., Патовская З. К. Приборы для измерения теплопроводности. «Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов», вып. 63 (123). М.—Л., Издательство стандартов, 1962.

19. Стрелков П. Г. Термостат Уральского физико-технического института. ЖТФ, 1935, т. 5, № 8, стр. 1502.

20. Стрелков П. Г. О дилатометрии твердого тела и некоторых ее применениях. ЖНФ, 1956, т. 1, вып. 6, стр. 1350.

21. Стрелков П. Г., Косоуров Г. И., Самойлов Б. И. Дилатометр для образцов малых размеров. «Известия АН СССР», серия физ., 1953, т. XVII, № 3.

22. Стрелков П. Г., Новикова С. И. Кварцевый дилатометр для низких температур. I. Тепловое расширение меди и алюминия. ПТЭ, 1957, № 5, стр. 105.

23. Аматауни А. Н. Интерференционный дилатометр ДИ-2. «Труды институтов Комитета», вып. 87 (147). М., Издательство стандартов, 1966.

24. Королева А. Н., Шевченко Е. Б. Результаты исследования температурного коэффициента удлинения плавленого кварца и стекла сорта 23. «Труды институтов Комитета», вып. 78 (138). М.—Л., Издательство стандартов, 1965.

25. Аматауни А. Н., Шевченко Е. Б. Линейное термическое расширение монокристаллического кварца и окиси алюминия. «Измерительная техника», 1966, № 10.

26. Аматауни А. Н., Шевченко Е. Б. Установка для исследования теплового расширения твердых тел при низких температурах. «Труды метрологических институтов СССР», вып. 101 (151). М.—Л., Издательство стандартов, 1968.

27. Склякин А. А., Стрелков П. Г. О сходимости экспериментальных значений теплоемкости бензойной кислоты между 14 и 90° К в слу-

час применения различных температурных шкал. «Труды метрологических институтов СССР», вып. 101 (151), М.—Л., Издательство стандартов, 1968.

28. Исследования при высоких температурах. Под ред. членов-корр. АН СССР И. И. Новикова, П. Г. Стрелкова. Новосибирск, изд-во «Наука», 1966.

29. Кантор П. Б., Лазирева Л. С., Кандыба В. В., Фомичев Е. Н. Экспериментальные значения энтальпии, температуры и теплоты фазового перехода α -модификации окиси алюминия Al_2O_3 при температурах 1200–2500° К. «Украинский физический журнал», т. 7, № 2, 1962.

30. Родигина Э. Н., Гомельский К. З. Теплосодержание окислов бериллия и лития при высоких температурах. «Журнал физической химии», т. 35, вып. 8, 1961.

31. Гомельский К. З., Ишутнинова Н. Н., Лугинина В. Ф. Исследования образцовых веществ для высокотемпературной калориметрии. «Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов», вып. 71 (131), М.—Л., Издательство стандартов, 1963.

32. Гомельский К. З. О точности измерений энтальпии и теплоемкости твердых тел при высоких температурах. «Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов», вып. 84 (144). Издательство стандартов, М.—Л., 1966.

Поступила в редакцию

11/III 1969 г.

ЗАДАЧИ И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ ИНСТИТУТА МЕТРОЛОГИИ СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЙ РЕСПУБЛИКИ РУМЫНИИ

В Социалистической Республике Румынии единство и точность измерений обеспечивает Генеральное управление по стандартизации и изобретениям через Государственное отделение по метрологии и институт метрологии. Институт метрологии основан в 1951 г. на базе Первого румынского отделения мер и весов, существовавшего с 1883 г.

Некоторые направления работы института характеризуются следующим. Институт метрологии воспроизводит, хранит и передает значения национальных единиц измерения, создает методы эталонирования и поверки, разрабатывает инструкции по поверке приборов, нормы и стандарты метрологического характера, осуществляет государственные поверки образцовых средств измерений, построенных в Социалистической Республике Румынии, а также метрологические экспертизы и измерения высокой точности.

Институт выполняет научные работы в области метрологии, разрабатывает научные основы единства и повышения точности измерений в нашей стране до требуемого уровня социалистического производства. Роль института в развитии румынской метрологии все увеличивается. Постоянно проводятся работы в области передачи единиц измерений, воспроизводятся и передаются новые единицы и разрабатываются точно аттестованные поверочные средства.

Разнообразная программа развития нашей страны ставит перед институтом все больше и больше задач. О некоторых результатах, полученных нами за последние годы по линии увеличения точности в передаче единиц измерений, коротко можно сказать следующее. Например, единица массы передается с погрешностью 10^{-9} .

Секунда передается с погрешностью 10^{-9} с помощью установки, связанной с эталоном времени и частоты, посредством которой постоянно сличают сигналы генераторов частоты. Эта установка состоит из сравнивающего устройства и из приборов, которые постоянно регистрируют результаты сравнения, что дает возможность легко определить правильность частот двух генераторов, а также позволяет определить в любой момент разность частот двух эталонов. Единица частоты воспроизводится с помощью установки, которая сравнивает сигналы нашего эталона с сигналами эталонов частоты, передаваемыми по радио другими национальными лабораториями времени в виде колебаний, управляемых атомными эталонами частоты. Результаты сравнения постоянно регистрируются в виде кривой изменения во времени разности фаз между принимаемыми сигналами и сигналами генераторов. Единица времени и точное время определяются также установкой, построенной в нашей лаборатории, с помощью которой сопоставляются сигналы времени от национального эталона с сигналами времени, принимаемыми с помощью специального приемника.

В области измерений силы в установке непосредственного нагружения обеспечиваются интервалы измерения 10^{-6} н с погрешностью передачи единицы от 0,025 до 0,2%. Шкалы твердости по Роквеллу, Виккерсу и Бринеллю воспроизводятся с помощью некоторых оригинальных установок непосредственного нагружения с гидростатическим управлением и их действия полностью программированы и автоматизированы. При этом погрешность измерений лежит в пределах 1—0,5% в диапазоне 200—400 единиц и 0,5% — больше 400 единиц по Виккерсу. Такая точность находится на уровне результатов, полученных в других национальных лабораториях, занимающихся научной работой в этой области. В связи с необходимостью повышения точности воспроизведения измерений твердости наши сотрудники предполагают исследовать и такие факторы, как скорость и время действия нагрузки, а также фактические характеристики измерительного микроскопа.

В последние годы разработаны методы измерения большей точности основных электрических величин на переменном токе низкой частоты и с этой целью были построены приборы оригинальной конструкции.

Погрешность компараторов тока и дифференциальных трансформаторов тока, созданных с целью повышения точности сравнения переменных токов от 1 ма до 2000 а, лежит в пределах 10^{-6} — 10^{-5} . Эти приборы могут быть использованы для эталонирования трансформаторов тока, для сравнения полных сопротивлений, измерений очень малых мощностей и т. д. В области измерений параметров электрических цепей на переменном токе были разработаны методы сравнения сопротивлений, а также построен мост с дифференциальным трансформа-

тором для сравнения эталонных конденсаторов с погрешностью 10^{-6} и порогом чувствительности 10^{-5} мкф. Разработаны также методы калибровки двух- и трехзамещенных конденсаторов с фиксированными или переменными емкостями. В области магнитных величин создана аппаратура для воспроизведения и передачи единицы магнитного потока и магнитного момента.

За последние годы исследования в области температур дали возможность разработать установки для определения тройной точки воды с метрологическими характеристиками, эквивалентными достигнутым в других лабораториях. Возможность увеличения точности измерения физических величин в специфических условиях новых технологических процессов поставила перед институтом метрологии новые проблемы, связанные с поиском исследований как для методов сравнения, так и для разработки новых эталонных средств измерения.

Большое внимание уделяется исследованию в области автоматизации процессов эталонирования, поверки средств измерения и разработки методов для динамической поверки мостов и электронных регистрирующих компенсаторов, а также для динамической поверки преобразователей в электронной унифицированной системе нашей страны.

Кроме исследования методов передачи единиц измерения, наш институт разрабатывает методы определения физических констант, а также методы анализа результатов измерения.

Специальное внимание будет уделяться разработке национальных эталонов для воспроизведения единиц измерения в международной системе в связи с необходимостью повышения точности его и передачи этих единиц.

Необходимо подчеркнуть одну особенность работ в области международной метрологии. Общность понятий в области единиц измерения и необходимость единства измерений в мире приводят непосредственно к дружественной обстановке и взаимопомощи метрологических институтов разных стран. По этому поводу я хочу отметить, что опыт и результаты работ ВНИИМ для нас показательны и они являются основой для принятия оптимальных решений. Ко всему этому надо добавить, что мы считаем очень важным обмен мнениями между нашими специалистами и специалистами ВНИИМ.

Взаимное сотрудничество метрологических институтов различных стран приведет к подъему уровня развития мировой метрологии и тем самым осуществится мечта метрологов всего мира об использовании одинаковых единиц измерения.

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА СТАНДАРТНЫХ И СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ

Созданию Государственной службы стандартных и справочных данных предшествовало постановление Совета Министров СССР № 16 от 11 января 1965 г., согласно которому Комитету стандартов Совета Министров СССР была поручена организация этой новой информационной службы, в обязанности которой входит разработка достоверных значений физических констант и характеристик веществ и материалов и обеспечение ими народного хозяйства. Этим же постановлением метрологические институты страны определены как головные по этой службе.

Приказом Комитета стандартов № 102 от 14 апреля 1966 г. был создан Всесоюзный научно-исследовательский центр стандартных и справочных данных (ВНИЦ ССД) для разработки системы сбора информации, формирования фондов стандартных и справочных данных поисковой системы ГСССД.

Создание новой информационной системы диктовал в первую очередь резко возросший за послевоенные годы объем научной информации. В настоящее время ежегодно публикуется 200—250 тысяч научных работ, содержащих не менее 2 млн. новых данных о физических и химических свойствах веществ и материалов. Это количество увеличивается в год на 10%. Кроме того, в литературе за предыдущие годы накопились сведения приблизительно о 30 млн. пар вещество—свойство, а издание справочников опаздывает на 8—10 лет по сравнению со временем публикации данных в периодической печати.

Особенностью новой службы является не только сбор опубликованных данных, но и оценка их достоверности, ибо для одной и той же пары вещество—свойство нередко фигурируют неточные и противоречивые данные.

Экономическая эффективность ГСССД определяется:

- а) устранением ненужных затрат на поиск и оценку данных;

б) сведением до минимума неправильных решений конструкций и разработок из-за неполного знания физических и химических свойств веществ и материалов; в) минимализацией коэффициентов запаса при выполнении различных расчетов и формулировании технических заданий; г) уменьшением затрат на дублирование ранее выполненных экспериментальных работ; д) более точной оценкой потребностей в распределении фондов и т. д.

Большинство развитых стран создало к настоящему времени соответствующие службы. В США в 1963 г. 14 информационных центров объединены в единую Национальную службу стандартных и справочных данных (НСССД), которые собирают и обрабатывают данные о свойствах веществ по семи научным направлениям. Академия наук США имеет два комитета, контролирующая деятельность НСССД. За прошедшие 6 лет число информационных центров, вовлеченных в НСССД, увеличилось до 36, число отдельных научных программ — приблизительно с 20 до 80, а число подпрограмм — до 120, хотя научных направлений по-прежнему осталось семь.

Аналогичные службы созданы в ФРГ, Англии и Японии, создаются во Франции, ГДР и других странах.

Первоочередной задачей ГСССД является создание фонда ССД по теплофизическим, ядерно-физическим, механическим свойствам, а также по физическим и химическим свойствам твердых тел. Данные по этим группам свойств должны накапливаться в новых компиляционных центрах в системе Комитета стандартов, а также в существующих центрах, подчиненных различным министерствам и ведомствам. Необходимо шире привлекать к работе ГСССД Академии наук СССР и союзных республик, а также ВИНТИ, создать межведомственный совет при КНТ СМ СССР для определения научной политики ГСССД, разработать единую систему по подготовке и изданию справочников по физическим и химическим свойствам веществ и материалов.

Следует начать обслуживание справочными данными промышленных предприятий и научных учреждений, для чего в первую очередь использовать фонд стандартов и технических условий Комитета стандартов; для поиска и выдачи информации — применять современную автоматику. Необходимо наладить действенные связи с соответствующими международными и национальными организациями, в частности, с СЭВ.

Программа по созданию фондов развивается по этапам в следующей последовательности: а) составление обзора данной отрасли науки, в котором дается классификация и основные определения, указываются основные источники информации, составляется список базовых организаций и т. д.; б) сбор библиографий; в) размножение и размещение по разделам документов в зависимости от принятой классификации, выборка из них справочных данных; г) поступление справочных данных вместе

с соответствующими источниками информации в базовые организации для оценки достоверности их и выбора наилучшего значения; д) расчет свойства, причем здесь могут быть использованы как строгие теории, так и полуэмпирические закономерности, отмеченные в результате анализа всех известных экспериментальных значений. Это позволит прогнозировать свойства и определять группу веществ с необходимыми свойствами.

Фонды ГСССД, содержащие достоверные данные, предполагается в будущем сосредоточить для использования заинтересованными учреждениями и отдельными исследователями в центре и в базовых организациях, связанных между собой каналами связи, способными передавать по назначению многоаспектную информацию.

Поступила в редакцию

13/III 1969 г.

ЗНАЧЕНИЕ МЕТРОЛОГИИ ДЛЯ НАУЧНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Установление связи между понятиями, явлениями, фактами предполагает присвоение определенного содержания каждому из них, взятому в отдельности, или — в худшем случае — хотя бы наличие общей договоренности, что именно надлежит понимать под каждым из них. С этой весьма общей и обычной точки зрения требуется прежде всего установить содержание двух понятий: во-первых, метрологии и, во-вторых, научного приборостроения.

Такая постановка вопроса отнюдь не является надуманной или схоластической. Ее закономерность вытекает из множественности используемых ныне определений понятия метрологии и эволюции этих определений, особенно интенсивной за последние годы, а также из отсутствия сколько-нибудь общепризнанного определения понятия научного приборостроения.

Попытаемся разобраться в современной трактовке этих двух понятий с тем, чтобы затем наметить некоторые основные черты их взаимосвязи и взаимовлияния.

Начнем с определения первого понятия, т. е. метрологии. Содержание, вкладываемое в понятие метрологии, претерпело на протяжении длительного времени глубокую эволюцию. В первом русском трактате «Общей метрологии» Ф. И. Петрушевского, вышедшем в свет 120 лет тому назад (в 1849 г.) и удостоенном тогда Российской Академией наук Демидовской премии, сказано: «Метрология есть описание всякого рода мер по их наименованиям, подразделениям и взаимному отношению».

В классическом труде «Основы метрологии» выдающегося советского метролога М. Ф. Маликова, вышедшем в свет в 1949 г., т. е. ровно через столетие после появления трактата Ф. И. Петрушевского, приведены два равноправных, по мнению

их автора, и не противоречащих друг другу определения: «метрология есть учение об единицах и эталонах» и «метрология есть учение об измерениях, приводимых к эталонам».

Не останавливаясь на иных многочисленных весьма различных определениях понятия метрологии, предложенных как советскими, так и зарубежными авторами, рассмотрим определения, которые в самое ближайшее время имеют все основания стать официальными.

Речь идет о находящемся в стадии утверждения проекте * «Словаря основных терминов законодательной метрологии», разработанного в рамках и по поручению Международной организации законодательной терминологии (МОЗМ) как международная рекомендация Международного комитета, возглавляемого до самого последнего времени ныне покойным профессором Яном Обальским (Варшава).

Определение понятия метрологии, содержащееся в этом документе, само по себе весьма близко к определению, данному в проекте также находящегося в стадии утверждения государственного стандарта СССР «Метрология. Общие термины», разработанного ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. Однако примечания, которыми снабжены эти определения, показывают существенное различие содержания, вкладываемого авторами этих двух документов в слова «наука об измерениях».

В проекте советского стандарта сказано: «Метрология — наука об измерениях». Определение снабжено примечанием: «... в метрологии рассматриваются вопросы, относящиеся к обеспечению единства измерений».

Далее в проекте советского стандарта дается классификация основных разделов метрологии: теоретической, прикладной и законодательной.

В проекте «Словаря» МОЗМ говорится:

«Метрология — область знаний, относящихся к измерениям», т. е. практически то же, что и в проекте советского стандарта. Это определение снабжено следующими примечаниями:

«1. Предметами основных областей метрологии являются: единицы измерений и их эталоны (их установление, воспроизведение, хранение и передача), измерения (методы, осуществление, оценка их точности и т. д.),

средства измерения (их свойства, рассматриваемые с точки зрения их назначения),

наблюдатели (их качества, относящиеся к выполнению ими измерений, например, способность отсчета показаний измерительного прибора).

2. Метрология охватывает все проблемы как теоретические, так и практические, относящиеся к измерениям вне зависимости

* Проект без существенных изменений утвержден в 1969 г.

от точности последних. (Это примечание очень важно: оно говорит, что к метрологии относятся все, а не только прецизионные измерения, как это предусматривает проект советского стандарта).

3. В зависимости от рода измеряемой величины метрология подразделяется на метрологию длин, метрологию времени и т. д., и, в зависимости от области применения, на метрологию промышленную, техническую, астрономическую, медицинскую и т. д.

4. Метрология охватывает также определения физических констант и свойств материалов и веществ».

Проект «Словаря» МОЗМ, аналогично проекту государственного стандарта, также выделяет как самостоятельные некоторые разделы метрологии, но в большем количестве, а именно: общую, прикладную, теоретическую, законодательную метрологию и, что особенно существенно, измерительную технику. Как особый подвид «прикладной» проект выделяет еще «техническую метрологию».

Как следует из сказанного, содержание понятия «метрология», несмотря на практически полное совпадение формулировок самих определений, расшифровывается примечаниями двух названных документов весьма различно. «Словарь» МОЗМ трактует его гораздо шире, включая в понятие метрологии измерительную технику в целом и тем самым, в известной мере, и приборостроение в широком смысле этого слова.

Говоря в дальнейшем о значении метрологии для научного приборостроения, мы будем иметь в виду метрологию именно в таком расширенном толковании.

Перейдем к установлению содержания второго интересующего нас понятия: научного приборостроения. Чем оно отличается от других отраслей приборостроения, где его границы и в чем его отличительные особенности? К сожалению, приходится признать, что однозначного ответа на эти вопросы нет.

Эта точка зрения выявилась в процессе дискуссии, состоявшейся еще в 1940 г. в Вашингтоне на заседании одного из отделов созданного в то время (по распоряжению президента США Рузвельта) Национального научно-исследовательского оборонного комитета. Этот отдел возглавлял председатель Американской ассоциации по развитию наук, один из известных американских физиков Карл Комптон. В состав отдела входил ряд секций, в том числе секция «Приборы». Она была укомплектована крупными инженерами и учеными с большим опытом в области средств и методов эксперимента в самых различных отраслях науки и техники.

По мнению Клопстига, впоследствии ставшего, как и Комптон, председателем Американской ассоциации по развитию наук, приборы — это физические средства наблюдения и экспе-

риментирования, имеющие своей целью получение и переработку информации. В частности же прибор может быть:

1) устройством, в котором одни известные физические явления используются для обеспечения (или для увеличения) возможности восприятия других явлений или фактов. Это — усилитель чувственного восприятия;

2) средством измерения, т. е. количественной оценки, подающейся восприятию физической величины;

3) устройством, позволяющим фиксировать или реакцию некоторой величины, либо системы, на определенные влияющие факторы или же обратное воздействие этой реакции на обусловившие ее факторы. Иначе говоря, приборы данной категории обеспечивают возможность автоматического управления реакцией или вызывающими ее факторами. Примером приборов данной категории являются сервомеханизмы;

4) средством для обработки накопленной информации и представления ее в форме, обеспечивающей самую возможность использования информации.

Трудность или, точнее говоря, невозможность строгого определения понятий «научные приборы» и «научное приборостроение» обусловлена рядом причин: во-первых, отмеченной только что их многоликостью, многообразием выполняемых ими функций, во-вторых, бесконечным разнообразием используемых в них принципов действия и конструктивных форм, в-третьих, чрезвычайным различием их метрологических показателей, наконец, в-четвертых, тем, что объектами измерений различных научных приборов являются любые величины из числа уже известных сегодня и тех, что станут известны только завтра. Практическая невозможность какого-либо «абсолютного» определения этих понятий обусловлена еще и подвижностью во времени границ, отделяющих научные приборы от промышленных.

Сейчас стало уже обыденным фактом, что методы исследования и приборы, только вчера возникшие в лаборатории ученого, сегодня уже проникают в промышленность. Успехи различных отраслей науки, достигнутые за последние годы, сделали доступными для практического использования множество физических и физико-химических явлений и зависимостей, еще недавно представлявших, как казалось, только отвлеченный интерес для немногих ученых специалистов или вообще неизвестных науке.

Техническое овладение этими, вередко очень тонкими, явлениями и зависимостями позволило предложить, испытать и освоить многие из них для построения не только научных, но и полуавтоматических или автоматических промышленных приборов. Достаточно назвать для примера электронный и ядерный магнитный и квадрупольный резонансы, явление индуцированного излучения, эффект резонансного поглощения и рассеяния гамма-квантов (эффект Мёссбауэра), явления, интерпретируе-

мые современной физикой твердого тела и тонких пленок, и т. д.

Поэтому нам представляется целесообразным относить к категории научных такие измерительные приборы, которые по своему устройству и эксплуатационно-метрологическим показателям предназначаются для получения информации, необходимой исключительно или, по меньшей мере, преимущественно для опытно-исследовательских работ, но не для контроля производства, выдающего товарную продукцию. Мы полагаем, что целевое назначение информации, получаемой с помощью приборов, является единственно правильным критерием, позволяющим однозначно в каждый данный исторический момент времени и в данных условиях отделить научные приборы от приборов промышленных, технических.

Несмотря на лабильность этого критерия, в последние годы все более настойчиво утверждается точка зрения на научное приборостроение как на самостоятельную научно-техническую дисциплину, т. е. как на область знания, имеющую свой предмет и свой метод. Научное приборостроение не является ни просто наукой, ни только техникой. Один из пионеров оптического научного приборостроения конца прошлого и начала текущего столетия Чапский еще в 1905 г. назвал научное приборостроение «техникой, базирующейся на науке», имея в виду органическое слияние того и другого в научных приборах.

Предметом научно-технической дисциплины «научное приборостроение» является техника и методика научных измерений («научных» — в понимании сформулированного выше критерия целевого назначения измерительной информации).

Метод научно-технической дисциплины «научное приборостроение» сводится не просто к техническому (конструктивному) использованию какого-либо явления в целях получения интересующей измерительной информации, а к творческой переработке некоторой суммы знаний, подчас относящихся к различным областям, в целях создания принципиально нового научного прибора. В итоге этой переработки не только возникает некоторый новый научный прибор, но обогащается и теоретическое познание используемых явлений, повышается уровень нашего понимания природы вещей. Убедительной иллюстрацией этого является вся лазерная техника.

Таким образом, возникает общезвестная обратная связь между научным приборостроением и наукой: научное приборостроение активно участвует в развитии науки. Такого рода активная функция, выполняемая научным приборостроением, является характерным его признаком и одним из условий его существования и развития.

Тесно связан с этим другой признак, другая особенность научного приборостроения. Эта особенность заключается в опережающем характере развития научного приборостроения по

сравнению с научной теорией во многих особенно интенсивно развивающихся областях знания. Научные приборы образуют как бы некоторый задел, позволяющий на экспериментально получаемом материале проверять и уточнять существующие теоретические концепции и создавать новые.

В этом смысле научные приборы являются активным связующим звеном между наукой и техникой. Создание и применение научных средств познания — приборов имеет такое же фундаментальное значение, как и само научное исследование, для осуществления которого они служат. Без передовых совершенных средств исследования многие научно-исследовательские работы были бы затруднены или вообще невозможны. Так, например, успех астрофизических исследований прямо зависит от достижений в области создания больших оптических приборов, в деле совершенствования электронно-оптических преобразователей и прогресса по минимизации отношения шум/сигнал микроволновых приемников. Другой пример: изучение атомного ядра не может успешно продвигаться вперед без непрерывной углубленной теоретической расчетной и экспериментальной работы в области всестороннего усовершенствования ускорителей частиц высоких энергий, их рационального конструирования, сооружения и эксплуатации. Число этих примеров можно продлить сколь угодно.

При разработке и изучении технических средств научного приборостроения оказывается необходимым рассматривать такие (относящиеся к предмету дисциплины «научное приборостроение») проблемы, как принципиальные границы возможности измерения, методические погрешности измерений, влияние на инструментальные погрешности технологических допусков при создании приборов и многое другое.

Из всего предыдущего вытекает, что содержание дисциплины «научное приборостроение» сливается, во всяком случае в очень многом, с содержанием дисциплины «метрология», сформулированным нами ранее. Круг как бы замыкается.

Не случайно такой выдающийся метролог, как Дмитрий Иванович Менделеев, был не менее замечательным приборостроителем. Не случайно 90-е годы прошлого века и 900-е нынешнего, характеризовавшиеся быстрым развитием точной индустрии, в том числе развитием научного приборостроения, ознаменовались созданием в наиболее крупных и развитых странах национальных центральных научных метрологических учреждений: в 1887 г. в Германии, в 1893 г. в России, в 1900 г. в Англии, в 1901 г. в США.

При столь близком совпадении содержания дисциплин «метрология» и «научное приборостроение» правомерно ли вообще говорить о значении метрологии для научного приборостроения? Ответ на этот вопрос должен быть положительным по следующим причинам: всякую дисциплину, помимо ее содержания и

метода, можно характеризовать еще ее непосредственной целью. А эти цели у «метрологии» и у «научного приборостроения», несмотря на все совпадения, разные. Энгельс говорит: «...всякое познание есть чувственное измерение». Так вот, метрология направлена на отыскание и анализ путей правильного познания (т. е. чувственного измерения) и на оценку его достоверности, научное же приборостроение преследует цель создания и оптимального использования средств чувственного измерения (т. е. средств восприятия и установления значения измеряемой величины).

Поэтому представляется целесообразным поставить вопрос так: в чем заключаются первоочередные измерительные, или, иначе, метрологические, задачи научного приборостроения и каковы их особенности? Нет надобности говорить о частных задачах, касающихся научных приборов для измерения отдельных определенных величин (температуры, давления и т. д.). Соответствующие вопросы рассматриваются в ряде специальных докладов на настоящем симпозиуме. В заключение перечислим только наиболее общие, характерные для всех групп современных научных приборов и измерений актуальные метрологические задачи:

1. Всмерное повышение точности, вплоть до предельно достижимой на данном этапе развития науки и техники, так называемой метрологической точности. О значении ее достижения писали многие великие ученые и их высказывания остаются в силе.

Д. И. Менделеев в связи с проблемой точных взвешиваний писал в своих «Трудах по метрологии»: «Способы точных взвешиваний не только служат своим специальным целям, но и дают общий немаловажный вклад в естественную философию»; Майкельсон: «... мы должны искать будущие открытия в шестом десятичном знаке...»; Максвелл: «... работа по точным измерениям вознаграждалась открытием новых областей исследования и развитием новых научных идей...» и т. д.

2. Сказанное в п. 1 о повышении точности в полной мере относится к разрешающей способности всех видов спектральных приборов, поскольку надлежащее значение их разрешающей способности является обязательной предпосылкой возможности полноценного использования их точности.

3. Повышение чувствительности при необходимости измерения малых изменений значений измеряемой величины и снижение абсолютного значения порога чувствительности при необходимости измерения малых абсолютных значений измеряемой величины.

В связи с этим известный советский физик Д. С. Данин говорит в своей книге «Неизбежность странного мира» об эквивалентности массы и энергии: «... даже огромному приросту энергии тела соответствует очень малый прирост массы — такой

малый, что на обычных весах его не измерить. Если это действительно так, то многовековая слепота физиков прощительна — то была слепота их несовершенных инструментов».

4. Выделение малых сигналов измеряемой величины на фоне помех, соизмеримых по значению с полезным сигналом.

5. Высокая воспроизводимость результатов измерений, возможно большая их достоверность и однозначность.

Французский физико-химик Анри Ле-Шателье, создавший платинорадий — платиновую термопару, носящую его имя, писал: «... достаточно одного ложного измерения для того, чтобы помешать открытию закона или, что еще хуже, привести к установлению несуществующего закона».

6. Минимальное воздействие измерительного устройства, особенно его чувствительного элемента, на измеряемую величину.

Эта сторона вопроса важна не только при измерениях на элементарных микрообъектах, измерениях, предельные возможности которых определяются принципом неопределенности, но и при измерениях параметров полей макрообъектов, так как при вторжении в поля даже самых деликатных чувствительных элементов измерительных устройств значения параметров полей неизбежно меняются.

7. Выбор и использование по возможности только системных и когерентных единиц измерения.

Особенно неблагоприятно обстоит дело в области научных измерений и приборов. Принадлежащий к числу наиболее выдающихся физиков-теоретиков современности американский ученый Ричард Фейнман в одной из своих лекций, прочитанных на Мессенджеровских чтениях в Корнельском университете (США) под общим названием «Характер физических законов» и переизданных в 1968 г. в СССР, пишет: «Физикам должно быть стыдно, что для измерения энергии они пользуются такой уймой способов и названий. Разве не бессмыслица, что энергию измеряют в калориях, в эргах, в электронвольтах, в килограммометрах, в британских тепловых единицах, в джоулях, в киловатт-часах — столько мер для одной и той же величины!.. Вы можете подумать, что по крайней мере современные первоклассные-то физики-теоретики приняли общую единицу, но загляните в их статьи: тут энергию меряют и в градусах Кельвина, и в мегагерцах, а теперь еще и в обратных ферми — последняя новинка». Фейнман заканчивает абзац словами: «Если кому-нибудь нужны доказательства, что физики не лишены человеческих слабостей, то вот вам одно из них — идиотическое изобилие единиц для измерения энергии».

Не лучше обстоит дело и с другими единицами в научном приборостроении и научной метрологии. Большая путаница царит также в наименованиях метрологических характеристик научных приборов, в частности, постоянно смешивают чувстви-

тельность и порог чувствительности. Чувствительностью теченска-телей именуется величину, размерность которой обратна размерности чувствительности и т. д.

8. Получение измерительной информации в форме, требующей минимальной переработки перед ее использованием или пригодной для ввода в вычислительные машины.

Поступила в редакцию

22/1 1969 г.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АНАЛИТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Физико-химические измерения стали предметом работ Палаты мер и весов фактически с момента ее основания. Начало этим работам положил Дмитрий Иванович Менделеев.

Само наименование «физико-химические измерения» неточно определяет их существо. Но если обратиться к истории развития этих работ во ВНИИМ, то можно сказать, что это название оправдано.

В период образования Главной палаты мер и весов физическая химия как наука еще только формировалась. Потребность науки и практики в точных сведениях о взаимосвязях свойств веществ явилась основой, на которой в Главной палате мер и весов развивалось первое направление в области физико-химических измерений — исследование свойств веществ.

В этот период Менделеевым были решены две фундаментальные задачи, которые стали вехами в истории развития науки: был сформулирован в окончательном виде закон газового состояния, получивший впоследствии наименование закона Менделеева — Клапейрона, и разработана теория растворов как ассоциаций.

Менделеев говорил, что всего четыре предмета составляют его имя: периодический закон, исследование газового состояния, создание теории растворов и «Основы химии».

Исследования в области физико-химических измерений в первом направлении (исследование свойств веществ) продолжались в Главной палате, а потом в институте довольно долго. Однако исключительно важное значение и весьма большое разнообразие проблем привели к тому, что они начали сосредотачиваться в различных специальных научных учреждениях Академии наук и отраслевых институтах промышленности.

В 20-х годах в институте формируется новое направление, связанное с разработкой практических вопросов точности лабораторных анализов материалов.

Однако несмотря на то, что с того времени прошло уже более 40 лет и проблемы аналитической химии стали предметом исследований крупнейших специализированных научных учреждений страны, до сих пор подобные исследования проводятся во ВНИИМ по запросам промышленности.

В 30-х годах в институте формируется третье направление, связанное с возникновением и развитием идей обеспечения точности спектральных анализов металлов путем применения стандартных образцов состава. Впервые в стране такие образцы были изготовлены в нашем институте под руководством академика Байкова.

Впоследствии на этой основе выросло целое научное учреждение — Всесоюзный научно-исследовательский институт стандартных образцов (ВНИИСО). Работы по созданию стандартных образцов продолжают во ВНИИМ и по настоящее время.

С 1960 г. появилось еще одно направление в области физико-химических измерений.

В последние годы в аналитической технике ясно обозначились две тенденции. Одна из них связана с постановкой методических работ по выяснению точности аналитических определений при помощи смесей известного состава, которые приготовлены из чистых веществ. Такие смеси используют и для научных исследований, например, для выяснения точности некоторых теоретических формул применительно к реальным системам.

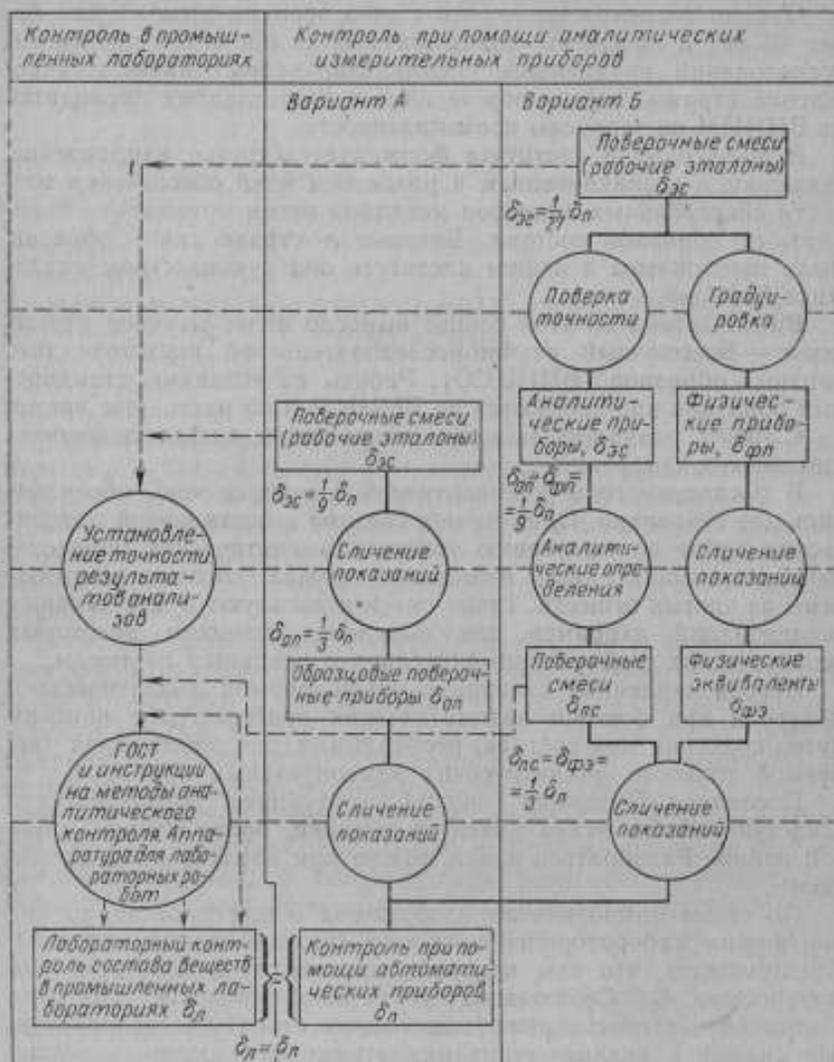
Вторая тенденция связана с новой формой аналитического контроля при помощи автоматических приборов и с поиском путей создания мер состава, необходимых для обеспечения требуемой точности аналитических измерительных приборов.

Последняя тенденция связана с ситуацией, возникшей как следствие нового этапа развития техники, после Второй мировой войны. Разобраться в ней можно при помощи приведенной схемы.

На схеме символически изображена существующая до сих пор форма лабораторного контроля (нижний левый квадрат). Предположим, что сам контроль производят с некоторой погрешностью δ_1 . Соблюдение допустимой точности контроля в этом случае обеспечивают: введенные стандарты на проведение анализов, квалификация аналитика, организация и оборудование лабораторий и т. п. Ответственным за правильность анализа при этом оказывается аналитик, поскольку анализы являются результатом его труда. Наконец, сам аналитик всегда имеет возможность проконтролировать себя двумя или тремя параллельными анализами.

Вопрос о точности аналитического контроля δ_1 30 лет назад вращался бы вокруг обстоятельств, заключенных в скрытом

виде в разделах схемы, касающихся лабораторного контроля состава веществ в промышленных лабораториях, государственных стандартов и инструкций на методы аналитического конт-



Общая схема обеспечения точности аналитического контроля больших концентраций веществ

роля, а также аппаратуры для лабораторных работ (см. на схеме левый нижний квадрат и кружок над ним).

После Второй мировой войны в связи с автоматизацией производства возникла новая форма контроля при помощи автома-

тических аналитических приборов (см. на схеме квадрат внизу справа). Эта новая форма контроля была призвана, заменить старую в условиях новых требований автоматизации контроля производства и создания систем регулирования. Естественно, что для полноценной замены старой формы контроля необходимо соблюсти по крайней мере равенство погрешностей лабораторных анализов $\delta_{\text{л}}$ и измерений автоматическими измерительными аналитическими приборами $\delta_{\text{п}}$. Здесь сразу же возникают два принципиальных вопроса: каким образом можно обеспечить это условие и кто является ответственным за соблюдение точности определений в случае новой формы контроля.

Выше отмечено, что при лабораторном контроле за результаты проведенного анализа устанавливается персональная ответственность аналитика. Точность анализа обеспечивается анализом параллельных проб, принятой методикой, использованным оборудованием, квалификацией аналитика и т. п. При контроле автоматическими приборами все эти обстоятельства исчезают. Кроме того, всякое измерение становится единичным. По-видимому, для обеспечения точности определений $\delta_{\text{п}}$ при помощи автоматических аналитических приборов требуется совсемная система. Контроль при помощи автоматических приборов является контролем с использованием измерительной техники, и понятие об анализе, которое обычно применяется при лабораторном контроле, здесь совершенно неприменимо. Очевидно, что эта новая система обеспечения точности аналитических определений должна быть аналогична применяемой для всех измерительных приборов. Вопрос обеспечения точности $\delta_{\text{п}}$, возникший с развитием автоматизации производств, составляет одну из проблем современной метрологии.

Рабочие аналитические автоматические измерительные приборы (см. правый нижний квадрат схемы) следует периодически поверять для обеспечения заданного уровня точности, т. е. для соблюдения условия $\delta_{\text{л}} = \delta_{\text{п}}$. Можно представить себе только три формы такой поверки: сличением показаний образцовых приборов с показаниями рабочих приборов, при помощи смесей заданного состава и при помощи физических эквивалентов (сопротивления, емкости, э. д. с., оптических фильтров и т. д.), включаемых на вход приборов и имитирующих определенный состав анализируемых сред. Разберем каждый из этих вариантов и отметим возникающие при этом метрологические задачи.

Поверка рабочего прибора по образцовому требует, чтобы последний имел метрологический запас точности, т. е. погрешность образцового прибора $\delta_{\text{об}}$ должна быть меньше $\delta_{\text{л}}$. Возникает задача: в каких случаях и каким должен быть этот запас точности. Образцовый прибор, в свою очередь, тоже должен быть поверен. Необходимым средством поверки здесь должны быть, по-видимому, смеси заданного состава. Очевидно, что эти смеси не могут быть аттестованы при помощи анализов,

выполняемых в случае лабораторного контроля с погрешностью $\delta_{\text{л}}$, поскольку надо соблюсти условия $\delta_{\text{л}} = \delta_{\text{п}}$ и поскольку $\delta_{\text{оп}}$ должна быть меньше $\delta_{\text{л}} = \delta_{\text{п}}$.

Появляется новый вопрос: каким образом с необходимой точностью $\delta_{\text{оп}}$ аттестовать смеси, по которым будут поверять образцовые приборы (вариант А на схеме).

Рабочие измерительные приборы можно поверять по смесям заданного состава. В этом случае погрешность состава поверочных смесей $\delta_{\text{пс}}$ должна соответствовать погрешности измерений состава на образцовом приборе, т. е. $\delta_{\text{пс}} = \delta_{\text{оп}}$, но так же как и в первом случае, должно быть $\delta_{\text{пс}} < \delta_{\text{л}} = \delta_{\text{п}}$ (вариант В на схеме).

Очевидно, для аттестации поверочных смесей нельзя применять анализы, выполняемые в контрольных лабораториях с погрешностью $\delta_{\text{л}}$, поскольку должно быть $\delta_{\text{пс}} < \delta_{\text{п}} = \delta_{\text{л}}$.

Если пользоваться метрологической терминологией, то следует сказать, что для аттестации поверочных смесей, являющихся образцовыми средствами, следует применять не «обычные», а «образцовые» анализы. Здесь возникает еще один вопрос: что такое «образцовые» анализы и на основании чего именно можно удостовериться в том, что данные анализы действительно имеют квалификацию образцовых. Нет ни одной работы, в которой были бы сформулированы признаки и условия «образцовых» анализов, а также условия, гарантирующие требуемый для них запас точности. Особенно сложной эта проблема оказывается в области газоаналитических измерений.

Возможен еще третий путь поверки рабочих приборов — при помощи так называемых физических эквивалентов. Но каким образом найти этот эквивалент?

Вопрос можно было решить сравнительно просто, если бы реализованные в измерительных приборах связи состав — свойство являлись точными теоретическими зависимостями. Обычно же они носят эмпирический характер и задача создания физического эквивалента состава перерастает в специальное и многостороннее исследование, конечный результат которого становится неясным. Вся часть схемы, расположенная над правым квадратом, символизирующим контроль при помощи автоматических приборов, охватывает новые метрологические проблемы, которые появились с созданием и внедрением в практику автоматических аналитических измерительных приборов. Изучение проблемы обеспечения правильности показаний рабочих аналитических приборов приводит к выводу, что из-за неопределенности и трудности решения проблемы аналитической аттестации смеси, являющиеся исходными мерами или выполняющие их функцию, необходимо составлять по корректной процедуре из чистых компонентов. На схеме они условно названы поверочными смесями (рабочими эталонами).

Следует отметить, что в практике методических аналитических работ искусственные смеси уже сравнительно давно применяют в качестве исходных образцов. Сличая состав их с результатами анализов, производят оценку точности анализов.

Указанные на схеме поверочные смеси (рабочие эталоны), необходимые для обеспечения правильности показаний автоматических аналитических измерительных приборов, одновременно становятся и теми исходными средствами, при помощи которых выбирают и рекомендуют лабораторные методы анализа.

Процесс развития во ВНИИМ работ в области газоаналитических измерений, принципиальное содержание которых изложено выше, можно увидеть в ряде опубликованных статей [1—3].

Ограничивая для примера рассмотрение этого вопроса газоаналитическими определениями, можно сказать, что исходные меры состава газа применяют:

- для градуировки прецизионных аналитических приборов, используемых при аттестации поверочных газовых смесей;
- проверки образцовых газоанализаторов;
- исследования погрешностей, допускаемых при применении отдельных аналитических методов определения состава;
- установления межлабораторной погрешности анализов;
- контроля качества аналитических работ в лабораториях.

Особенностью исходных мер газоаналитических измерений является невозможность хранения их: они исчезают как меры после применения и, следовательно, их надо постоянно воспроизводить.

Предстояло прежде всего избрать принципиальный путь создания и воспроизведения исходных мер состава газов. Мы остановились на приготовлении смесей заданного состава из чистых газов на прецизионной смесительной установке, исключив для аттестации смесей применение методов аналитической химии. Этот путь позволяет наиболее надежно и точно установить состав смеси, т. е. обеспечить создание метрологически обоснованных исходных мер состава.

Для получения таких исходных мер состава газов во ВНИИМ разработан комплекс соответствующей аппаратуры. В этот комплекс в качестве вспомогательных элементов входит установка для получения чистых газов. Для расширения возможностей получения чистых газов в установку включены секции препаративной хроматографии, низкотемпературной ректификации и дистилляции, или доочистки газа. Основными являются секции аттестации газа по степени чистоты и приготовления газовых смесей заданного состава.

Для аттестации газов по степени чистоты использован метод определения суммарных примесей по разности давлений насыщенного пара начальной и конечной порции взятой пробы газа

при ее дистилляции в сочетании с хроматографическим определением содержания примесей перманентных и углеводородных газов. Основы этих определений изложены в работах [3 и 4].

Наиболее важной частью аппаратуры для получения исходных мер состава газа является газосмесительная установка, которая должна быть выполнена на возможно более высоком метрологическом уровне.

В результате большой исследовательской работы были последовательно решены следующие вопросы: выбор метода составления смесей, разработка метода расчета состава смесей и определения погрешностей их аттестации, разработка отдельных элементов установки, обеспечивающих необходимую точность составления смесей, наконец, создание самой установки [5—7].

Для получения смесей выбран метод отбора компонентов газа в отдельные калиброванные объемы с последующим смешением полученных порций. Этот метод исключал необходимость учитывать влияние физического взаимодействия разнородных газовых молекул. Наиболее целесообразным было признано не измерять давление в калиброванных объемах, а при их заполнении обеспечить условия $P = \text{const}$. Для этой цели разработан оригинальный дифференциальный манометр с акустическим отсчетом уровня ртути, обеспечивающим воспроизведение условия $P = \text{const}$ с относительной погрешностью 0,001%. Для соблюдения условия $T = \text{const}$ калиброванные объемы помещены в массивный медный блок, температурное поле которого автоматически поддерживала с погрешностью 0,001 град система терморезисторов и полупроводниковых термопреобразователей. При различии температуры в разных местах медного блока не более 0,003 град средняя квадратическая погрешность воспроизведения температуры 293 К составляла $\pm 0,0003\%$. Для перемешивания газов создано автоматическое устройство.

Разработанная газосмесительная установка является наиболее совершенной из всех известных и обеспечивает получение исходных мер состава газов с погрешностью не более $\pm 0,01\%$.

В заключение следует отметить, что автоматические анализаторы состава стали предметом обширной международной торговли и их применяют не только в сфере производства, но и в сфере торговли. Таким образом, в правильности показаний этих приборов заинтересованы третьи лица. Возникла, следовательно, необходимость обсуждения метрологических вопросов этого нового вида измерений на международном форуме, и будем надеяться, что этот вопрос скоро станет еще одной формой международного сотрудничества и что в это сотрудничество ВНИИМ внесет должный вклад.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коллеров Д. К. Метрологические проблемы физико-химических измерений. «Труды метрологических институтов СССР», вып. 32 (128). М.—Л., Издательство стандартов, 1963.
2. Коллеров Д. К. О состоянии и перспективных работ в области физико-химических измерений. «Труды метрологических институтов СССР», вып. 76 (136). М.—Л., Издательство стандартов, 1965.
3. Коллеров Д. К. Метрологические основы газоаналитических измерений, гл. IV. М., Издательство стандартов, 1967.
4. Грязина Л. И., Коллеров Д. К. Определение степени чистоты газа и содержание в нем отдельных примесей. «Труды метрологических институтов СССР», вып. 96 (156). М.—Л., Издательство стандартов, 1968.
5. Горнштейн Б. Я. О стабильности параметров терморезисторов. «Измерительная техника», 1968, № 9.
6. Горнштейн Б. Я., Коллеров Д. К. Способы выражения числа молей реальных газов через параметры состояния. «Измерительная техника», 1968, № 10.
7. Горнштейн Б. Я., Грязина Л. И., Коллеров Д. К. Создание метрологических основ газового анализа. «Измерительная техника», 1967, № 11.

Поступила в редакцию

18/III 1969 г.

СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ

Говоря об общих тенденциях развития измерительной техники и метрологии как ее научной базы, обычно указывают на расширение диапазонов измеряемых величин в сторону больших и малых значений, автоматизацию измерений, их стандартизацию, повышение точности и быстродействия измерительных систем. Вместе с тем бурно растет число разновидностей измерений, каждое из которых требует специфического метрологического обслуживания. Так, для управления технологическим процессом выплавки металла и контроля качества продукции необходимо измерить в металле каждой марки содержание 5—12 и даже более элементов. Сейчас для этого широко применяются автоматизированные измерительные системы — фотоэлектрические спектрометры, определяя все элементы на основе одного физического принципа — измерения интенсивности линий эмиссионного спектра. Однако для такого анализа необходимо определить для каждого элемента в каждой марке металла зависимость между регистрируемой величиной — интенсивностью излучения и концентрацией элемента. Для этого используют образцы металла — меры химического состава. Подсчет показывает, что в условиях завода качественной металлургии нужны тысячи разновидностей таких мер.

Подобное положение характерно для измерений химического состава не только в металлургии. В равной мере оно относится ко всем отраслям, потребляющим металлы и сплавы, а также к горнорудной, химической и металлообрабатывающей промышленности, к геологическим и ко многим другим областям материального производства и научного исследования. Это же во многих случаях можно сказать и об измерениях свойств веществ и материалов. Интенсивный рост разновидностей измерений ха-

рактен для магнитных, теплофизических и термохимических, механических и оптических, физико-химических и ядерных свойств, для измерения эксплуатационных показателей и других характеристик.

В этих условиях перед работниками измерительной техники и учеными-метрологами встала весьма сложная проблема. Первая часть ее связана с созданием большого числа типов рабочей измерительной аппаратуры, основанной на использовании средств градуировки, т. е. базирующейся не на принципе абсолютных измерений, а на использовании зависимостей, «состав — свойство» или «свойство — свойство». В этом случае нужны не только рабочие измерительные приборы и методы, но и весьма обширный ассортимент соответствующих рабочих мер состава, свойств, эксплуатационных показателей. Вторая часть проблемы связана с созданием образцовых средств для многих тысяч разновидностей подобных измерений, что не только сложно, но и нуждается в быстром решении. Это обусловлено тем, что, несмотря на прогресс в развитии аналитической химии, спектроскопии и других дисциплин, автоматизации и стандартизации контроля [1,2], точность измерения состава веществ и их свойств, главным образом физико-химических, во многих практически важных случаях остается низкой, особенно при испытаниях состава и свойств материалов новой техники. Техничко-экономические последствия такого положения очевидны.

Классическое средство решения задачи поддержания единства и точности измерений — создание многоступенчатых систем измерительных средств, соподчиненных по точности (нормативно оформляемых в виде поверочных схем), в подобной ситуации техничеки и экономичеки вряд ли возможно. Число схем, которое предстоит реализовать, составляет, по-видимому, десятки тысяч. И это в условиях, когда остро ощущается недостаток даже в рабочих измерительных средствах и запаса точности у рабочих средств, и тем более у образцовых, часто нет.

При таком положении во многих, если не в большинстве случаев, в качестве наиболее реального средства поддержания единства измерений следует принять создание двухступенчатых систем по типу: рабочее измерение — образцовое средство, служащее для проверки и градуировки.

Для проверки и градуировки в указанных случаях могут служить образцовые методы, образцовые приборы и стандартные образцы. Опыт показывает, что образцовые методы в рассматриваемых областях измерений находят лишь ограниченное применение. Это объясняется тем, что создание прецизионных методов — задача сложная. Ее не всегда можно решить с учетом реальных научно-технических и экономических возможностей. Так, для аттестации стандартных образцов химического состава используют лучшие методы и привлекают наиболее опытные и авторитетные лаборатории. Однако недостаточная точность

получаемых результатов, их существенное взаимное отличие, как правило, не позволяют ориентироваться на какой-либо один метод или лабораторию.

Образцовые приборы для специфических разновидностей измерений применяют несколько шире, но ограничено. Это обусловлено прежде всего тем, что номенклатура подобных приборов должна быть весьма обширной: практически для каждого вида рабочих приборов надо иметь соответствующий образцовый.

Кроме того, поверка с помощью образцовых приборов обычно вынуждает демонтировать рабочие приборы с пультов и транспортировать их к месту поверки. Поэтому приходится иметь резервные приборы для замены снятых, средства и персонал для доставки их на поверку. Кроме того, возможна потеря точности при обратной транспортировке. С помощью образцового прибора в ряде случаев удается осуществлять поверку только аппаратурных погрешностей, а не доминирующих оперативных и методических. Наконец, существует весьма обширная группа измерений, в которой градуировку и поверку осуществлять с помощью приборов нельзя.

В силу отмеченных затруднений парк образцовых приборов остается ограниченным. Так, обработка данных ВНИИ Комитета стандартов о состоянии приборов для измерения состава и свойств газовых и жидких сред показала, что примерно из 900 видов таких рабочих приборов более 90% не обеспечены образцовыми. По данным ВНИИМ, к 1966 г. приборостроительными организациями не был создан и внедрен в практику ни один аналитический прибор для поверочных целей, не появились публикации о разработке таких приборов, и не было подано ни одной заявки на их изобретение. В метрологических институтах работы ведутся в течение ряда лет, но несоответствие масштаба этих работ потребностям очевидно.

В системе средств, необходимых для измерений, все возрастающее место занимают стандартные образцы — меры химического состава (содержания элементов, их соединений, изотопов) или свойств веществ и материалов [3—6]. Отличительной особенностью стандартных образцов, как мер, является то, что в них аттестуется обычно одна характеристика. Поэтому, кроме этой точно аттестованной характеристики, они должны иметь типичную для данного вещества или изделия, или группы веществ и изделий, общую композицию (конфигурацию, структуру, валовый состав, степень измельчения). Примером могут служить стандартные образцы магнитных материалов, вязкости, теплофизических характеристик, образцы урана с известными соотношениями изотопов, образцы для химического и спектрального анализа металлов, сплавов, минерального сырья, топлива и многие другие [7]. Другая отличительная особенность стандартных

образцов состоит в том, что их могут расходовать в процессе измерений.

Причины, обуславливающие тенденцию к экспоненциальному росту применения стандартных образцов, не случайны. Прежде всего, это большая потребность в средствах градуировки при специфических измерениях, связанная с автоматизацией контроля в ключевых отраслях промышленности.

Во-вторых, это наличие обширных и весьма важных областей измерений, где образцовые методы и приборы не могут быть применены для поверки или их создание технически или экономически невыгодно. Таковы, например, почти все анализы-измерения состава веществ в твердой фазе, измерения многих теплофизических и термодимических величин, оптических характеристик.

В-третьих, это довольно высокая стабильность стандартных образцов как «хранителей» числового значения величин, подлежащих воспроизведению.

И, наконец, — значительная экономическая выгода. Оценки показывают, что, например, при 10-летней эксплуатации прибора затраты на ежегодное изготовление стандартных образцов в среднем на порядок меньше, чем затраты, связанные с образцовыми приборами. Источником значительной экономии может стать также улучшение организации многих видов поверки. Так как стандартный образец можно применять непосредственно на месте расположения рабочих средств, то исключаются затраты, вызванные необходимостью демонтировать рабочие средства, транспортировать их и т. д. Вместо принципа: «поверяемое или градуируемое средства — к образцовому» оказывается возможным более прогрессивный: «средство поверки или градуировки — к месту рабочих измерений».

Выполненные нами обобщенные оценки мирового выпуска стандартных образцов состава и свойств неорганических и органических веществ показывают, что ежегодно мировой выпуск составляет около 3000 наименований (типов) образцов общим количеством около 500 тыс. экземпляров.

Проблема стандартных образцов — многоплановая. Ее решение требует: создания организационных и материальных предпосылок для выпуска стандартных образцов в количествах и ассортименте, удовлетворяющих потребности материального производства и научных исследований; метрологического обеспечения надлежащего качества стандартных образцов как средств измерения, т. е. создания методов изготовления, аттестации и применения каждого типа стандартных образцов, а также надзора за их качеством.

Решение этой задачи требует также разработки методологических аспектов измерений (осуществляемых с помощью стандартных образцов), исследования связи между точностью испытаний и определяющими ее величинами: точностью средств

измерений, точностью управления технологическими процессами, нормативами и качеством продукции, достоверностью контроля.

Наконец, нужно законодательное закрепление места стандартных образцов в общей системе стандартизованных средств и методов испытаний состава и свойств веществ и материалов.

Общим выводом из оценки значимости, состояния и путей решения проблемы, который сделали метрологические организации, институты Академии наук, ряд представительных совещаний, явилась идея о создании Государственной службы стандартных образцов (ГССО) как части Государственной метрологической службы страны. К настоящему времени в СССР определены и осуществляются целесообразные формы организации массового выпуска стандартных образцов. Разработана и законодательно закреплена система обеспечения и контроля их качества (имеется в виду общетехнический ГОСТ 14263-69 «Государственная система обеспечения единства измерений. Общие требования к стандартным образцам веществ и материалов», разработанный ВНИИМ и его Свердловским филиалом [7]).

Сформулирована и уже частично выполняется подробная программа научно-исследовательских работ по проблеме. Создано головное подразделение — Всесоюзный научно-исследовательский центр Государственной службы стандартных образцов (ВНИЦ ГССО). В метрологических институтах более широко развертываются работы по тематике стандартных образцов (ВНИИМ и ВНИИФТРИ — стандартные образцы свойств, Тбилисский филиал ВНИИМ и Сибирский филиал ВНИИФТРИ — стандартные образцы состава).

Основные работы по выпуску стандартных образцов состава сосредоточены в отраслевых институтах. Объем этих работ предстоит значительно увеличить.

Широкая номенклатура стандартных образцов, специфика аттестации каждого их типа, слабая разработка методологии, а также отсутствие многих важнейших типов стандартных образцов делают целесообразным планирование деятельности ВНИЦ ГССО на первом этапе в основном как методического центра и организующего звена. С учетом этого во ВНИЦ ГССО разработаны математические модели связи между следующими группами величин: метрологическими характеристиками средств измерений; достоверностью контроля состава и свойств; параметрами, характеризующими стабильность технологического процесса; нормативами качества продукции; полем допуска или точностью указания его границ.

Расчеты выполнены для серийного и индивидуального контроля и широкого диапазона значений случайных и систематических погрешностей контроля и отклонений контролируемых параметров.

На основании этих расчетов решены типовые задачи, имеющие определяющее значение при создании оптимальных систем контроля состава и свойств сырья, полуфабрикатов и продукции, включая их стандартизацию и управление технологическими процессами. К ним относятся задачи:

определения необходимой точности контроля, если заданы его достоверность, стабильность технологического процесса и поле допуска;

определения достоверности контроля, если заданы точность измерений, стабильность технологического процесса и поле допуска на состав или свойства;

оценки возможности повысить достоверность контроля за счет увеличения точности измерений и повышения стабильности технологического процесса, а также увеличения поля допуска;

определения допустимой нестабильности технологического процесса, если заданы достоверность и точность контроля и поле допуска;

нормирования поля допуска на состав или свойство, если заданы достоверность, точность контроля и стабильность технологического процесса.

Указанные расчеты дали возможность выполнить метрологическую оценку стандартов на сырье и продукцию и на методы испытаний в металлургической, нефтеперерабатывающей, лесохимической и других отраслях промышленности. Это позволило дать рекомендации о совершенствовании нескольких сотен стандартов, главным образом на методы испытаний [8—10].

Сейчас разрабатывается общетехнический государственный стандарт: «Государственная система стандартизации. Стандарты технических требований и на методы испытаний химического состава». Согласование «нормативов точности» и осуществляется оценка фактически обеспечиваемой точности испытаний в ряде отраслей промышленности.

Совместно с ВНИИМ впервые в мировой практике разработан общетехнический государственный стандарт, законодательно закрепивший статус стандартных образцов, требования к их качеству, а также порядок аттестации, включая создание Государственного реестра стандартных образцов [7].

Совместно с ВНИИМ и другими метрологическими и отраслевыми институтами и учреждениями Академии наук разработан комплексный перспективный план научно-исследовательских работ по проблеме стандартных образцов и оценена потребность в них различных отраслей народного хозяйства и научных учреждений.

В рамках международного сотрудничества выполняются работы по тематике стандартных образцов. Завершены работы по выпуску первой в стране партии стандартных образцов нефтяных топлив и масел (совместно с Казанским филиалом ВНИИФТРИ), аттестуемых по широкой номенклатуре характе-

ристик: коксуемости, термической стабильности, содержанию серы, зольности, температуре вспышки и другим, а также стандартных образцов для промышленности твердых сплавов.

Начата метрологическая экспертиза стандартных образцов, выпускаемых отраслевыми институтами, а также проектов стандартов на сырье и продукцию и на методы испытаний их состава и свойств.

Осуществленные научно-технические мероприятия создают предпосылки для развертывания многих работ по проблеме стандартных образцов, в частности, по обеспечению их качества.

Изучение задачи расширения промышленного производства образцов временной комиссией Государственного комитета Совета Министров СССР по науке и технике под председательством акад. П. Алимарина с участием работников институтов Комитета стандартов показало, что в этом вопросе следует ориентироваться на создание ряда специализированных центров в отраслях промышленности, работающих под научно-методическим руководством организаций Комитета стандартов. Такой порядок позволит использовать как заинтересованность отдельных министерств в улучшении контроля качества их продукции по составу и свойствам, так и специализированную производственно-техническую базу, имеющуюся в каждом министерстве (например установки для получения чистых веществ, тех или иных видов сплавов и т. д.), и специалистов отраслевых институтов и предприятий.

На метрологические институты следует возложить выпуск образцов более высокой точности.

Решение комплекса перечисленных задач даст возможность обеспечить в нашей стране точность и единство измерений состава и свойств веществ и материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беренштейн Л. Е., Райский С. М., Сухов Г. В., Фильмонов Л. Н., Шаевич А. Б. Proceedings of the XIV Colloquium Internationale. Debrecen, Hungary, 1967, pp. 809—818.

2. Шаевич А. Б. Метрологические аспекты промышленности аналитического контроля. «Измерительная техника», 1968, № 3.

3. The NBS Standard Reference Materials Program. Analytical Chemistry, 1966, v. 38, No 8; Standard Reference Materials as Viewed by the Laboratory Supervisor—a Status Report. Analytical Chemistry, 1968, v. 40, No 3, pp. 24A—42A.

4. Олейник Б. Н., Симин А. И. и Шаевич А. Б. Государственная служба стандартных образцов. «Измерительная техника», 1967, № 9.

5. Всемирная организация здравоохранения. Серия технических докладов № 329. Комитет экспертов по стандартизации биологических препаратов, доклад 18. Изд. ВОЗ, Женева, 1967.

6. Стандартные образцы, выпускаемые в СССР. Под ред. А. Б. Шаевича. М., Издательство стандартов, 1969.

7. Шавевич А. Б., Силин А. И., Семаков Б. В. Общетехнический стандарт 14263—69. «Государственная система обеспечения единства измерений». Общие требования к стандартным образцам веществ и материалов. «Измерительная техника», 1968, № 9.

8. Шавевич А. Б., Силин А. В. Стандартизация химического состава и методов его испытаний как метрологическая проблема. «Стандарты и качество», 1967, № 12.

9. Силин А. В., Шавевич А. Б., Рыбникова О. В. Метрологическая характеристика стандартов на нефтепродукты и методы их испытаний. «Стандарты и качество», 1968, № 2.

10. Шавевич А. В. Об ограничении погрешностей анализа при стандартизации методов контроля химического состава материалов. «Стандарты и качество», 1968, № 4.

Поступила в редакцию

31/1 1969 г.

О НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧАХ МЕТРОЛОГИИ В ОБЛАСТИ ГИДРО- И ГАЗОДИНАМИКИ

Гидро- и газодинамике и связанным с ними отраслям промышленности, науки и техники в настоящее время принадлежит одно из первых мест по объему экспериментальных исследований, а соответственно и по объему измерений. Авиация, флот и ракетная техника, энергетика, химическая промышленность и машиностроение требуют огромного объема измерений в жидких, газовых и плазменных средах.

Чрезвычайное разнообразие объектов исследования и сложность решаемых задач предъявляют весьма жесткие требования к единству мер, правильности выбора используемых методов измерения, к совершенству измерительных инструментов.

Однако если объем измерений в области гидро-газодинамики занимает одно из первых мест, то состояние метрологии, уровень измерительной техники здесь далеко не всегда соответствуют уровню предъявляемых требований. Одна из причин этого заключается в том, что почти все практические работы в области гидро-газодинамических измерений сосредоточены в научно-исследовательских и промышленных учреждениях не измерительного профиля, для которых метрологические работы нежелательны. Остановимся на некоторых работах ВНИИФТРИ в этой области.

В настоящее время гидро-газодинамические измерения выросли в проблему первостепенной важности, в которой задачи метрологии тесно переплетаются с задачами приборостроения. В решении этой проблемы институтам Комитета стандартов должна принадлежать, по-видимому, ведущая роль.

Одной из основных задач в области гидро-газодинамики является разработка новых методов измерений. Несмотря на многочисленность методов гидро-газодинамических измерений, они позволяют решать далеко не все задачи, выдвигаемые практикой.

Расширение диапазона параметров исследуемых средств, усложнение условий измерений, увеличение объема информации требуют создания все новых и новых методов исследований.

Недостаточное метрологическое обеспечение, а также обеспечение приборами работ в области гидро-газодинамики явилось причиной того, что в настоящее время оказывается значительно проще создать даже очень сложные и дорогие экспериментальные установки, чем достаточно полно исследовать получаемые с их помощью результаты. Это, естественно, недопустимо.

Особенно остро в настоящее время стоит задача создания эталонных приборов для измерения таких параметров жидких и газовых сред, как переменная скорость, давление, расход и концентрация примесей, локальные значения турбулентности, плотность и температура. При этом наряду с требованием высокой точности, высокого пространственного и временного разрешения, предъявляемым к таким приборам, одним из важнейших требований является бесконтактность измерений, т. е. отсутствие каких бы то ни было зондов, вводимых в исследуемую среду. Применение механических зондов всегда сопряжено с возмущениями среды, подчас недопустимо большими и неподдающимся учету. Кроме того, в ряде случаев, особенно при исследованиях быстро движущихся и высокотемпературных потоков, использование каких-либо зондовых методов практически невозможно.

Широкие перспективы открывает поэтому применение в качестве гидродинамических зондов тонких монохроматических пучков электронов, ионов, лазерного излучения, пучков ультрафиолетовых, инфракрасных, рентгеновских лучей и т. д., т. е. применение всех беззондовых методов измерений. Так, например, во ВНИИФТРИ разработаны методы измерения местной скорости и турбулентности потоков, основанные на использовании лазерного излучения, которые позволяют проводить измерения практически при любых значениях измеряемой величины в любой оптически прозрачной среде: жидкости, газе и плазме.

Будучи кинематическими, эти методы абсолютны, т. е. измеряемая величина находится согласно своему определению и не зависит от каких-либо других параметров исследуемой среды. Основаны они на определении времени пролета какими-либо оптическими неоднородностями среды известного малого расстояния — базы измерения. Неоднородности имеют различную природу. Это могут быть трассирующие макрочастицы, взвешенные в среде, флуктуации коэффициента преломления среды. Происхождение этих неоднородностей также может быть различно. Они могут содержаться в самом исследуемом потоке естественно или их создают в нем искусственно с целью измерения. Фотоэлектрическая регистрация движения таких неоднородностей с последующим статистическим, частотным или корреляционным анализом позволяет найти как степень

турбулентности, т. е. отношение среднего квадратического значения пульсационной составляющей к средней скорости, так и частотный спектр пульсации скорости.

Во ВНИИФТРИ для измерения средней скорости и турбулентности потоков разработано три метода: времяпролетный; метод, основанный на корреляционном анализе оптических сигналов от двух и более потоков; метод, основанный на частотном анализе движения поля оптических неоднородностей потока (жидкости, газа или плазмы).

Пространственное разрешение, обеспечиваемое этими методами, составляет доли миллиметра, частотный спектр практически не ограничен.

В настоящее время во ВНИИФТРИ создаются эталонные приборы для измерения скорости и турбулентности в жидких и газовых средах, основанные на указанных методах.

Массовость гидродинамических измерений особенно остро ставит вопрос об организации поверочных работ в этой области, важность которых трудно переоценить. Дело осложняется тем, что количество приборов для гидро-газодинамических измерений крайне мало. Большинство же приборов имеет нестандартное макетное исполнение. В то же время число параметров, подлежащих измерению, велико и диапазон их измерений крайне широк. Это делает возможным организацию поверки только на базе метрологических институтов с привлечением больших исследовательских сил и с соответствующими материальными затратами.

Одним из важнейших вопросов в этом плане является создание эталонных средств и установок для поверки соответствующих приборов, однако не решив его, нельзя обеспечить единство измерений, необходимое для решения важнейших прикладных задач в этой области.

Измерительные работы в области динамики плазмы и газодинамики часто называют диагностикой, как и соответствующие работы в области медицины. Это не случайно: между этими областями много общего. В частности, создание эталонных средств в области гидро-газодинамики и динамики плазмы в ряде случаев почти столь же трудно, как в области биологии, поскольку здесь мы имеем дело с эталонированием процессов, определяемых многими параметрами.

Ввиду разнообразия параметров и широты диапазона их измерения охватить поверкой все измеряемые практически параметры и среды, разумеется, нельзя. Однако обеспечение поверки при решении ряда узловых задач гидро-газодинамики уже сегодня возможно и совершенно необходимо.

Трудной и крайне актуальной проблемой является эталонирование турбулентности в жидких и газовых средах. Наличие множества методов, каждый из которых имеет ограниченное применение при практически полном отсутствии стандартных приборов, делает решение этой проблемы крайне необходимым.

Хотя это решение в общем виде пока не представляется реальным, решение частных задач, в которых эталонируют лишь отдельные параметры, характеризующие турбулентность, будет осуществлено, по-видимому, в недалеком будущем.

Актуальными являются измерения в неравновесных плазменных средах, связанные с магнито-гидродинамическим преобразованием тепловой энергии в электрическую, с плазмохимическим синтезом и т. д.

Интересные возможности для создания неравновесных плазменных сред с регулируемой и хорошо воспроизводимой степенью неравновесности открывает применение инжектирования быстрых электронов в термическую плазму. С этой целью одну из макетных установок сооружают во ВНИИФТРИ.

Важным и в то же время очень сложным направлением является исследование параметров течений разреженного газа и плазмы. Весьма большие перспективы открывает здесь применение в качестве измерительного инструмента тонкого пучка быстрых электронов. Приборы, основанные на использовании зондирующих электронных пучков, позволяют измерять плотность, скорость, температуру газовой плазмы, а также напряженность электрических и магнитных полей. В этом случае, так же как и в оптических методах, никакого возмущения среды не происходит, но измерение оказывается строго локальным.

Во ВНИИФТРИ разработаны методы измерения местной скорости и плотности разреженных газовых и плазменных потоков. Скорость измеряют двумя путями: методом флуоресцентного трассирования и по доплеровскому сдвигу спектральных линий флуоресценции. Первый метод заключается в том, что путем импульсного облучения пучком электронов создают светящиеся флуоресцентные метки, а потом фотоэлектрически регистрируют их движение. Во втором случае используют доплеровский сдвиг спектральных линий флуоресценции, возбуждаемой пучком быстрых электронов.

Погрешность измерения скорости этими методами не превышает 1—2%. Для сравнения можно сказать, что погрешность измерения трубкой Пито, которая является основным инструментом при измерениях в потоках разреженного газа, составляет десятки, а иногда и более процентов. При этом использование пучка электронов позволяет провести измерение за несколько микросекунд с пространственным разрешением порядка долей миллиметра. Примерно то же пространственное разрешение получается при использовании доплеровского сдвига специальных линий.

Для измерения полей плотности в разреженных газах и плазменных потоках используют тормозное рентгеновское излучение, возбуждаемое пучком электронов. При равных условиях облучения электронами интенсивность рентгеновского излучения, испускаемого заданным объектом (объемом газа)

пропорциональна числу частиц газа, заключенных в этом объеме, и не зависит от каких-либо других его параметров. Это позволяет делать достаточно точные инструменты для измерения местного значения плотности, пульсации плотности, а также и для получения полей плотности в заданных сечениях потока.

Основным элементом приборов для электроннолучевого зондирования являются электронные пушки, позволяющие получать хорошо сфокусированные тонкие пучки электронов и вводить их из вакуума в газ, где проводят измерение. Ряд таких установок выполнен во ВНИИФТРИ.

Важнейшими задачами метрологии в области гидро-газодинамики является анализ существующих методов измерений, установление максимально четких границ применимости отдельных методов, разработка рекомендаций по их использованию, а также анализ наиболее типичных условий и цепей измерений.

На основе анализа наиболее распространенных объектов измерений целесообразно разработать рекомендации для создания стандартных измерительных систем, основанных на использовании типовых блоков. Дело в том, что для большинства наиболее распространенных видов измерений в гидро-газодинамике не только вторичные, но и первичные преобразователи могут быть в значительной мере унифицированы. Удачными примерами такой унификации могут служить, в частности, термоанемометрическая аппаратура голландской фирмы «Диза», анемометрическая аппаратура английской фирмы «Метерфлоу», используемая для измерений как в жидкостях, так и в газах на самых различных объектах фактически во всех странах мира.

Хотя создание таких систем — дело приборостроительной промышленности, основа для их создания, по-видимому, должна быть подготовлена метрологическими организациями. Измерительные системы, состоящие из серий взаимозаменяемых оптических, спектральных, электронных, акустических и зондовых блоков, а также из соответствующей регистрирующей и анализирующей аппаратуры, позволили бы при минимальном количестве дополнительных деталей для стыковки с объектами проводить комплексные измерения параметров практически на любом объекте с высокой точностью и минимальными затратами времени.

Наряду с общими требованиями точности основными требованиями к измерительным системам для гидро-газодинамических исследований являются:

высокое временное разрешение, т. е. возможность проводить измерения за промежутки времени порядка микросекунды и даже менее;

высокое пространственное разрешение, т. е. возможность осуществлять строго локальное измерение с объемом осреднения порядка миллиметров и даже долей миллиметра;

возможность получения статистически осредненных значений, заданных программой осреднения;

возможность получения мгновенных полей заданных параметров;

возможность одновременного и независимого определения нескольких параметров среды в одной точке;

отсутствие возмущения исследуемой среды измерительным инструментом.

Особенностью измерений в жидких газовых и плазменных средах является многочисленность параметров, определяющих состояние среды. Поэтому особенно важно применение абсолютных методов измерения, которые обеспечивают независимость результатов от каких-либо параметров среды, кроме измеряемого. Внедрение их окажет существенную помощь в создании измерительных систем для гидро-газодинамических исследований, поскольку как абсолютные они, как правило, и универсальны.

С исключительной остротой стоит в настоящее время вопрос о налаживании оперативной информации в области метрологии и измерительной техники для исследований в области механики жидкости и газа. Разнообразие прикладных задач, связанных с исследованием течений жидкости, газа и плазмы, огромный поток публикаций в периодической печати затрудняют организацию своевременной информации в этой области. В качестве примера можно указать, что работы, очень близкие с точки зрения техники измерения, разбросаны по всем выходящим в настоящее время реферативным журналам. В то же время нет ни одного реферативного журнала, в котором можно было найти ссылки на большинство работ в области измерения в потоках жидкости, газа и плазмы. По-видимому, было бы целесообразно ссылки на работы, имеющие ценность с точки зрения измерения параметров сред, сосредоточить в реферативном журнале «Метрология и измерительная техника» независимо от прикладных задач, решаемых в этих работах, при этом сделать упор на то, что измеряется и какими средствами, а также организовать периодическую публикацию наиболее ценных библиографий, например, в журнале «Измерительная техника».

Подводя итог, можно сказать, что состояние метрологии и измерительной техники в области механики жидкости и газа в настоящее время еще отстает от требований практики. Однако есть все реальные возможности, чтобы изменить это положение. И можно надеяться, что метрология и измерительная техника в области механики жидкости и газа, а также связанных с ней отраслей будут подняты на соответствующий уровень.

**МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ВНИИМ В ОБЛАСТИ
ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТУРБУЛЕНТНОСТИ**

Турбулентные течения представляют наиболее распространенную форму движения жидкости. Еще в начале нынешнего столетия Л. Прайдтль показал практическую важность изучения турбулентности, обнаружив, что сопротивление, которое испытывает тело при движении в жидкости, зависит от того, является ли течение в пристеночном слое ламинарным или турбулентным.

Изучению природы и свойств турбулентности посвящено огромное количество работ. Тем не менее основные задачи исследования турбулентности, даже в несжимаемой жидкости, все еще далеки от разрешения. Трудность проблемы заключается в том, что в силу незамкнутости задачи турбулентного движения единственным источником все более полного понимания явления служат накопление опытных фактов. Вопросы гидродинамики оказываются неразрешимыми без тщательных систематических, выполненных на высоком метрологическом уровне измерений в натурных и лабораторных условиях.

Отмечая 75-летие ВНИИМ, нельзя не напомнить, что Д. И. Менделеев, прекрасно понимая роль и перспективы развития гидродинамики, приложил много сил для создания основ метрологического обеспечения измерений в потоках жидкости. По его инициативе в Главной палате мер и весов были созданы водомерная и манометрическая лаборатории и начаты работы по изучению вязкости капельных жидкостей.

Прогресс современной науки и техники выдвинул перед гидродинамиком множество новых задач, решение которых невозможно без привлечения новейших достижений измерительной техники и метрологии, а постановка этих задач существенно расширила перечень измеряемых величин. Если в недалеком прошлом основным источником информации о свойствах турбулентности были в основном измерения пульсаций скорости, то

уже сейчас измерения в потоках жидкости включают измерения постоянных составляющих и турбулентных пульсаций давления, температуры, касательных напряжений, теплового потока, оптических характеристик, концентрации, электропроводности.

Понятно, что практическое осуществление измерений гидродинамических параметров, даже в рамках этого далеко не полного перечня, невозможно без применения методов и средств самых различных видов измерений: механических, тепловых, температурных, электрических, оптических и др. Современный уровень измерений отдельных величин в турбулентных потоках прежде всего зависит от состояния метрологии в соответствующих разделах измерений. Однако одно это еще не дает гарантий обеспечения единства гидродинамических измерений, ибо не учитывает специфики турбулентности.

Особенностью гидродинамических измерений является прежде всего то, что между отдельными измеряемыми в турбулентных потоках величинами существует глубокая физическая связь, внутреннее единство, обусловленные турбулентной природой возникновения пульсаций. Эта связь проявляется, например, в одинаковости пространственных и временных масштабов пульсаций соответствующих величин, что предъявляет определенные требования к геометрическим размерам и динамическим характеристикам измерительных преобразователей для получения сопоставимых результатов, особенно при корреляционных измерениях.

Турбулентное происхождение флуктуаций определяет взаимную связь между значениями амплитудного и частотного диапазонов различных измеряемых величин. Так, если исходить из известного определения турбулентности, как «суперпозиции вихрей уменьшающего размера» (поскольку микромаштабы пульсаций измеряемых величин оцениваются размерами наименьшего вихря), можно предположить, что вследствие неограниченного уменьшения размера вихря возможно неограниченное расширение частотного диапазона пульсаций величин, измеряемых в турбулентном потоке. Интуитивно ясно, что это не так. В реальных жидкостях благодаря влиянию вязкости не может произойти неограниченного уменьшения размера вихря. Чем меньше вихрь, тем больше градиент скорости поперек него, а значит больше и вязкие напряжения, препятствующие вихревому движению. Следовательно, в любом турбулентном потоке будет существовать статистический нижний предел размера наименьшего вихря, который в сочетании со средней скоростью потока и определяет максимальную частоту турбулентных пульсаций, воспринимаемых измерительным преобразователем.

Из этих же соображений следует, что в каждом конкретном случае существует связь между статистическими нижними пределами амплитудных значений турбулентных пульсаций измеряемых параметров.

Совершенно очевидно, что только учет всех факторов, вытекающих из природы процесса, дает возможность сформулировать физически обоснованные, согласованные между собой технические требования к рабочим измерительным приборам, образцовым средствам измерения и методам градуировки и поверки.

Таким образом, только комплексный подход к разработке средств измерения и метрологии, учитывающий все особенности физического явления, способен обеспечить подлинное единство гидродинамических измерений и дать результаты, отвечающие современным требованиям.

Работы в области метрологии гидродинамических измерений во ВНИИМ развиваются по нескольким основным направлениям и включают разработку:

- 1) теоретических основ измерений в турбулентных потоках, исследование погрешностей, определение их источников и путей уменьшения;
- 2) методов и аппаратуры для градуировки и поверки средств измерения;
- 3) методов и аппаратуры для воспроизведения пульсаций гидродинамических величин с целью исследования рабочих и образцовых средств измерения.

В области общей теории измерений выполнен ряд исследований, посвященных изучению погрешностей контактных методов измерения турбулентности, в том числе: исследование влияния размеров измерительного преобразователя на точность измерения корреляционной функции, временного спектра и среднего квадратического значения турбулентных пульсаций; исследование погрешности измерения случайного поля в точке измерительным преобразователем конечных размеров.

В области измерения температуры теоретически и экспериментально исследованы динамические характеристики термодатчиков для измерения температуры турбулентных потоков, являющиеся дальнейшим развитием работ ВНИИМ по измерению нестационарных температур в условиях меняющейся теплоотдачи. В работе получены новые научные результаты и рекомендации по измерению температур неизотермических турбулентных потоков, когда изменение температуры среды и коэффициента конвективного теплообмена происходит по случайному закону. Так, например, установлено, что при измерениях температуры в турбулентных потоках с помощью термометра сопротивления при наличии пульсаций коэффициента конвективного теплообмена, статистически связанных с пульсациями температуры потока, дисперсия показаний термодатчиков может быть не только меньше (как принято считать), но и больше дисперсии температуры среды. Это зависит от динамических свойств термодатчиков и интенсивности турбулентности.

В условиях случайного изменения температуры среды и коэффициента конвективного теплообмена, являющихся коррелированными процессами, между усредненными значениями температур термодатчика и среды возникает смещение. На основе проведенного исследования разработана методика введения поправок в результаты измерения, а также рекомендации по выбору термодатчиков, обеспечивающих минимальные погрешности от смещения среднего уровня температуры. В области измерения пульсаций давления разработана методика расчета пьезоэлектрических микроприемников для измерения турбулентных пульсаций давления в широкой области частот, исследованы погрешности измерения пульсаций давления в пограничном слое с помощью пьезоэлектрических измерительных преобразователей различной формы, имеющих произвольное распределение чувствительности по поверхности при различной их ориентации в потоке. Показано, что частотный диапазон пьезодатчика турбулентных пульсаций давления существенно зависит от его размеров и конструкции. Разработана методика учета погрешностей, обусловленных усреднением пульсаций давления на приемной поверхности преобразователя.

В области измерения скоростей выполнен большой объем работ по метрологии термоанемометрических измерений. Благодаря высокой пространственной разрешающей способности, широкому частотному диапазону термоанемометры занимают особое место среди приборов, предназначенных для измерений турбулентности. Техника термоанемометрических измерений в воде бурно развивается и по существу большинство экспериментальных результатов в статистической теории турбулентности получено с помощью этого прибора. В работах ВНИИМ исследуются погрешности термоанемометра, вызванные тепловой инерцией измерительного преобразователя, шунтированием его водой, влиянием интенсивности турбулентности, температуры среды, неточностью ориентации по потоку и другими факторами. Исследована пространственная разрешающая способность измерительного преобразователя термоанемометра. Разработана методика оценки погрешностей измерения поперечных составляющих пульсаций скорости термоанемометром. По результатам законченных исследований подготавливаются методические указания по градуировке термоанемометров и оценке погрешностей измерений.

В последнее время термоанемометрическую аппаратуру стали применять для измерения касательного напряжения на поверхности обтекаемого тела. Во ВНИИМ исследуют и разрабатывают методы учета погрешностей термоанемометрических методов измерения касательного напряжения.

В течение последних лет во ВНИИМ проводится планомерная работа по созданию методов и аппаратуры для градуировки и поверки приборов для измерения турбулентных пульсаций.

Сложность этой работы заключается в том, что несмотря на все увеличивающиеся запросы народного хозяйства, отечественная приборостроительная промышленность почти не выпускает приборов, предназначенных специально для измерения в турбулентных потоках жидкости. Отсутствие единых методов градуировки и поверки таких приборов вызывает расхождения в оценке метрологических характеристик аппаратуры и затрудняет обобщение и анализ результатов измерений. По-видимому, поэтому в литературе, посвященной описанию аппаратуры для гидродинамических измерений, зачастую предпочитают вообще не упоминать о погрешностях ее и результатов измерений. Все это существенно затрудняет выбор оптимальных методов градуировки и поверки, обоснование технических требований к образцовой аппаратуре и ее разработку.

Во ВНИИМ, выполняющем большой объем работ по созданию образцовых средств, разработаны принципы построения образцовой аппаратуры для градуировки и поверки приборов для измерений в турбулентных потоках, выработаны рекомендации по построению поверочных схем в этой области измерений. На основании полученных рекомендаций сконструированы, изготовлены и исследованы образцовые установки и разработаны методы градуировки измерительных преобразователей.

Не имея возможности в этом сообщении подробно осветить все выполненные работы, остановлюсь лишь на нескольких работах для обеспечения единства измерений в области измерения пульсаций, скорости и температуры.

Для градуировки термоанемометров по средней скорости в диапазоне от 0,05 м/сек и выше в течение 1966—1967 гг. разработана и введена в эксплуатацию гидродинамическая установка — труба гравитационного типа (рис. 1). Установка состоит из напорного бака 1 с полезным объемом 16 м³, вертикального канала 2, спрямляющего аппарата 3, рабочего участка 4, сливного колена 5, распылителя 6, мерного бака 7, дифференциального манометра 8, сливного бака 9, обратного канала 10, насоса 11.

Напор, создаваемый в трубе, составляет 18 м вод. ст., что позволяет получать скорости потока воды в рабочем участке 4 до 10 м/сек. При увеличении напора возможно дальнейшее повышение скорости. Основным элементом трубы является рабочий участок открытого типа (рис. 2). Поток в нем представляет собой свободную струю, вытекающую из насадка в затопленный объем. Рабочий участок трубы состоит из корпуса 2, конфузора 1, спрямляемого аппарата 3, сеток 5 и сотового выпрямителя 4. Градулируемый измерительный преобразователь закрепляют в координатном устройстве. Сетки и сотовые выпрямители сменные и их можно устанавливать на различном расстоянии от конфузора. Это обеспечивает выравнивание профиля скорости в сечениях струи и дает возможность регулировать интен-

сивность турбулентности в зоне установки градуируемого преобразователя. Для приборов, измеряющих турбулентные пульсации скорости, такая регулировка совершенно необходима, так как теория и опыт показывают зависимость градуировки приборов от интенсивности турбулентности. В конструкции установки предусмотрены сменные рабочие участки с диаметром конфузора от 20 до 100 мм, что позволяет градуировать не только термоанемометры, но и другие приборы, предназначенные для измерения скоростей потоков.

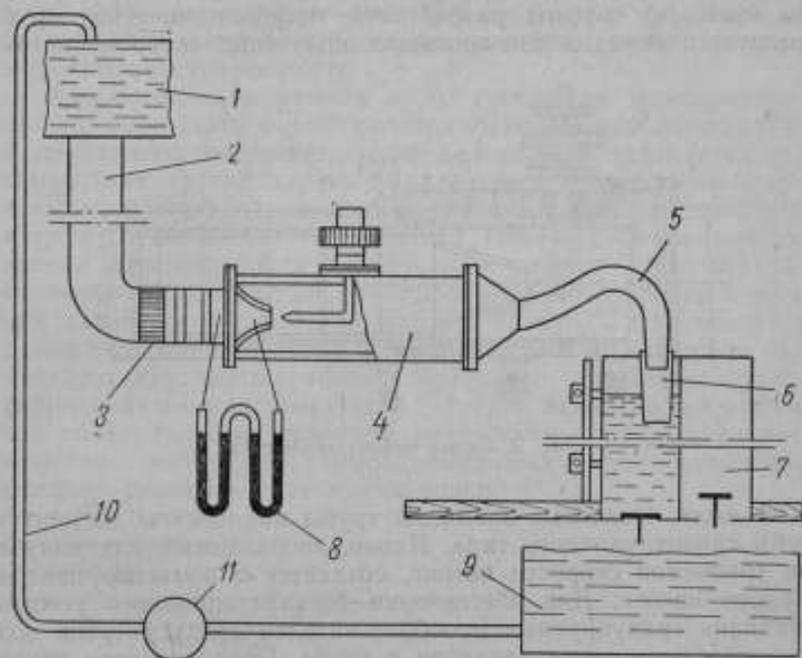


Рис. 1. Градуировочная установка гравитационного типа

Скорость потока в установке определяют по объемному расходу с помощью мерного бака. Мерный бак емкостью $0,13 \text{ м}^3$ снабжен водомерным стеклом с линейкой, цена деления которой соответствует объему $0,001 \text{ м}^3$. Время заполнения бака отсчитывают по электрическому секундомеру, запускаемому и останавливаемому по сигналам от двух фотоэлементов, перекрываемых поплавком, перемещающимся в водомерном стекле. В настоящее время заканчивается разработка электронно-числительной аппаратуры для автоматического отсчета скорости потока по цифровому табло. Из мерного бака через спускной клапан вода поступает в сливной бак, откуда насосом подается в напорный бак или сливается в лоуки.

Погрешность градуировки термоанемометрических измерительных преобразователей на установке гравитационного типа не превосходит 0,8% от значения средней скорости потока в диапазоне 0,5—10 м/сек. Измерения показали, что применением сменных сеток и сотовых выпрямителей удается регулировать интенсивность турбулентности на срезе конфузора в пределах 0,3—10%.

Для градуировки рабочих приборов методом сличения с показаниями образцового измерителя скорости (термоанемометра или напорной трубки) разработана гидродинамическая труба замкнутого типа, обеспечивающая получение скорости потока

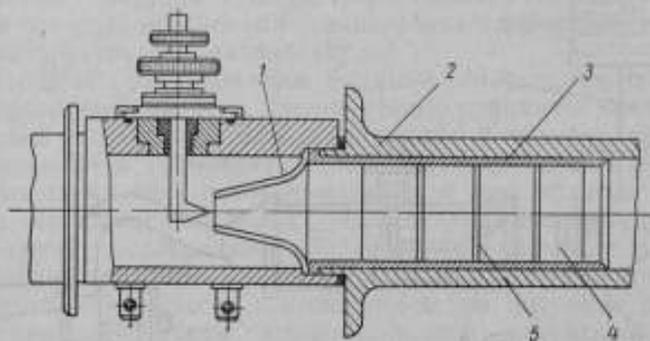


Рис. 2. Схема рабочего участка

1—20 м/сек. Основные элементы трубы аналогичны элементам трубы гравитационного типа. Напор, необходимый для получения требуемой скорости потока, создается с помощью центробежного насоса. Для обеспечения бескавитационного режима обтекания градуируемых преобразователей предусмотрена возможность повышения давления в трубе. Предусмотрена также возможность нагрева и охлаждения рабочей жидкости. Разработаны варианты рабочего участка с диаметром конфузора от 20 до 80 мм. Погрешность градуировки термоанемометров методом сличения в гидродинамической трубе замкнутого типа не превосходит 2—2,5% от значения средней скорости потока.

Во ВНИИМ создана также специальная гидродинамическая установка для исследования измерителей турбулентных пульсирующей скорости потоков в области инфранизких частот. Установка позволяет получить регулируемые по амплитуде, изменяющиеся по гармоническому закону пульсации скорости потока в диапазоне частот 0,1—20 гц. Разработана установка аналогичного назначения, обеспечивающая получение низкочастотных пульсаций температуры.

Разработаны методика и аппаратура для градуировки малоинерционных измерителей пульсаций температуры, в которой

использована в качестве реперной точки температура затвердевания галлия ($29,72 \pm 0,02^\circ \text{C}$).

При измерениях турбулентных пульсаций температуры в потоках жидкости характерен небольшой диапазон измеряемых средних значений температуры. При этом оказывается нецелесообразным градуировать контактные измерительные преобразователи, используя реперную точку кипения воды. Для многих малонерционных измерителей турбулентных пульсаций температуры даже кратковременный нагрев до температуры кипения воды приводит к увеличению нестабильности показаний. Использование точки затвердевания галлия позволило устранить этот источник погрешности.

К сожалению, в рамках этого сообщения невозможно подробно рассказать о всех работах ВНИИМ в области научной и прикладной метрологии турбулентности и связи этих работ с работами других научных коллективов. Метрологические работы в области гидродинамических измерений успешно выполняют и другие институты Комитета. Представляются, например, весьма интересными и актуальными работы ВНИИФТРИ по созданию бесконтактных методов измерений скорости и пульсаций характеристик потоков, работы ХГИМИП в области измерений пульсаций скорости и температуры и др. Взаимно дополняя друг друга, эти работы обогащают теорию и практику гидродинамических измерений. Можно выразить уверенность, что объединенными усилиями метрологов всех специальностей проблема метрологии гидродинамических измерений будет успешно решена в кратчайшие сроки.

Поступила в редакцию

21/XI 1969 г.

ЗАДАЧИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Стремление к созданию системы единиц, основанной на физических постоянных, и к нахождению способов их воспроизведения с помощью естественных эталонов заставляет метрологов обращаться к изучению процессов, представляющих собой акты электромагнитного излучения или сопутствующие им явления. Параметры светового излучения могут служить основой эталонов для воспроизведения единиц такой системы, причем эти параметры должны быть изучены при соответственно выбранных и регламентированных условиях возбуждения электромагнитных волн светового диапазона.

Основными параметрами светового излучения являются: мощность излучения, частота или длина волны, степень поляризации, направленность распространения излучения в пространстве, распределение мощности на плоскости или в объеме и, наконец, скорость распространения световых волн. Уже в настоящее время некоторые из этих параметров метрологи используют в качестве эталонов основных единиц системы СИ. Так, длина волны монохроматического излучения является эталоном, воспроизводящим единицу длины — метр; по мощности светового излучения определяют единицу силы света канделу (свечу).

Параметры, связанные с распространением световых волн в пространстве и характеризующие взаимодействие света с веществом, воспроизводят единицы измерения оптических характеристик среды — вращения плоскости поляризации, показателя преломления и т. д.

При формулировке задач метрологии в области оптики следует прежде всего рассматривать все параметры, характеризующие излучение в определенной взаимосвязи. Только совокупность трех элементов: источник — среда — приемник — может полностью охарактеризовать принцип действия любой измери-

тельной системы, основанной на использовании тех или иных параметров светового излучения. На рис. 1 схематично представлено взаимодействие этих трех элементов. Источник S характеризуется некоторым распределением (а) энергии по спектру $\Phi_S = \int_{\lambda_0}^{\lambda_R} f(\lambda) d\lambda$; среда M пропускает (б) определенную

полосу частот $\Phi_\tau = \int_{\lambda_0}^{\lambda_R} \tau(\lambda) d\lambda$ и, наконец, приемник R регистрирует (в) обычно лишь часть энергии по спектру в зависимости от его избирательной чувствительности $\Phi_e = \int_{\lambda_0}^{\lambda_R} v(\lambda) d\lambda$. Результирующее действие системы описывается некоторой функцией

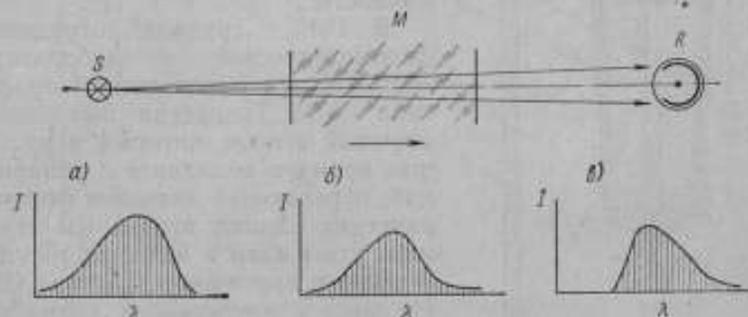


Рис. 1. Схема взаимодействия источника, среды и приемника:

а — схематическое распределение энергии излучения источника; б — характеристика пропускания излучения средой; в — избирательная чувствительность приемника

$I = f(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot v(\lambda)$, являющейся произведением всех трех функций.

Таким образом, мощность излучения, длина волны или частота излучения, направленность излучения и степень поляризации являются параметрами, характеризующими источник. Взаимодействие среды со светом определяется оптическими свойствами среды: рефракцией, способностью изменять направление плоскости поляризации, двойным лучепреломлением, способностью поглощать или отражать свет. Параметрами приемника являются его интегральная и спектральная чувствительность.

Измерения, связанные с мощностью и направленностью излучения, отражательной и поглощательной способностью среды, изучение параметров термо- или фотоприемников обычно относятся к области фотометрии.

Измерение длины волны монохроматического излучения, показателя преломления, угла вращения плоскости поляризации,

двойного лучепреломления и трансформирующих характеристик оптических каналов связи (оптических систем), а также изучение свойств фотографических материалов как приемников самого излучения или его распределения в пространстве относится к области оптических измерений.

В настоящее время в соответствии с принятой международной рекомендацией единица силы света — кандела воспроизводится с помощью первичного светового эталона, представляющего собой полный излучатель

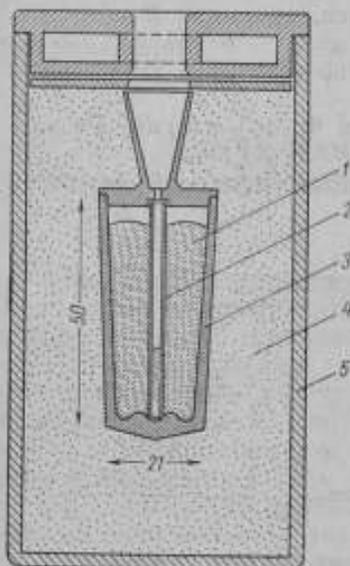


Рис. 2. Схема полного излучателя первичного светового эталона:

1 — платина; 2 — трубочка из плавленной окиси тория (диаметр: внутренний 2,5 мм, наружный 3,5 мм); 3 — сосуд из плавленной окиси тория; 4 — засыпка из окиси тория; 5 — кварцевый сосуд

при температуре затвердевания платины. Однако область световых измерений определяется лишь той частью излучения, которая ограничивается участком спектра, соответствующим так называемой кривой видности.

В 1949 г. группой сотрудников фотометрической лаборатории ВНИИМ под руководством профессора П. М. Тиходеева был создан световой эталон, который в настоящее время в комплекте с аппаратурой, передающей значение фотометрических единиц вторичным эталонам, утвержден в качестве государственного первичного эталона СССР. На рис. 2 представлен схематический чертеж полного излучателя — основной части этого эталона.

Переход к полному излучателю от группы ламп накаливания, как значительно более совершенному и приближающемуся к воспроизводимому физическому процессу, к сожалению, не дал сразу ожидаемого повышения точности. Потребовались

очень большие работы по исследованию и усовершенствованию всей системы воспроизведения и передачи размера канделы от эталона к рабочим мерам. Погрешность воспроизведения яркости полного излучателя в каждой национальной метрологической лаборатории, так же как и во ВНИИМ, оценивается в $\pm 1\%$, а совпадение данных восьми лабораторий лежит в пределах $\pm 1,3\%$. Таким образом, для дальнейшего повышения точности воспроизведения фотометрических единиц через полный излучатель необходимы работы по его усовершенствованию. В своем последнем решении Консультативный комитет по фотометрии рекомендует провести строгую унификацию сосудов с платиной и полости черного тела. Однако дальнейшее усовер-

шенствованию этого эталона вряд ли может привести к существенному повышению точности, так как неопределенность эффективного спектрального интервала и неопределенности, связанные с температурным полем излучателя, трудно поддаются учету.

Более перспективно отыскание нового метода воспроизведения световых единиц. На рис. 3 представлены два способа воспроизведения фотометрических единиц. В основу применяемого в настоящее время первого способа (а) положен источник, излучения которого фильтр вырезает участок, соответствующий

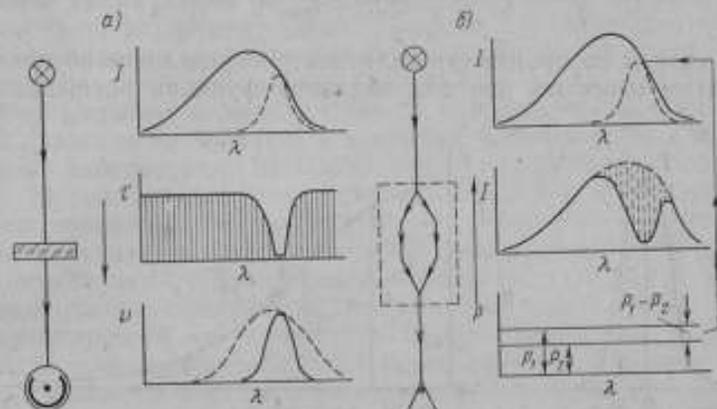


Рис. 3. Схемы воспроизведения фотометрических единиц:
а — первый; б — второй способы

кривой видности v_λ , и приемник регистрирует часть энергии. Во втором способе (б) с помощью неизбирательного приемника с известной интегральной чувствительностью регистрируется разность $P_1 - P_2$ двух значений поглощенной доли мощности излучателя. Первое значение P_1 соответствует полному излучателю, а второе P_2 — той его части, которая остается за вычетом мощности, ограниченной участком спектра, определяемым кривой видности. Этот процесс вычитания может быть осуществлен строго регламентированным «отбирающим» устройством принципиально с любой степенью приближения к заданной характеристике спектрального распределения. Таким образом,

$$F = k_m \int P_\lambda v_\lambda d\lambda,$$

где F — определяет световые величины,

P_λ — энергетические величины,

k_m — световой эквивалент лучистой мощности.

Один из способов этого «отбора» может быть осуществлен с помощью фильтра или устройства, работающего на

принципе Фурье преобразования заданного спектрального распределения.

Пусть необходимо воспроизвести распределение световой энергии $I(\omega) = \exp(-a^2\omega^2)$ источника S в интервале частот от $-\omega$ до $+\omega$ (рис. 4а), соответствующее гауссовскому контуру. Воспользовавшись двухлучевым интерферометром, можно выделить составляющие излучения, соответствующие определенной амплитуде и разности фаз интерферирующих пучков, по видимости интерференции, равной

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

и тем самым воспроизвести заданное распределение по спектру. При этом известно, что для заданной функции распределения

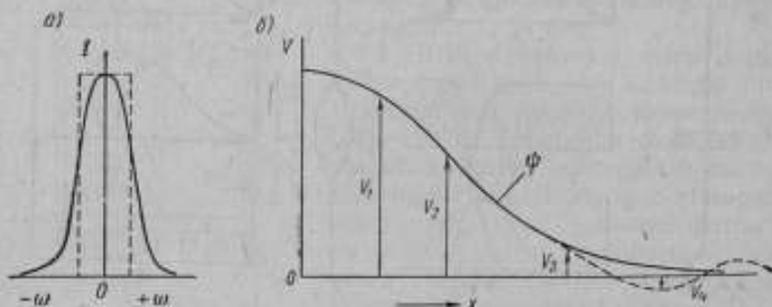


Рис. 4. Схематическое изображение исходного (а) распределения энергии методом Фурье-преобразования (б)

энергии по спектру огибающая максимумов видимости интерференции ψ выражается зависимостью $\frac{\sin 2\pi \Delta\omega_0\tau}{2\pi \Delta\omega_0\tau}$. Подобный метод, может быть, окажется более прогрессивным и при воспроизведении фотометрических единиц.

Введение двухлучевого интерферометра может в значительной степени уточнить воспроизведения формы участка кривой видности или вообще любого другого участка спектра. Таким образом, большой проблемой в области фотометрии является создание неселективных приемников и точных систем отбора спектральной области излучения, определенной заданными параметрами.

Переход к эталонному приемнику даст возможность осуществить единство энергетических и световых измерений. Решение этой задачи особенно важно в связи с появлением новых источников света сложного спектрального состава, расширением оптического диапазона спектра, необходимостью измерений мощности лучистой энергии за пределами видимой области.

Развитие энергетической фотометрии является самой актуальной задачей современности. Следует подчеркнуть, что переход к воспроизведению фотометрических единиц с помощью эталонного приемника потребует исключительно тонких, трудоемких экспериментальных исследований, так как придется решать задачи регистрации как очень малых потоков излучения, так и, наоборот, очень больших лучистых мощностей при самых различных режимах излучения.

Вторым параметром, характеризующим излучение, является частота или длина световой волны λ . Хорошо известно, что в настоящее время длина световой волны излучения атома изотопа криптона-86 определяет единицу длины и в спектрометрии является эталоном длин световых волн. Длина световой волны оранжевой линии криптона-86, излучаемой в строго регламентированных условиях в соответствии с международной спецификацией, фактически является и эталоном единицы длины. В оптической лаборатории ВНИИМ под руководством профессора В. Е. Мурашкинского были начаты, а затем блестяще закончены под руководством профессора М. Ф. Романовой основные работы по созданию интерферометрических методов и аппаратуры для обеспечения перехода на «световой метр» в СССР. В первичный государственный эталон единицы длины входит лампа с криптоном-86 и спектроинтерферометрическая установка (рис. 5) для исследования излучения лампы и передачи значения эталона вторичным эталонным световым волнам спектров криптона-86, кадмия-114 и ртути-198. В спектрометрии выбраны и установлены значения первичной и вторичных длин световых волн в видимой области спектра. Исключительно важной задачей является осуществление передачи этих значений в другие спектральные диапазоны. Для этого необходимо выбрать и установить вторичные эталонные длины волн в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра. Решение этой задачи оптических измерений является основой для составления новых таблиц длин волн для систематики и расшифровки спектров, привязанных к новому первичному эталону. Выбор и установление вторичных эталонных световых волн связано в эмиссионной спектроскопии с работами по созданию источников монохроматического света, излучающих эти длины волн, и в абсорбционной спектроскопии — с работами по созданию методов воспроизведения волновых чисел полос поглощения.

Большой проблемой в настоящее время является разработка методов и аппаратуры для измерения длин волн, излучаемых оптическими квантовыми генераторами. В применении калиброванного по длинам волн излучения оптического квантового генератора заложена идея повышения точности измерения больших длин волн и, возможно, дальнейшего усовершенствования эталона длины.

В связи с развитием отечественного спектрального приборостроения встал вопрос о контроле выпускаемой аппаратуры, для чего необходимо разработать методы и создать средства проверки и градуировки этой аппаратуры.

Взаимодействие света и вещества дает возможность, в частности, по вращению плоскости поляризации определять свойства вещества и его состав. Величина угла вращения плоскости поляризации определяет концентрацию растворов оптически

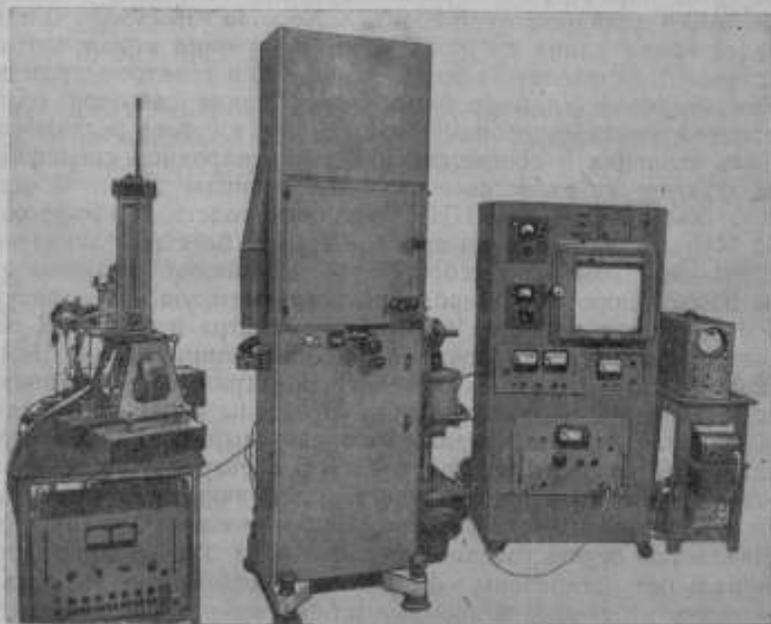


Рис. 5. Первичный государственный эталон единицы длины — спектроинтерферометрическая установка

активных тел. Создание образцовых мер этого угла и разработка методов их аттестации являются задачами метрологии в этой области.

В настоящее время создан объективный поляриметр (рис. 6), позволяющий измерять угол вращения плоскости поляризации эталонных мер вращения (кварцевых пластинок) с погрешностью, не превышающей тысячных долей градуса. Объективный поляриметр высокой точности позволяет осуществить единство измерений в этой области, разработать и внедрить поверочную схему в области поляриметрии.

Большое развитие органической химии, необходимость не только анализа, но и синтеза органических веществ, требует

изучения их структуры. Одним из методов определения ее является точное измерение вращательной дисперсии, особенно в ультрафиолетовой области спектра, для чего отечественная промышленность начала выпускать спектрополяриметры. Погрешности их ведут к ошибкам в технологии изготовления синтетических соединений и, следовательно, к браку продукции. Отсюда вытекает необходимость разработки методов и средств контроля спектрополяриметров.

Широко внедрены в химической промышленности и рефрактометрические методы исследования твердых, жидких и газообразных тел. Осуществление единства измерений в области

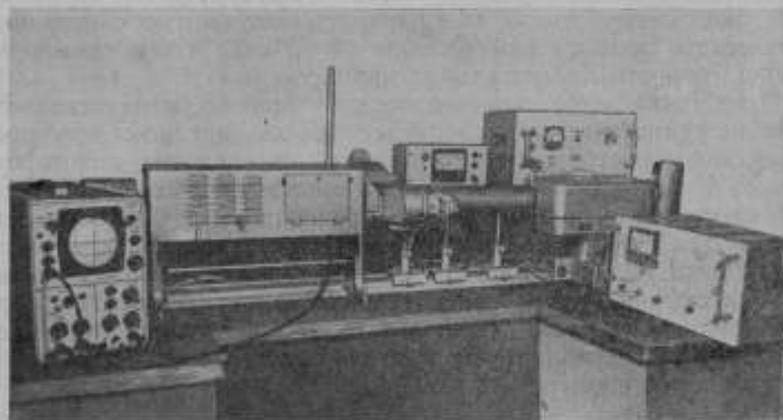


Рис. 6. Общий вид объективного поляриметра

рефрактометрии, создание соответствующих эталонов, образцовой рефрактометрической аппаратуры и средств поверки промышленных рефрактометров является ближайшей задачей современной метрологии.

Параметры любого оптического прибора характеризуют степень трансформации посредством его оптической системы истинного распределения освещенности в пространстве предметов в пространство изображения. От степени совпадения истинного распределения в пространстве предметов с распределением их в пространстве изображений и зависит точность и достоверность показаний оптических и измерительных приборов. Характер трансформации предмета и его изображения с помощью оптической системы зависит от многих параметров последней: апертуры, линейного или углового увеличения, угла поля зрения, оптической силы, светопропускания. Подобие изображения объекту зависит от разрешающей способности системы, ее частотно-контрастных характеристик, передаточных функций

и т. п. Для контроля некоторых указанных характеристик и параметров имеется аппаратура, но большинство из них не контролируют или определяют различными кустарными методами. Стандартные методы контроля характеристик оптических систем позволят единообразно и правильно подойти к оценке качества оптического изображения, получаемого тем или другим прибором.

В соответствии с классической теорией разрешающую способность данной оптической системы ограничивают явления дифракции. Однако в настоящее время появились новые возможности повышения разрешающей способности оптической системы выше существующего теоретического предела. Применение таких систем позволит расширить получаемую с помощью оптического прибора информацию об объекте и тем самым повысить точность измерительных приборов.

Представим себе, что оптическая система измерительного прибора трансформирует распределение элементов исследуемого объекта в пространство изображений в пределах некоторого объема V (рис. 7). Однако действительное определение координат элементов ограничивается разрешающей способностью системы. Для каждой конкретной системы область, определяемая величинами $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ (рис. 7), недоступна для исследования, так как дифракционные явления не позволяют различить внутри этой области детали объекта. Таким образом, общий объем информации, передаваемой системой, составит в области V , определяемой размерами L_x, L_y, L_z :

$$\frac{L_x}{\delta_x} \cdot \frac{L_y}{\delta_y} \cdot \frac{L_z}{\delta_z}.$$

Величины δ_x и δ_y в плоскости x, y определяются известными формулами, если пользоваться критерием Рэлея $\varepsilon = \frac{0,66\lambda}{A}$ — для микроскопических и $\rho = \frac{1,22\lambda}{D}$ — для телескопических систем.

Применение принципа частотной и фазовой модуляции светового сигнала, определяемого распределением освещенности в плоскости объекта, позволит значительно превзойти классические пределы разрешения.

Введение специальных дисперсионных элементов в осветительной и приемной частях системы передачи изображения даст возможность использовать для формирования изображения дополнительные степени свободы волнового поля, связанные с дисперсионными элементами, и распределение освещенности в плоскости изображения станет отличным от дифракционного. Разрешающая способность системы в этом случае будет определяться разрешающей способностью введенных дисперсионных элементов. Тогда по сравнению с классическим разрешением, определяемым апертурой системы ε_x, ρ_x , равным области дисперсии $\Delta\lambda$

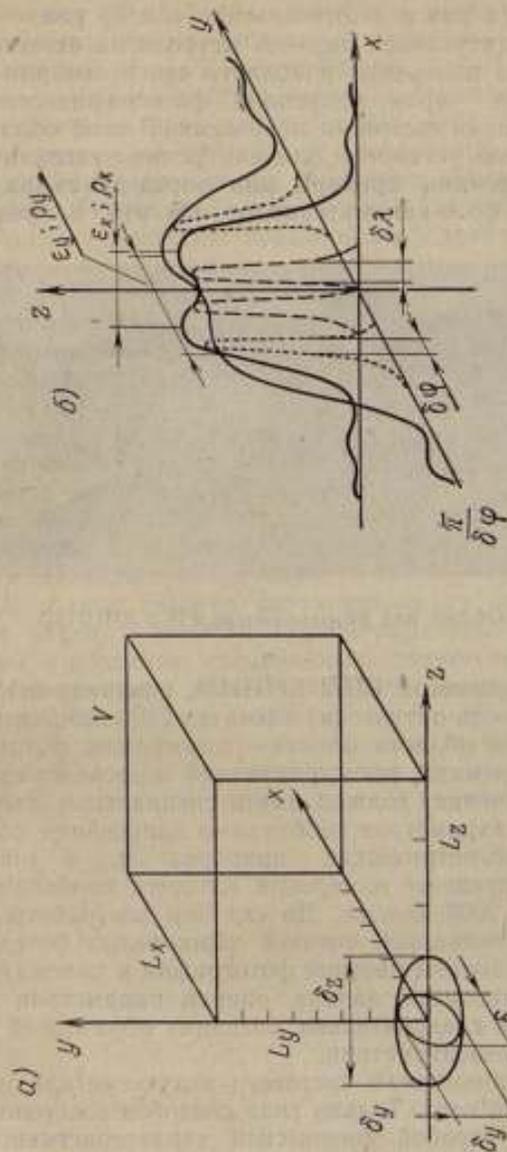


Рис. 7. Схема частотной и фазовой модуляции светового сигнала при формировании изображения:
 а — область действия оптического измерительного прибора; б — распределение освещенности в плоскости изображения объекта

(для частотной модуляции), и $\Delta\varphi$, равным максимальной разности фаз (для фазовой модуляции), разрешение системы, а следовательно, и объем информации, передаваемой системой, увеличится в $\Delta\lambda/\delta\lambda$ раз и соответственно в $\lambda/\delta\varphi$ раз.

По-прежнему актуальной задачей метрологии остается установление единства измерения в области сенситометрии — измерение параметров, характеризующих фотографические материалы как приемники светового излучения. В этой области уже созданы образцовые установки для измерения чувствительности фотослоев, разработаны приборы для определения разрешающей способности фото-киноматериалов. На рис. 8 представлен

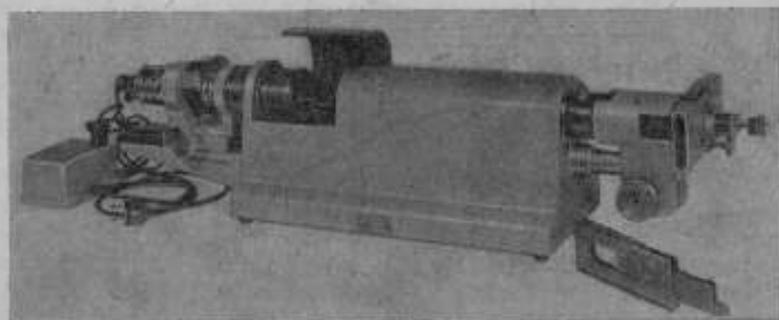


Рис. 8. Общий вид резольвометра РР-2 ВНИИМ.

общий вид резольвометра РР-2 ВНИИМ, оценивающего разрешающую способность оптических слоев до 1200 *лин/мм*. В связи с развитием новой области оптики — голографии фотографический слой как приемник, регистрирующий непосредственно волновой фронт излучения, должен иметь специальные параметры. Для оценки этих параметров необходимо дальнейшее совершенствование сенситометрических приборов и, в частности, резольвометров, пределы измерения которых необходимо расширить до 1700—2000 *лин/мм*. До сих пор все работы по сенситометрии ограничивались оценкой черно-белых фотоматериалов. В связи с развитием цветной фотографии и кинематографии обязательной становится задача оценки параметров цветных фотоматериалов, а следовательно, создания образцовой аппаратуры для спектросенситометрии.

К основным приемникам светового излучения следует отнести и человеческий глаз. Только глаз способен воспринять многообразные цвета — особой физической характеристики излучения, связанной с особенностями спектрального распределения в источниках или отражающих свет предметах. Вопросы оценки цветов включились в специальный раздел оптических измерений — колориметрию. Во ВНИИМ создана специальная си-

стема измерения цвета, основанная на спектрофотометрических исследованиях образцов цвета, послуживших основой равноступенного атласа цветов ВНИИМ на 450 образцов.

Дальнейшее обеспечение единства в измерении цвета, основанное на объективных физических методах оценки его, является ближайшей задачей колориметрии.

Глаз — не только простой приемник светового излучения, но в то же время он представляет собой уникальный оптический прибор, передающий точнейшую информацию в человеческий мозг. Всякий дефект зрения искажает поступающую в мозг информацию. Правильно подобранная коррекция исправляет дефекты зрения и создает нормальные условия работы. Однако осуществить эту коррекцию может только врач, располагая правильно показывающими приборами, определяющими дефекты зрения. Таким образом, и в физиологической оптике необходимо решение метрологической задачи: создание средств для проверки офтальмометрических приборов, контролирующих очковую оптику.

В соответствии с развитием этого направления во ВНИИМ разработан объективный диоптриметр, позволяющий измерять оптическую силу неастигматических очковых линз с точностью до нескольких сотых диоптрии, созданы средства для проверки промышленных диоптриметров. Однако это только начало решения поставленных выше задач.

В заключение следует остановиться на постановке общей для всех видов измерений задачи перехода к автоматизации измерений, к созданию специальных оптико-электронных систем с обратной связью, обеспечивающих автоматизацию измерений оптических и световых величин.

Поступила в редакцию

15/V 1969 г.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Механические измерения охватывают большое число физических величин. Главнейшие из них, обуславливающие единство измерений: длина, масса, время, частота, плотность, сила, давление, вязкость и расход.

Измерения времени и частоты в настоящее время представляют отдельную область метрологии и потому касаться их мы не будем. Измерения остальных упомянутых величин можно отнести к области классической метрологии, которая начала свое развитие много лет тому назад, а таких величин, как длина, сила и масса — в глубокой древности.

Однако начало развития научной метрологии как в нашей, так и в других странах относится примерно к моменту, 75-летний юбилей которого мы празднуем.

В то время Д. И. Менделеев организовал в Главной палате мер и весов первые научно-метрологические лаборатории и приобрел для них компаратор Траутона — Симмса, весы Рупрехта и весы Немеца, оригинальный барометр Менделеева и ряд других уникальных установок и устройств.

Первые работы Палаты состояли в возобновлении прототипов русских мер и установлении соотношений между русскими, английскими и метрическими мерами. Они были выполнены на очень высоком уровне: соотношение между фунтом и килограммом имело относительную погрешность порядка $6 \cdot 10^{-9}$, между аршином и метром — порядка $1,3 \cdot 10^{-7}$.

Д. И. Менделеев подготовил проект закона о мерах и весах (1899 г.), вводивший поверку мер и приборов длины, массы, плотности природы зерна, расхода и количества газов и жидкостей.

В начале 900-х годов механические измерения были сосредоточены в лабораториях: массы, плотности, длины, водо- и газомерной.

К моменту Великой Октябрьской социалистической революции в области механических измерений был выполнен ряд научных работ и накоплен опыт поверки.

В Главной палате мер и весов в 1922 г. был организован научно-метрологический институт. С этого момента начинает расширяться число научных лабораторий, растут штаты научного персонала и увеличиваются объемы выполняемых научных работ.

К 1930 г. механическими измерениями занимаются: три лаборатории по линейным измерениям (штриховых, концевых мер и оптическая), лаборатория мер массы, ареометрическая, манометрическая, аэрогидрометрическая, водогазомерная и механическая (силы и измерения твердости). С этого времени начинается интенсивное развитие советской метрологии и, в частности, в области механических измерений.

В наши дни содержание, объем и прикладное значение метрологических работ по механическим измерениям чрезвычайно возросли. Помимо лабораторий ВНИИМ, занимающихся механическими измерениями, родственные лаборатории находятся в других метрологических институтах Советского Союза.

Первые метрологические исследования, как упоминалось, относятся к периоду организации Главной палаты мер и весов и посвящены возобновлению прототипов. Затем Д. И. Менделеев выполнил фундаментальное исследование точных методов измерения массы. Результатом явился третий (после Гаусса и Борда) метод точного взвешивания, имеющий существенное значение для эталонных работ не только при измерениях массы. Кроме того, Менделеев дал анализ механических процессов, происходящих при колебаниях коромысла. Это исследование не потеряло значения и до настоящего времени.

Затем Дмитрий Иванович начал работу по определению значения ускорения силы тяжести, для чего построил «трубу» общей высотой 36 м, предполагая применить маятник длиной $l=30$ м. Эта работа не могла быть успешно доведена до конца, так как имевшиеся тогда средства измерения больших длин не позволяли достигнуть желаемой точности. Тем не менее работа имеет большое методологическое значение. Она показывает, как твердо придерживался Д. И. Менделеев одного из основных принципов метрологии: результат измерения надежен только в том случае, если он подтвержден измерениями разными методами, на разной аппаратуре, так чтобы систематические погрешности, обусловленные физическим подобием, были полностью устранены.

Нельзя обойти молчанием и работу Д. И. Менделеева по плотностям водноспиртовых растворов. Она была начата им в университете и представляет блестящий пример выполнения чисто метрологической работы в неметрологическом учреждении. Приятно напомнить, что именно за эту работу, сохраняющую

значение и до наших дней, Дмитрий Иванович получил степень доктора. Таблицы Менделеева по плотностям водноспиртовых растворов были дополнительно математически обработаны проф. Б. М. Кояловичем (в начале 30-х годов) и стали первыми советскими официальными алкоголометрическими таблицами.

Интересно упомянуть также о создании Д. И. Менделеевым оригинального барометра, пригодного для нивелирной съемки и в качестве депримометра для вентиляционных съемок в шахте. За этот прибор Главный Штаб наградил Дмитрия Ивановича золотой медалью.

Из числа других работ в области механических измерений досоветского периода можно сказать о работах по созданию образцовой аппаратуры для измерения длины, массы, давления, а также расходов и количеств газов и жидкостей. Эти работы выполнены сотрудниками Менделеева профессорами А. Н. Доброхотовым, Ф. И. Блумбахом, В. А. Мюллером, В. Е. Мурашкинским, И. Я. Кузнецовым, Ильиным, Д. В. Нестеровым и др.

Советский период характеризуется большой интенсивностью развития отечественной метрологии. Поэтому здесь целесообразно проследить развитие ее по отдельным областям измерений: длины, массы и т. д.

Измерения длины

Народнохозяйственное значение работ по измерению длины трудно переоценить. Они помогли развитию машиностроения, станкостроения, приборостроения и обусловили решение проблемы взаимозаменяемости.

В 1924 г. создается лаборатория калибров, послужившая образцом для подобных лабораторий в научных институтах и на предприятиях.

В этот период разработаны первые стандарты на концевые меры и калибры. Составлены первые официальные нормы для допусков и посадок, составлен сборник «Контроль средств измерений в машиностроении», который сохраняет значение и сейчас и по которому училось много поколений наших специалистов. Большой вклад в это дело внесли исследования проф. В. Г. Махровского.

Область линейных измерений была расширена и охватила вопросы измерений параметров сложных геометрических форм, в частности зубчатых передач, а также вопросы качества поверхности.

В 20-х годах советскими учеными (Л. В. Залуцкий, А. А. Лебедев, В. Е. Мурашкинский, М. Ф. Романова и др.) был поставлен вопрос о переходе на новый естественный эталон длины, основанный на атомных постоянных. Соответствующий доклад был одобрен комиссией АН СССР. Результатом работ по этой

проблеме явилось утверждение нового государственного эталона метра Комитетом стандартов, мер и измерительных приборов в 1968 г. Такие фундаментальные исследования, в результате которых созданы компаратор и интерферометры для измерения длины штриховых и концевых мер с погрешностями измерения, оцениваемыми сотыми долями микрометра, представляют лишь отдельные этапы общей проблемы перехода на новый эталон.

Погрешность измерения длины вторичных эталонов мы оцениваем сейчас величиной порядка $\pm(0,02+0,03L)$ мкм.

Итогом работ по измерениям длины являются: осуществление нового эталона, разработка рациональной поверочной схемы, создание образцовой аппаратуры, регламентация норм погрешностей, допусков и многое другое. Это позволяет передавать единицу длины от эталонов до технических измерений с погрешностью до $1 \cdot 10^{-7}$, что совершенно необходимо, например, в точном станкостроении.

При осуществлении эталонов, основанных на атомных постоянных, изменяется и метод обеспечения единства измерений. В практике наших работ оправдал себя метод сличения интерферометров. В 1967 г. успешно было проведено сличение, в котором приняли участие некоторые страны СЭВ. Следует ожидать расширения числа участников подобных международных сличений.

Новой проблемой в этой области является применение лазеров, которые в перспективе позволят уменьшить погрешность воспроизведения единицы длины до $1 \cdot 10^{-9}$. Существенное значение имеет повышение точности значения скорости света, что дало бы возможность для измерения длины применять эталоны частоты, имеющие погрешность $1 \cdot 10^{-11}$.

Автоматизация поверочных работ представляет вторую важную проблему. Наконец, автоматизация процессов измерений и, в особенности, процессов контроля размеров в поточных производствах, связанная с применением машинной вычислительной техники, является еще одной большой современной проблемой.

Измерения массы

Масса до последнего времени представляла собой наиболее точно измеряемую величину. Погрешность сличения с прототипом, являющимся международным эталоном, составляет от 1 до $2 \cdot 10^{-9}$. Точность этих измерений стоит сейчас на втором месте, на первом находится частота ($1 \cdot 10^{-11}$).

Высокая точность эталона и одновременно измерительных устройств, передающих единицу, обусловило сравнительно благоприятное положение этой области измерений. Принципиальных, особо острых и трудных проблем в ней пока не возникало. Тем не менее появился ряд существенных задач, успешно решенных.

Прежде всего следует указать на значительное расширение состава вторичных и третичных эталонов, что необходимо вследствие большого развития поверочных работ. Эти весьма тонкие и трудоемкие работы Г. Д. Кокоша, Н. М. Рудо, Н. А. Смирновой успешно завершены созданием новых эталонов, разработкой новой методики сличений, созданием отечественных эталонных весов высокой точности. Образцовыми весами и мерами массы новых типов оснащаются поверочные лаборатории. Существенно расширен и доведен до $1-1 \cdot 10^{-10}$ кг диапазон измерений микромасс.

Главной прикладной проблемой ближайшего будущего является расширение пределов измерения больших масс от 100 до десятков тысяч тонн.

Принципиальную метрологическую проблему представляет переход от искусственного эталона единицы массы к естественному. Однако в настоящее время как у нас, так и за рубежом намечаются лишь пути решения этой задачи.

Второй, также весьма трудной проблемой являются исследования, которые могли бы позволить уточнить значение гравитационной постоянной, данное опытами Кавендиша. Несмотря на большое развитие измерительной техники оно до сего времени не уточнено.

Измерения плотности

Измерение плотности в дореволюционное время производила лаборатория мер массы. Первой ее работой, как упоминалось, была таблица плотностей водноспиртовых растворов для температур до 30°C , выполненная Д. И. Менделеевым.

В 1919 г. И. Я. Кузнецов основал ареометрическую лабораторию. В конце 20-х годов созданы два первых набора эталонных ареометров и организована поверка ареометров в местных палатах мер и весов. Как указано выше, математическая обработка таблиц Д. И. Менделеева по плотностям водноспиртовых растворов, выполненная проф. Б. М. Каяловичем, позволила провести реформу алколометрии и составить первые официальные таблицы. Затем они были дополнены данными новых экспериментов в расширенном диапазоне температур (конец 40-х, начало 50-х годов). В конце 50-х годов П. А. Налимов дополнительно исследовал плотность водноспиртовых растворов и составил новые расширенные таблицы, действующие в настоящее время. Необходимо помнить, что фундаментальная часть их принадлежит Д. И. Менделееву.

В первые послевоенные годы под руководством проф. Н. С. Михельсона создан новый эталонный набор ареометров для всего диапазона жидкостей ($0,65-0,2 \text{ г/см}^3$).

В начале 60-х годов М. Д. Иппиц произвела исследования по точному определению плотности ртути — константы, имеющей

большое значение в метрологии. Позднее эту работу продолжили Л. Н. Кузьменков и Г. П. Коноплева.

Задачами ближайшего будущего является автоматизация измерения плотности, необходимая для многих технологических процессов. Кроме того, должен быть значительно расширен температурный диапазон этих измерений.

Начатые в 20-х годах в лаборатории нефтепродуктов под руководством И. И. Латкина работы по вискозиметрии относились сначала только к поверке вискозиметров Энглера. В 30-х годах исследования проф. А. Ф. Добрянского дали возможность в последующем отказаться от условной шкалы Энглера.

В послевоенный период выполнены фундаментальные исследования классических методов измерения вязкости (капиллярный, падение шарика, ротационный).

В 1952 г. создан первый эталонный набор вискозиметров из 9 приборов, дополненный в 1962 г. новыми приборами, что дало возможность охватить диапазон измерений $4 \cdot 10^{-4} - 4 \cdot 10^{-2}$ м²/сек ($4 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-1}$ ст). В последние годы создан новый усовершенствованный эталонный набор с верхним пределом $6 \cdot 10^{-2}$ м²/сек ($6 \cdot 10^2$ ст).

Большое значение имеют работы 60-х годов по созданию образцовой аппаратуры, которой оснащены ГКЛ, а также и стандартной технической. Эти работы обеспечили единство измерений вязкости в Советском Союзе.

Кроме того, большой цикл работ по определению констант вязкости различных жидкостей позволил создать набор градуировочных жидкостей.

Развитие производства синтетических жидкостей (часто полуфабрикатов) поставило большую и трудную проблему установления и измерения реологических характеристик не ньютоновых жидкостей, напряжения сдвига, модуля упругости, времени релаксации и др. В этом направлении лаборатория должна вести изыскания в ближайшем будущем.

Измерения давления

Первая лаборатория давления была организована в 1906 г. Ее образцовое оборудование составляли многоколенный ртутный манометр с верхним пределом измерений до 10 мкн/м² (100 ат), манометрические весы Штюкраты до 40 мкн/м² и установка до 400 мкн/м² Шефера и Буденберга. Лаборатория вела только поверочные работы. Затем начались работы по созданию отечественного образцового оборудования. Первый эталон был представлен ртутным барометром. Для передачи единицы служила группа грузопоршневых приборов.

Введение в 1925 г. обязательной поверки манометров самым эффективным образом стимулировало развитие работ в этой области. Под руководством А. М. Кремлева была создана вся первая

техническая документация, поверочные лаборатории получили необходимое образцовое оборудование, были подготовлены кадры поверителей. Число поверяемых манометров достигло к 1940 г. 800 000 приборов в год.

Лаборатория под руководством Д. В. Несговорова непрерывно совершенствовала образцовую аппаратуру. Эта аппаратура успешно применяется в настоящее время в лабораториях государственного надзора (ЛГН). Подобные работы в Московском институте велись под руководством М. К. Жоховского. В конце 30-х годов начала действовать первая поверочная схема, во главе которой стоял ртутный манометр до $0,15 \text{ мкн/м}^2$. Хорошо налаженное поверочное дело позволило сохранить единство измерений в трудные годы войны.

После войны лаборатория ведет исследования по переходу на новый эталон, созданный П. В. Индржком и представляющий группу из пяти грузопоршневых приборов до 60 ат. Средняя квадратическая погрешность его $6 \cdot 10^{-4}\%$. Одновременно создаются два эталонных ртутных барометра. Устройства этого типа были позднее созданы для лаборатории средних температур и для Главной геофизической обсерватории. В этот же период установлена реально обеспеченная поверочная схема в области измерений давления. Успеху этих работ способствовал труд М. К. Жоховского по теории приборов с неуплотненным поршнем.

В 50-е годы получили развитие работы по повышению верхнего предела измеряемых давлений. Во ВНИИМ и ВНИИФТРИ создаются установки до 1000 Мн/м^2 , затем до $1600, 2500 \text{ Мн/м}^2$ и, наконец, во ВНИИМ — до 3500 Мн/м^2 . Последняя основана на оригинальном принципе вибрирующего уплотненного поршня.

В настоящее время наша образцовая аппаратура по давлению занимает первое место в мире.

Ближайшими задачами лаборатории являются: создание эталонов трех рангов в связи с возросшим числом рабочих эталонов и, соответственно, создание нового первичного эталона; выполнение исследований по воспроизведению и измерению переменных давлений; создание образцовой аппаратуры по приборам абсолютного давления.

Большое значение имеют также работы ВНИИФТРИ по установлению зависимости между давлением и температурой фазовых переходов веществ, дающие относительно простой способ передачи единицы в область сверхвысоких давлений (свыше 4000 Мн/м^2).

Вакуумная лаборатория ВНИИМ относится к сравнительно молодым. Она организована в начале 50-х годов. За это время ею создана образцовая аппаратура, охватывающая диапазон малых абсолютных давлений $100 \div 10^{-9} \text{ н/м}^2$ ($1 \cdot 10^{-11} \text{ мм рт. ст.}$).

Созданный в лаборатории набор компресссионных манометров, представляющий верхнее звено поверочной схемы, отличается весьма высокими метрологическими характеристиками и

охватывает пределы $100-10^{-3}$ н/м² (10^{-3} мм рт. ст.). Такие наборы применяются в институтах АН СССР и в некоторых странах СЭВ. Набор образцовых электронноионизационных манометров передает единицу давления до 10^{-9} н/м².

Ближайшими задачами лаборатории является изыскание методов измерения до предела статистического равновесия (10^{-11} н/м²), а также методов расчета концентраций молекул ниже этого предела. Вторую проблему составляет измерение парциальных давлений высокоразреженных смесей газов.

Измерения силы и твердости

Лаборатория механических измерений организована в 1932 г. проф. В. П. Петровым. В ее задачи вошло поддержание единства измерений силы и твердости. В довоенное время поверочная работа в лаборатории проводилась на импортном образцовом оборудовании.

В послевоенный период лаборатория создает набор эталонных установок до 0,002; 0,05; 0,1 и 1 Мн. Следует отметить их высокие метрологические качества и особенно последней установки. Ее относительная погрешность имеет порядок $2 \cdot 10^{-5}$ и допускает любой закон нагружения и разгружения.

Цикл исследований, посвященный образцовым динамометрам, позволил создать приборы первого разряда с различными верхними пределами (до 1 Мн включительно), отличающиеся исключительно высокой стабильностью. Разработан проект образцовой машины до 30 Мн гидравлического типа и техническая документация, необходимая для поверочных работ.

В области измерений твердости создана эталонная установка для метода Бриелля и группы эталонных приборов по шкалам Виккерса и Роквелла. Созданы наборы образцовых мер твердости. Наши эталоны удовлетворяют требованиям высшего мирового уровня. По точности наши эталоны силы выше зарубежных, хотя уступают им по верхнему пределу измерений: у нас — 10^6 н, в США — $4,5 \cdot 10^6$.

Ближайшими задачами являются повышение верхних пределов эталона силы до 5 Мн, создание образцовой машины до 30 Мн и образцовых динамометров до 200 Мн, а также создание образцовой аппаратуры для измерения переменных сил.

По измерениям твердости перед нами стоят задачи обновления эталонов по стандартизованным шкалам, расширения диапазонов измерений в связи с применением твердых сплавов, а также выполнения исследований по установлению единого международного уровня шкал твердости.

В 1966 г. организована самая молодая в отделе лаборатория механических свойств полимеров. Ее работы, весьма осложняемые отсутствием надежных реологических моделей полимеров, направлены прежде всего на унификацию и, в конечном итоге,

на стандартизацию методов механических испытаний полимеров. Лабораторией достигнуты значительные успехи в деле разработки методики испытаний полимеров.

Измерения расходов жидкостей и газов

Водо-газомерная лаборатория организована в 1904 г. Д. И. Менделеевым и занималась только поверочными работами. В 30-х годах организована аэрометрическая лаборатория, позднее слившаяся с водомерной в аэрогидрометрическую.

В 30-х годах в ней велись работы по исследованию методов измерений скоростей, расходов и количеств газов и жидкостей. Были созданы образцовые водомерные и газомерные установки, аэродинамическая труба до 60 м/сек и ротативная машина для приборов, измеряющих малые скорости газа.

Профилизация работ расходомерных лабораторий определила направление работ ныне существующей газомерной лаборатории. В ее задачи входит измерение расходов и количеств газа, а также соответствующих перепадов давлений.

За последние годы исследования лаборатории позволили создать принципиально новые автоматизированные газомерные установки: одну на расходы до 150 и вторую — до 1500 м³/ч. Существенным достоинством этих установок является возможность сколь угодно длительного непрерывного течения газа, что создает исключительно благоприятные возможности для исследования приборов расхода. Разработан проект облегченной установки такого типа для оснащения ГКЛ.

Теоретически исследована проблема измерения и сглаживания пульсирующих расходов, что значительно повысило точность и надежность этих измерений. Исследован единственно возможный в некоторых случаях метод измерений пульсирующих расходов галлонными метками в потоке. Создана образцовая микроанометрическая аппаратура.

Ближайшими задачами лаборатории являются: разработка методов поверки расходомеров и создание соответствующей образцовой аппаратуры; разработка методов поэлементной безжидкостной поверки расходомеров соответствующих типов; исследование и составление нормативной документации для концентрационного метода измерений расхода, имеющего большое значение, в частности, для городских водопроводов; разработка методов поверки установок для измерения расходов жидкого металла.

Очередной задачей метрологии в области механических измерений является разработка методов измерений и контроля технологических процессов, так как они в значительной мере определяют оценку и повышение качества продукции, а также способствуют рационализации самих технологических процессов.

Поступила в редакцию

15/1 - 1969 г.

ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ

Применение современных методов и средств измерения параметров движения способствует техническому прогрессу в ряде областей науки и техники: в авиационно-космической технике при совершенствовании самолетов и ракет и повышении мощности их двигателей; в энергетике при создании турбин и электрических машин с высоким коэффициентом полезного действия и надежности; в судостроении при работах над снижением уровня вибраций и шума корабельных механизмов и в других отраслях народного хозяйства.

Если при нормальных скоростях неуравновешенность движущихся частей механизмов имеет допустимый уровень шума и вибраций, то с ростом скоростей они создают шум, превышающий санитарные нормы, а уровень вибраций приводит механизмы к быстрому износу или аварийному исходу. Исследование 100 серьезных аварий показало, что их источниками является усталость металла в жизненно важных узлах, вызванная вибрациями.

Особо пагубное воздействие вибрация и удар оказывают на организм человека, вызывая расстройство нервной и сердечно-сосудистой систем. Появилось новое заболевание — вибрационная болезнь.

По устойчивости к вибрационным, ударным и транспортным воздействиям сложные агрегаты и средства измерений в большинстве случаев не поддаются аналитическому расчету, поэтому частоты их собственных колебаний, вибро- и ударопрочность выявляются экспериментально.

Опыт показывает, что снижение динамического уровня вибраций механизмов в два раза обеспечивает повышение

коэффициента полезного действия и долговечности их в четыре раза.

В промышленности создаются испытательные комплексы, оснащенные мощными стендами, динамические уровни которых превышают уровни эксплуатационных нагрузок. Поэтому перед отраслевой метрологией поставлена ответственная задача — обеспечить измерения параметров механических движений. Для решения этой задачи требуется разработать образцовые средства измерения, с помощью которых воспроизводят и измеряют параметры движений. Далее необходимо расширить динамические диапазоны и повысить точность исходных образцовых средств, затем — построить поверочную схему и разработать нормативную документацию для поверки рабочих приборов и уточнить терминологию.

Измерение постоянных и медленно меняющихся параметров движения

Отличительной особенностью этой области измерения являются высокие требования, предъявляемые к точности воспроизведения или измерения параметра. Как правило, погрешности измерения должны быть здесь на один — два, а иногда и на три порядка ниже, чем при измерении параметров вибрации и удара.

Другая отличительная особенность, являющаяся естественным следствием первой, — необходимость во многих случаях измерять «мгновенное» значение параметров, т. е. осуществлять процесс измерения за возможно короткий промежуток времени, определяемый свойствами исследуемой аппаратуры.

Необходимость сочетания высокой точности и быстродействия наложила отпечаток как на характер устройств для задания параметров, так и на используемые и разрабатываемые измерительные средства. В устройствах для задания параметров наиболее широко используют различные ротационные системы, прошедшие длительный путь технического развития и обладающие высокими точностными характеристиками. В измерительных средствах приоритет принадлежит высокоточным оптическим устройствам, имеющим высокую разрешающую способность и быстродействие.

Во ВНИИМ основные работы в области измерения постоянных и медленно меняющихся параметров движения велись или ведутся по следующим направлениям:

- 1) измерение постоянных угловых скоростей вращения;
- 2) измерение постоянных и медленно меняющихся (низкочастотных) линейных ускорений;
- 3) измерение постоянных и медленно меняющихся (низкочастотных) угловых ускорений.

Измерение постоянных угловых скоростей вращения

Точное измерение этого параметра движения приобретает особую важность в связи с тем, что, как уже было отмечено, при воспроизведении разных параметров стремятся максимально использовать ротационные системы. Поэтому работы по созданию образцовых тахометрических установок явились одними из первых в этой области.

Разработана серия таких универсальных установок типов ТХ-1-60, ОТХ-2-60, ОТХ-3-150, а также специализированные установки типов СТХ-90, УС-1, УС-3. Первая из созданных установок ТХ-1-60 имеет пределы измерения от 5 до 60 000 об/мин, ее погрешность не превышает $\pm 0,1\%$ от измеряемой величины. Воспроизводимые угловые скорости измеряют стробоскопическим методом. Последующие установки, ОТХ-2-60 и ОТХ-3-150, имели пределы измерения 5—60 000 и 5—150 000 об/мин. Погрешность установок не превышает $\pm 0,01\%$ от измеряемой скорости. Значение угловой скорости в них воспроизводят с помощью синхронизированного привода, причем момент синхронизации контролируют стробоскопическим методом. В 1960 г. группа этих установок была отмечена золотой медалью ВДНХ.

Из специализированных установок наибольший интерес представляет установка типа УС-3. Ее диапазон сравнительно невелик (50—10 000 об/мин), однако погрешность ее не превышает $\pm 0,005\%$ от измеряемой величины. Воспроизводимое установкой значение скорости определяется значением частоты генератора образцовых частот (ГОЧ), синхронизированным частотой пьезокварцевого генератора.

В области измерения малых угловых скоростей на основе использования системы оптических дифракционных решеток была создана установка с пределами измерений ($5 \cdot 10^{-4}$ — $2,5 \cdot 10^{-1}$) град/сек. Ее погрешность не превышает 0,1—1% и определяется временем измерения.

Результатом проведенного комплекса работ явилась разработка поверочной схемы для тахометров и спидометров, основываясь на которой ГКЛ страны, оснащенные тахометрическими установками, осуществляют поверку и аттестацию рабочих приборов.

Измерение постоянных и медленно меняющихся (низкочастотных) линейных ускорений

В области измерения постоянных ускорений основное внимание обращено на исследование двух основных методов воспроизведения ускорения: поворотной платформы и ротационной платформы (центрифуги). Метод поворотной платформы (для ускорений меньше 1 g) заключается в повороте оси чувствительности поверяемого прибора на точно известный угол относительно вертикали. Тогда по этой оси действует ускорение,

однозначно определяемое этим углом и ускорением силы тяжести. В качестве средства воспроизведения ускорения широко применяют различные точные поворотные устройства (оптические делительные головки и др.). Использование метода центрифуги позволяет воспроизводить ускорения, превышающие ускорение силы тяжести. В этом случае воспроизводимое центростремительное ускорение определяется угловой скоростью вращения платформы и расстоянием от оси вращения до точки приложения ускорения.

Для создания значительных амплитуд ускорений в диапазоне частот 0,01—30 гц найдет применение двойная центрифуга, состоящая из двух ротационных платформ с параллельными осями вращения, причем одна из платформ установлена на другой. Амплитуда воспроизводимого ускорения определяется угловой скоростью одной платформы и расстоянием между осями платформ, а частота — угловой скоростью второй платформы.

Измерение постоянных и медленно меняющихся (низкочастотных) угловых ускорений

Постоянные и низкочастотные ускорения воспроизводят с помощью ротационных систем во всем диапазоне угловых ускорений. Для воспроизведения постоянных угловых ускорений используют равноускоренные или равнозамедленные электрические приводы.

При воспроизведении низкочастотных угловых ускорений с целью получения достаточных амплитуд ускорения практически возможно применить лишь систему, состоящую из двух платформ, со взаимно перпендикулярными осями поворота, вращающихся с постоянной скоростью.

Оценивая перспективы развития работ в области измерения постоянных и медленно меняющихся параметров движения, следует отметить три направления, которые, по нашему мнению, позволят решить эту задачу:

1. Воспроизведение необходимого параметра с помощью систем воздушного и гидравлического подвеса при полном отказе от редукторов, кулис, кривошипно-шатунных механизмов, а также от шариковых, роликовых подшипников и подшипников качения.

2. Измерение параметров движения путем максимального использования оптических квантовых генераторов, работающих в качестве преобразователя измеряемого параметра в частоту электрических сигналов.

3. Применение при обработке результатов измерения непосредственно или через промежуточную память ЭВМ с дальнейшей обработкой результатов измерения по заданной программе.

Измерение параметров вибрации

В основу разработки образцовых вибрационных установок положены абсолютные методы измерения. Пределы измерений и допустимые погрешности этих установок обусловлены методами измерения и воспроизведения параметров вибраций. К вибраторам образцовых колебаний предъявлены повышенные требования по синусоидальности и однокомпонентности движения. От внешних помех установки защищают виброзащитными фундаментами.

Вибраторы типа ОИВУ-2, ОВУ-1, В150, В1000 работают на электродинамическом принципе, ВОК-50К — на пьезоэлектрическом, В-50, камертоны и резонансные системы — на механическом.

Инфразвуковая установка ОИВУ-2 в диапазоне частот 0,1—100 гц, с двойной амплитудой 1—10⁴ мкм позволяет создавать ускорение 2·10⁻⁴—10 м/сек².

Установка ОВУ-1 звукового диапазона 25—10 000 гц, с размахом 1—10³ мкм, развивает ускорение от 10 до 250 м/сек². Установка В150 работает в сравнительно узком диапазоне частот 700—3000 гц и развивает ускорение до 750 м/сек².

Установка В1000 предназначена для интерференционного измерения амплитуд перемещения, частота собственных колебаний ее стержня составляет 1000 гц. Амплитуда перемещения 0,1—20 мкм. Допустимые ускорения — от 10 до 200 м/сек².

Установка ВОК-50К предназначена для создания и измерения вибраций в ультразвуковом диапазоне частот 0,5—50 кгц и состоит из набора пьезовибраторов и измерительного комплекта. Амплитуды перемещения 0,001—0,1 мкм, ускорения — от 10 до 2500 м/сек². В эту же группу входят изготовленные из кварца резонансные вибраторы на частоты 40 и 50 кгц. Амплитуду перемещения измеряют интерференционным методом и методом резонансного поглощения гамма-квантов (эффект Мёсбауэра).

Погрешность измерения параметров вибраций зависит от погрешностей воспроизведения и измерения частоты и амплитуды механических колебаний. Генераторы задают частоту механическим вибраторам в диапазоне 0,01—100 кгц с относительной погрешностью 2—1·10⁻⁴%. Приборы для измерения частоты обеспечивают еще меньшую погрешность измерения основной частоты. Однако амплитуду гармоник и субгармоник высших порядков вибраторов и контрольных вибропреобразователей измеряют с большой погрешностью, что существенно снижает точность измерения параметров вибраций. Кроме того, контрольный акселерометр из-за нестабильности пьезокерамики уменьшает со временем свою чувствительность. Поэтому контрольные измерения амплитуд перемещений виброплатформы осуществляют оптическими устройствами с микроскопом и

интерферометром. Линейные перемещения 10—1000 мкм, измеряемые микроскопом, имеют погрешность $\pm 1-2$ мкм. Относительно большие амплитуды в диапазоне от $1 \cdot 10^2$ до $1 \cdot 10^4$ мкм измеряют оптическими устройствами с погрешностью ± 10 мкм.

Различные модификации интерференционных методов позволяют измерять малые амплитуды перемещения. Сочетание высоких точностей этих методов измерения с большой разрешающей способностью фотоумножителей обеспечивает высокую точность измерения амплитуд в диапазоне от 0,001 до 120 мкм.

Для измерения малых амплитуд перемещения в звуковом и ультразвуковом диапазонах частот разработан метод резонансного поглощения гамма-квантов без отдачи (эффект Мёссбауэра). Этот метод особенно эффективен для измерения параметров вибраций легких тел, когда на вибрирующую поверхность не может быть прикреплен груз-преобразователь, а также для измерений на расстоянии, когда доступ к вибрирующей поверхности затруднен.

Согласно этому методу на подвижной поверхности вибратора укреплен источник гамма-излучений, который перемещается с вибрационной скоростью относительно неподвижного поглотителя. За счет эффекта Доплера изменяется частота, а соответственно и энергия испускания гамма-квантов. Уже при скоростях 0,01—1 см/сек для многих ядер изменение энергии кванта превышает естественную ширину линии, и эффект резонансного поглощения исчезает. Таких скоростей достигают на частоте 10 кгц при амплитудах перемещений порядка 0,01 мкм.

Эффект резонансного поглощения ε в зависимости от амплитуды виброскорости определяют из выражения

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{1 + \Delta^2}},$$

где ε_0 — максимальное значение эффекта;

A — амплитуда;

ω — частота;

$$\Delta = \frac{A\omega E_r}{c(\Gamma_s + \Gamma_a)};$$

E_r — энергия резонансного уровня;

c — скорость света;

Γ_s и Γ_a — ширина линий испускания и поглощения источника и поглотителя.

Источником гамма-излучения служит изотоп ^{119m}Sn , полученный облучением на реакторе олова, обогащенного до 96% изотопом ^{118}Sn . Ядро олова выбрано потому, что при комнатной температуре эффект резонансного поглощения в нем достигает 25—30%, энергия гамма-квантов 23,8 кэв удобна для регистрации сцинтилляционным счетчиком, период полураспада 250 дней.

Радиоактивную двуокись олова наносят на переходник плотностью 10 мг/см^2 . При ускорении до 3000 м/сек^2 механическая прочность источника не нарушается. Для уменьшения фона от рентгеновского излучения олова с энергией $24,7 \text{ кэв}$ применяют палладиевый фильтр толщиной $0,3 \text{ мм}$. Активность источника не превышает 2 мкюри . При столь незначительном фоне специальных мер защиты не требуется.

Поглотителем служит двуокись олова с поверхностной плотностью 40 мг/см^2 . Детектором гамма-излучений является ФЭУ-35 с кристаллом NaI(Tl) толщиной $0,5 \text{ мм}$. Импульсы с фотоумножителя поступают через усилитель на одноканальный анализатор АДД-1. Импульсы регистрируют пересчетным прибором ПС-1 и контрольным прибором ПП-12. Установка запускается от источника эталонной частоты 1000 гц через пересчетный прибор ПС-100, что позволяет фиксировать время измерений с погрешностью $1 \cdot 10^{-4} \text{ сек}$.

Блок автоматики задает программу и регистрирует результаты измерений на цифропечатающей машинке ЭУМ-23.

Градуируют рабочую пару «источник — поглотитель» на инфразвуковой установке ОИВУ-2 в диапазоне частот $0,1\text{—}2 \text{ гц}$. Двойную амплитуду в пределах $100\text{—}1000 \text{ мкм}$ измеряют с погрешностью $1\text{—}0,2 \text{ мкм}$. Эффект резонансного поглощения определяют по формуле

$$\varepsilon = \left[1 - \frac{N}{N_0} (1 - \varepsilon_0) \right] \cdot 100\%,$$

где N и N_0 — скорость счета при определенной амплитуде вибрации и при отсутствии вибрации соответственно;
 $\varepsilon_0 = 23,8 \pm 1 \%$.

При сличении результатов измерений на пьезовибраторе двумя независимыми методами результаты пяти серий измерений в пределах статистических погрешностей совпали. Одновременно с измерением эффекта резонансного поглощения измеряли напряжение на контрольном акселерометре. Так, на частоте собственных колебаний $13\,328 \text{ гц}$ при ускорении от 10 до 3000 м/сек^2 предположение о линейной зависимости напряжения на вибропреобразователе от амплитуды выполнялось с погрешностью $\pm 10\%$. Метод резонансного поглощения перспективен при точных измерениях параметров вибраций не только в образцовых, но и в промышленных установках.

В области измерения угловых вибраций В. П. Шумилин создал установку для воспроизведения торсионных колебаний при неподвижном и вращающемся вале в диапазоне частот $5\text{—}200 \text{ гц}$ с амплитудой углового перемещения $2,5 \cdot 10^{-4}\text{—}2,5 \cdot 10^{-2} \text{ рад}$ и угловых ускорений $20\text{—}314 \text{ рад} \cdot \text{сек}^{-1}$.

Во ВНИИГК П. И. Агаецкий разработал переносную аппаратуру ПОВ-1 на диапазон частот $10\text{—}5000 \text{ гц}$ для измерения действующих значений ускорений $0,5\text{—}100 \text{ м/сек}^2$ с погрешностью

$\pm 5\%$. В лаборатории, руководимой А. М. Кипнисом, ведутся работы по испытанию виброизмерительных приборов.

Во ВНИИНМАШ под руководством Н. И. Бунина разрабатываются нормы, правила и требования к средствам защиты от вибраций и шума для сельскохозяйственных машин, тракторов, транспорта и механизированного инструмента.

В Тбилисском филиале ВНИИМ в лаборатории, руководимой Н. В. Демуришвили, ведутся работы по виброзащите средств измерений.

Виброизмерительные приборы поверяют в ряде институтов и в лабораториях Государственного надзора страны (в Москве, Ленинграде, Минске, Таллине, Хабаровске, Новосибирске, Свердловске и др.). Промышленности передано 15 комплектов установок ОИВУ-2 и ОВУ-1.

В системе Комитета действует нормативная документация, регламентирующая методы поверки и испытаний виброизмерительных средств, в том числе:

1. Методы поверки акселерометров, рекомендуемые к применению в испытательных лабораториях предприятий.
2. Методическое указание № 280 по поверке ИВПШ.
3. Средства измерения общепромышленного применения. Технологические требования и методы испытаний на вибрационные воздействия.
4. ГОСТ 15939—70. Устройства виброизмерительные с пьезоэлектрическими вибропреобразователями. Методы и средства поверки.
5. ГОСТ 16819—71. Приборы виброизмерительные: Термины и определения.

Измерение параметров удара

Важной задачей в области метрологических работ ВНИИМ является измерение параметров удара. Этот вид измерений приобретает все возрастающее значение в связи с нуждами испытаний промышленных изделий на устойчивость к ударным воздействиям и отработки новых технологических процессов. Наиболее распространено при этом измерение ударных ускорений, которые достаточно полно характеризуют состояние недеформируемых и упруго деформируемых тел.

Работы в этой области направлены на реализацию поверочной схемы, обеспечивающей единство измерений ударных ускорений.

Специфика измерений ударных ускорений привела к необходимости создания образцовой аппаратуры нескольких типов для различных значений ударных ускорений.

В области малых ускорений от 20 до 150 м/сек² разработана образцовая установка с магнитоэлектрическим измерителем ударной скорости, позволяющая градуировать акселеро-

метры массой до 500 г при длительности процесса до нескольких десятков миллисекунд. Более высокие ускорения, от 200 до 5000 m/sec^2 , можно воспроизводить на образцовой установке с расчетным значением ускорения. В сочетании с осциллографическим компаратором типа 9326 установка позволяет градуировать с погрешностью в 5÷10% акселерометры с массой до 400 г при форме кривой, близкой к прямоугольной.

Для градуировки ударных акселерометров в области высоких и сверхвысоких ускорений, от 10^4 до 10^6 m/sec^2 , разрабатывается образцовая установка на базе мерного стержня с магнитно-импульсным возбудителем. Энергия возбуждения до 20 кдж обеспечивает среднюю электрическую мощность в импульсе до 7500 Вт, что позволяет получать ускорения указанной амплитуды при длительности от 15 до 200 мксек. В качестве образцового средства измерения использована быстродействующая оптическая следящая система; отношение сигналов измеряют разработанным точным импульсным компаратором. Схема формирования возбуждающего сигнала обеспечивает получение формы кривой ускорения, близкой к теоретически оптимальной. В установке предусмотрен дистанционный контроль качества крепления градуируемого акселерометра и ряд других усовершенствований, обеспечивающих высокую точность измерений.

Для передачи размера единицы ускорения от высших звеньев поверочной схемы к низшим разрабатывается образцовый акселерометр на базе стабильного монокристаллического пьезоэлектрика — высокоомного сульфида кадмия. Для полного устранения влияния кабельного эффекта, а также электромагнитных помех акселерометр снабжен встроенным предусилителем на полевом транзисторе.

Для экспериментальной оценки значений отдельных составляющих погрешности акселерометров в лаборатории разработана и изготовлена серия специализированных установок, позволяющих исследовать и оценить степень влияния на результат измерения: поперечных составляющих движения, крутильных колебаний, температуры, акустического и электрического полей.

Наряду с совершенствованием существующих и разработкой новых средств измерения ведется также поверочная работа по градуировке акселерометров в ударном режиме и по аттестации ударных стендов с помощью образцовой аппаратуры.

Необходимо отметить, что определение ударных ускорений не исчерпывает всех задач измерения параметров удара. Для оценки режима испытаний на ударную прочность все большее значение приобретает специфическая характеристика процесса — ударный спектр. Во ВНИИМ теоретически исследуются методы определения этой характеристики и практически разрабатываются акселерометры ударного спектра. Ряд работ посвящен также измерениям других параметров ударных процессов.

В плане решения задач, связанных с обеспечением единства измерения ударных ускорений, в Свердловском филиале ВНИИМ под руководством М. М. Лупинского создается образцовая ударная установка для диапазонов ускорений от 1000 до 150 000 м/сек² по типу баллистического маятника. Ускорение определяют косвенным путем с учетом результата измерения максимального ударного усилия упруго-контактным методом.

Большое значение имеет изучение механических свойств различных материалов при воздействии на них ударных нагрузок. В Свердловском филиале ВНИИМ под руководством Ф. С. Савицкого ведутся исследования в области малых скоростей нагружения металлов.

В Тбилисском филиале ВНИИМ в лаборатории, руководимой О. И. Кацитадзе, работы направлены на изучение свойств металлов и стеклопластиков при высоких скоростях механического нагружения.

Нормативная документация в области измерения параметров удара практически отсутствует. Создание такой документации является задачей самого ближайшего времени.

Проблемы и ближайшие задачи измерения параметров движения

Основной проблемой в области измерения параметров движения является разработка и создание системы, обеспечивающей в масштабах страны высокое качество приборов, измеряющих параметры движения в широком диапазоне перемещений, скоростей и ускорений.

Эта основная проблема подразделяется на ряд больших задач, к которым относятся разработка и создание эталонных и образцовых мер в данной области измерения, составляющих верхнее метрологическое звено поверочной схемы, без чего невозможно обеспечить высокую точность и единство измерения параметров движения в стране.

Необходимо разработать и создать стационарную и переносную аппаратуру более низших звеньев, с помощью которой значения единиц измерения должны быть доведены до рабочих приборов. Затем следует организовать при Государственных контрольных лабораториях соответствующие подразделения, осуществляющие массовую поверку приборов, и оснастить их соответствующей образцовой аппаратурой.

Необходимо также разрабатывать терминологию, нормативную документацию, методические указания и государственные стандарты на поверку соответствующей аппаратуры. Возникает необходимость в хранении и поддержании эталонных средств, с помощью которых воспроизводятся единицы измерения, а также в совершенствовании их для расширения диапазонов измерения и увеличения точности.

Наряду с этим следует ставить работы, направленные на ускорение и автоматизацию процессов поверки.

Возникают большие задачи в регламентации испытательных средств, их аттестации и поверки на местах. Эти общие задачи могут быть конкретизированы для каждого вида измерений.

В области измерения постоянных и низкочастотных ускорений — создание комплекса исходных и рабочих эталонов, а также образцовой аппаратуры для воспроизведения и измерения постоянных и низкочастотных ускорений в диапазоне частот $1 \cdot 10^{-4}$ —30 гц и постоянных ускорений от $1 \cdot 10^{-5}$ до 10^4 м/сек².

В области измерения параметров вращения:

1. Разработка и создание комплекса установок для воспроизведения и измерения малых угловых скоростей в пределах $5 \cdot 10^{-7}$ — $1 \cdot 10^{-3}$ об/мин и больших скоростей в пределах от $5 \cdot 10^{-4}$ до $3 \cdot 10^{-5}$ об/мин.

2. Разработка и создание образцовых автоматизированных установок в диапазоне угловых скоростей от 1 до 10^5 об/мин.

3. Создание комплекса установок для воспроизведения и измерения угловых постоянных ускорений в пределах 1—1000 рад/сек² и низкочастотных 0,05—300 гц.

В области измерения параметров вибраций:

1. Разработка вибрационных установок, охватывающих инфра- и ультразвуковую области в диапазоне частот $1 \cdot 10^{-2}$ — $5 \cdot 10^{-5}$ гц.

2. Создание образцовых вибрационных установок в диапазоне частот 100—3000 гц на большие уровни ускорений до $5 \cdot 10^3$ м/сек².

3. Создание программировочных установок для автоматизации процесса поверки виброаппаратуры.

В области ударных ускорений. Разработка и создание комплекса образцовых ударных установок для воспроизведения и измерения ударных ускорений в диапазоне 1 — 10^6 м/сек².

Кроме приведенных задач, необходимо вести работы для изыскания новых методов измерения параметров движения, используя для этого оптические квантовые генераторы, эффект Мёссбауэра и другие физические методы.

Поступила в редакцию

10/XI 1969 г.

К ВОПРОСУ СОУДАРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Определение некоторых упругих постоянных различных материалов, к которым относится коэффициент температурной зависимости модуля упругости при растяжении, коэффициент упругого восстановления, коэффициент ускорения и др., может быть произведено путем соударения твердых тел.

Удар может происходить непосредственно между телами или через посредство ряда тел. Фактически удар всегда является полупругим.

В некоторых случаях решения прямого полупругого удара последовательного ряда твердых тел встретились выражения с очень сложными арифметическо-геометрическими рядами. В связи с этим не удалось найти достаточно простые выражения для случаев, изложенных ниже. Поэтому в данной статье приводятся лишь краткие сообщения.

Одним из примеров взаимодействия твердых тел является удар.

В дальнейшем будут приведены соображения, относящиеся только к изменению движения твердых тел шаровой формы в процессе прямого удара¹.

Сначала будут рассмотрены соударения двух шаров, а затем соударения последовательного ряда их.

Прямой удар двух шаров². Рассматривая классический прямой удар двух шаров, обозначим их массы через m_1 и m_2 , скорости удара c_1 и c_2 , скорости после удара c_1' и c_2' .

Изменения движения, возникающие вследствие удара определяются двумя уравнениями. Первое из них

$$m_1 c_1 + m_2 c_2 = m_1 c_1' + m_2 c_2', \quad (1a)$$

¹⁻² Список примечаний приведен в конце статьи.

после преобразования и подстановки $a = \frac{m_1}{m_2}$ может быть представлено в виде

$$ac_1 + c_2 = ac'_1 + c'_2 \quad (1b)$$

и второе

$$c'_2 - c'_1 = k(c_1 - c_2). \quad (2a)$$

Первое из этих уравнений выражает принцип сохранения живой силы, второе вытекает из принципа взаимодействия⁴ двух тел. В уравнении (2) величину k называем коэффициентом упругости восстановления². Это уравнение можно представить в более простой форме

$$-c'_r = kc_r, \quad (2b)$$

где $c_1 - c_2 = c_r$, и $c'_1 - c'_2 = c'_r$ является относительной скоростью шаров до удара и после удара. В случае совершенно упругого удара, когда коэффициент упругого восстановления $k=1$, динамическое условие, установленное при помощи уравнения (2a), эквивалентно условию, вытекающему из принципа сохранения живой силы

$$\frac{1}{2} m_1 c_1^2 + \frac{1}{2} m_2 c_2^2 = \frac{1}{2} m_1 c_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 c_2'^2. \quad (3)$$

Значит из уравнений (1b) и (2) можно получить выражения для скорости шаров после удара

$$c'_1 = \frac{(a-k)c_1 + (1+k)c_2}{1+a}, \quad (4a)$$

$$c'_2 = \frac{(1+k)ac_1 + (1-ak)c_2}{1+a}, \quad (4b)$$

действительные для упругих материалов.

Прямой удар в прямом ряду шаров⁵. Предположим, что имеется прямой ряд $n-1$ неподвижных шаров, обозначим их через $i=2, 3, \dots, n$. Этому ряду шаров сообщается удар шаром 1 с массой m_1 и скоростью $c_1=0$. Массы шаров в ряду обозначены через m_i , а их скорости до удара — через $c_i=0$, все шары находятся в относительном покое по отношению к неподвижному наблюдателю⁶.

Рассмотрим два случая соударения (упругого или полупругого) ряда шаров. В первом массы всех шаров ряда одинаковы $m_1 \geq m_i$ (1a, 1b) и во втором случае массы шаров с увеличением i постепенно уменьшаются по закону геометрической прогрессии, причем отношение масс двух смежных тел постоянное

$$a = \frac{m_1}{m_2} = \frac{m_1}{m_{i+1}} \dots \frac{m_{n-1}}{m_n}.$$

Здесь также рассматривается удар упругий или полупругий (IIa, IIb).

Для первого случая удар будет происходить при скоростях, малых по сравнению со скоростью света, для второго случая при большем n скорости будут соизмеримы со скоростью света.

1а. Даны величины: $m_1 = m_0$, $a = 1$, c_1 , $c_i = 0$, $k = 1$. Удар классический и происходит следующим образом. Шар 1, ударяет шар 2, этот шар ударяет шар 3 и т. д., до тех пор, пока шар $(n-1)$ -й столкнется с n -м шаром. Удар последовательно проходит через весь ряд шаров, поэтому назовем его постепенным ударом. Очевидно, он состоит из $(n-1)$ простых частных ударов, протекающих между двумя смежными шарами: $1 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 3$, ..., $(n-1) \rightarrow n$. Из условий задачи вытекает (4а и б), что при каждом простом ударе шары взаимно передают скорости. Конечно, исключая первый (1) и последний (n -й) шары, каждый шар принимает участие в двух простых ударах (например шар $3: 2 \rightarrow 3$, $3 \rightarrow 4$) и их скорости необходимо обозначать до удара через $c_i = 0$, $i \neq 1$ после простого удара $(i-1) \rightarrow i$ — через w_i ; эта скорость тождественна со скоростью того же шара до следующего простого удара $i \rightarrow (i+1)$. И, наконец, скорость после удара обозначим через c'_i . Процесс постепенного удара приведен в таблице. (В данном случае постепенный удар — единственный).

Частный удар (простой)	До удара		После удара	
	c_1	$c_2 = 0$	$c'_1 = 0$	w_2
$1 \rightarrow 2$	c_1	$c_2 = 0$	$c'_1 = 0$	w_2
$2 \rightarrow 3$	w_2	$c_3 = 0$	$c'_2 = 0$	w_3
$3 \rightarrow 4$	w_3	$c_4 = 0$	$c'_3 = 0$	w_4
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$(n-1) \rightarrow n$	w_{n-1}	$c_n = 0$	$c'_{n-1} = 0$	$w_n = c'_n = c_1$

Конец постепенного удара является одновременно концом ударного явления в ряду шаров: последний (n -й) шар отскочит от ряда со скоростью c'_n , равняющейся по значению и по направлению скорости c_1 , и все остальные шары, включая первый шар, останутся в относительном покое.

Более сложный случай получим, если $m_1 > m_2$, $m_2 = m_3 = \dots = m_n$, $a_1 = \frac{m_1}{m_2} > 1$, $a_i = \frac{m_1}{m_{i+1}} = 1$, $c_1 > 0$, $c_i = 0 (i \neq 1)$,

$k = 1$. Удар опять классический; он протекает следующим образом: шар 1 ударится о шар 2, передаст ему часть своего коли-

чества движения и сообщит ему такую скорость, значение которой можно определить из выражения (4а и б). Однако этот шар не остановится. Дальнейшие простые удары: $2 \rightarrow 3$, $3 \rightarrow 4, \dots, (n-1) \rightarrow n$ протекают так же, как и в предыдущем случае. В конце этого постепенного удара отскочит последний (n -й) шар от ряда шаров со скоростью c_n , а ($n-1$)-й шар останется на короткое время в покое. На короткое время потому, что этим постепенным ударом весь процесс не заканчивается и следует дальнейший постепенный удар, заканчивающийся отскоком ($n-1$)-го шара со скоростью c_{n-1} . Затем следует третий постепенный удар и т. д., пока весь процесс не будет завершен после ($n-1$) постепенных ударов⁸. Следовательно, первый постепенный удар будет происходить в такой последовательности:

Частный удар (простой)	До удара		После удара	
	c_1	$c_2 = 0$	${}_I c_1' = 0$	${}_I w_2$
$1 \rightarrow 2$	c_1	$c_2 = 0$	${}_I c_1' = 0$	${}_I w_2$
$2 \rightarrow 3$	${}_I w_2$	$c_3 = 0$	${}_I c_2' = 0$	${}_I w_3$
$3 \rightarrow 4$	${}_I w_3$	$c_4 = 0$	${}_I c_3' = 0$	${}_I w_4$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$(n-1) \rightarrow n$	${}_I w_{n-1}$	$c_n = 0$	${}_I c_{n-1}' = 0$	${}_I w_n = c_n$

Так как, очевидно, ${}_I c_1' > 0$, произойдет второй постепенный удар.

Частный удар (простой)	До удара		После удара	
	${}_I c_1' > 0$	${}_I c_2' = 0$	${}_II c_1' > 0$	${}_II w_2$
$1 \rightarrow 2$	${}_I c_1' > 0$	${}_I c_2' = 0$	${}_II c_1' > 0$	${}_II w_2$
$2 \rightarrow 3$	${}_II w_2$	${}_I c_3' = 0$	${}_II c_2' = 0$	${}_II w_3$
$3 \rightarrow 4$	${}_II w_3$	${}_I c_4' = 0$	${}_II c_3' = 0$	${}_II w_4$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$(n-2) \rightarrow (n-1)$	${}_II w_{n-2}$	${}_I c_{n-1}' = 0$	${}_II c_{n-2}' = 0$	${}_II w_{n-1} = c_{n-1}$

Этот постепенный удар завершится отскоком ($n-1$)-го шара. Все остальные шары, исключая первый (${}_II c_1' > 0$), находятся в покое. Подобным порядком протекают дальнейшие по-

степенные удары, пока весь процесс не закончится последним постепенным ударом.

Последовательность $(n-1)$ -го постепенного удара:

Частный удар (простой)	До удара		После удара	
	$1 \rightarrow 2$	$(n-2)c_1$	$(n-2)c_2 = 0$	$(n-1)c_1 = c_1' > 0$

Скорости, с которыми будут отскакивать последние шары, могут быть получены из уравнений (4а и б):

$$c_n' = I w_n = I w_2 = \frac{2a}{1+a} c_1, \quad c_1' = \left(\frac{1-a}{1+a}\right)^{n-1} c_1, \quad (5a)$$

$$\left. \begin{aligned} c_{n-1}' &= II w_{n-1} = II w_2 = \frac{2(1-a)}{(1+a)^2} c_1, \\ c_{n-2}' &= III w_{n-2} = III w_2 = \frac{2(1-a)^2}{(1+a)^3} c_1, \\ c_2' &= n-1 w_2 = \frac{2(1-a)^{n-2}}{(1+a)^{n-1}} c_1. \end{aligned} \right\} \quad (5b)$$

Рассмотрим случай Ib.

Ib. Дано⁹: $m_1 = m_n$, $a=1$, $c_1, c_i = 0 (i \neq 1)$, $0 < k < 1$. Удар классический, полупругий. После удара первого шара будет в случае первого постепенного удара:

Частный удар (простой)	До удара		После удара	
	$1 \rightarrow 2$	c_1	$c_2 = 0$	$I c_1$
$2 \rightarrow 3$	$I w_2$	$c_3 = 0$	$I c_2$	$I w_3$
$3 \rightarrow 4$	$I w_3$	$c_4 = 0$	$I c_3$	$I w_4$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$(n-1) \rightarrow n$	$I w_{n-1}$	$c_n = 0$	$I c_{n-1}$	$I w_n = c_n'$

В конце удара отскочит n -й шар со скоростью $c'_n = {}_I w_n$.
Так же в случае второго постепенного удара:

Частный удар (простой)	До удара		После удара	
$1 \rightarrow 2^{10}$	${}_I c_1$	${}_I c_2 \neq 0$	${}_{II} c_1$	${}_{II} w_2$
$2 \rightarrow 3$	${}_{II} w_2$	${}_I c_3 \neq 0$	${}_{II} c_2$	${}_{II} w_3$
$3 \rightarrow 4$	${}_{II} w_3$	${}_I c_4 \neq 0$	${}_{II} c_3$	${}_{II} w_4$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$(n-2) \rightarrow (n-1)$	${}_{II} w_{n-2}$	${}_I c_{n-1} \neq 0$	${}_{II} c_{n-2}$	${}_{II} w_n = c'_{n-1}$

В конце процесса ударов отскочит $(n-1)$ -й шар со скоростью $c'_{n-1} = {}_{II} w_n$. Если исключить случай, изложенный в примечании 10, весь процесс ударов будет состоять из $(n-1)$ -х постепенных ударов и из $(n+1) \frac{n}{2}$ простых частных¹¹ ударов. Притом скорость ${}_x w_i$ или ${}_x c_i$ для x -го постепенного удара может быть найдена из уравнений (4а и б), откуда получим

$${}_x w_i = \frac{(1+k) \cdot {}_x w_{i-1} + (1-k) \cdot {}_{x-1} c'_i}{2}; \quad (6a)$$

$${}_x c'_i = \frac{(1-k) \cdot {}_x w_i + (1+k) \cdot {}_{x-1} c_{i+1}}{2}. \quad (6b)$$

Общие члены сложной арифметическо-геометрической прогрессии для значений i и x можно вычислить только путем предварительного определения всех членов меньше i и x , так как обе формулы (6а) и (6б) взаимно связаны. Для больших n эта задача очень трудна. После многократных взаимных подстановок (6а) и (6б) выражения получаются очень длинными и не наглядными.

Особый интерес представляет определение скоростей отскакивания шаров, которым завершается ряд отдельных постепенных ударов.

II. Дано $m_1, m_2, a = \frac{m_1}{m_2} = \dots = \frac{m_i}{m_{i+1}} > 1$,

$$c_1 > 0, \quad c_i = 0, \quad k = 1.$$

Для малых скоростей удар является классическим. Последовательность ударов такая же, как и в предыдущем случае. После каждого из частных ударов все шары будут иметь

некоторые значения скоростей. В предыдущем случае причиной этого был полупругий удар, в последнем случае совершенно упругого удара это вызвано уменьшающимися массами отдельных шаров в ряду ($a > 1$). Для данных условий рассчитаем по формулам (4а и б) скорость ${}_x w_i$ или ${}_x c'_i$ i -го шара для $(n-1)$ -го постепенного удара и получим

$${}_x w_i = \frac{2a {}_x w_{i-1} + (1-a) \cdot {}_{x-1} c'_i}{1+a}, \quad (7a)$$

$${}_x c'_i = \frac{(a-1) \cdot {}_x w_i + 2 \cdot {}_{x+1} c'_{i+1}}{1+a}, \quad (7b)$$

общие члены сложного арифметическо-геометрического ряда подобны таким же членам в предыдущем случае.

Если бы удар был полупругий ($0 < k < 1$), выражение для общего члена этого ряда приняло бы вид:

$${}_x w_i = \frac{(1+k) a \cdot {}_x w_{i-1} + (1-ak) \cdot {}_{x-1} c'_i}{1+a}, \quad (8a)$$

$${}_x c'_i = \frac{(a-k) \cdot {}_x w_i + (1+k) {}_{x-1} c'_{i+1}}{1+a}, \quad (8b)$$

Процесс этого удара значительно усложняется, как только скорости становятся соизмеримы со скоростью света, т. е. удар становится относительным. Основные уравнения, которые при этом определяют изменение движения, возникающее в процессе одного простого совершенно упругого удара между двумя шарами, имеют вместо (1а) и (3) вид:

$$\frac{ac_1}{\sqrt{c^2 - c_1^2}} + \frac{c_2}{\sqrt{c^2 - c_2^2}} = \frac{ac'_1}{\sqrt{c^2 - c_1'^2}} + \frac{c'_2}{\sqrt{c^2 - c_2'^2}} \quad (9)$$

и

$$\frac{a}{\sqrt{c^2 - c_1^2}} + \frac{1}{\sqrt{c^2 - c_2^2}} = \frac{a^2}{\sqrt{c^2 - c_1'^2}} + \frac{1}{\sqrt{c^2 - c_2'^2}} \quad (10)$$

где, согласно примечанию⁶, $a = \frac{m_{01}}{m_{02}} = \frac{m_{01}}{m_{01+1}}$ является отношением масс смежных шаров в покое. Причем уравнение (9) представляет собой обобщенный вид закона сохранения количества движения, а уравнение (10) выражает закон сохранения всей энергии (т. е. объединяет законы сохранения материи и энергии). При помощи простого решения уравнений (9) и (10) мы получаем в результате два отношения, подобные выражениям (4а и б), которые здесь не приводятся¹². Еще более сложные выражения можно получить для относительного полупругого удара.

Примечания

1. В начале удара тела соприкоснутся в одной точке, которую назовем точкой удара. Общую нормаль к поверхностям обоих тел в точке удара называем осью удара. Прямой удар отличается тем, что векторы скоростей поверхностей обоих тел в точке удара находятся на общей нормали — оси удара. Если этого нет, удар косой. Если центр тяжести обоих тел при ударе находится на оси удара, удар центральный. В другом случае — удар эксцентричный. Удар шаров всегда является ударом центральным.

2. В случае удара двух шаров:

m_i — масса i -го шара ($i=1,2$). При классическом ударе, т. е. скоростях, малых по сравнению со скоростью света c (в вакууме), масса в покое практически равняется массе движения и вследствие удара не изменяется. В случае относительного удара необходимо в дальнейшем обозначать:

m_{0i} — масса в покое i -го шара (в дальнейшем предполагается, что вследствие удара она не изменяется):

$a = \frac{m_{01}}{m_{02}}$ — частное масс в покое двух сталкивающихся тел.

Для классического случая $a = \frac{m_1}{m_2}$;

m_i — масса движения i -го шара до удара,

$$m_i = \frac{m_{0i}c}{\sqrt{c^2 - c_i^2}}$$

m_i' — масса движения i -го шара после удара,

c_i — скорость i -го шара до удара,

c_i' — скорость i -го шара после удара,

v — скорость центра тяжести системы обоих шаров, взятых вместе.

v_i — скорость i -го шара до удара

v_i' — скорость i -го шара после удара

} в системе S неподвижного наблюдателя

} в системе T , движущейся со скоростью v

c_r, c_r' — относительная скорость обоих шаров до и после удара в системе S .

Притом $c_r = c_1 - c_2, c_r' = c_1' - c_2'$;

v_r, v_r' — относительная скорость обоих шаров до и после удара в системе T . Притом $v_r = v_1 - v_2, v_r' = v_1' - v_2'$, и при $k=1$ удар упругий. Случаем $k=0$ мы не будем интересоваться в дальнейшем, потому что столкнувшиеся тела движутся после такого удара вместе.

k — коэффициент упругого восстановления при ударе обоих шаров. Его значение лежит в пределах $0 \leq k \leq 1$. При $k=0$ удар не упругий, при $0 < k < 1$ удар полупругий.

3. Пусть ось удара параллельна с координатной осью X . Так как удар прямой и центральный, векторы всех скоростей совпадают с осью удара; в дальнейшем необходимо учитывать только их модули, которым припишем положительные или отрицательные значения в зависимости от того, имеет ли соответствующая скорость направление, совпадающее или противоположное положительному направлению оси.

4. Более подробное объяснение можно найти, например, в книге Зд. Горак — Фр. Кружка — В. Шинделарж «Основы технической физики», абз. 2.8.4 (Прага, 1954).

5. Под прямым рядом шаров подразумевается совокупность шаров, расположенных таким образом, что их центр тяжести находится на общей прямой.

которую назовем осью ряда. Ряд может быть расположен таким образом, что его элементы соприкасались.

6. Для случая прямого удара в прямом ряду шаров:

m_1 — масса первого шара, которая со скоростью c_1 ударяется о ряд шаров,

m_i — масса i -го шара прямого ряда, состоящего из $i = 2, 3, \dots, n$ шаров. В процессе классического удара масса покоя практически равняется массе движения и при ударе не изменяется. В случае относительного удара обозначим:

m_{01}, m_{0i} — массу в покое 1-го и i -го шаров,

$a_1 = \frac{m_{01}}{m_{02}}, a_i = \frac{m_{0i}}{m_{0i+1}}$ — частные масс в покое двух смежных шаров в прямом ряду,

m_1, m_i — масса движения 1-го и i -го шаров до удара (см. примечание 2),

m'_1, m'_i — масса движения 1-го и i -го шаров после удара (см. примечание 2),

${}_x M_1, {}_x M_i$ — масса движения при скоростях ${}_x w_1$ или же ${}_x w_i$ (через x обозначается римскими цифрами порядковый номер соответствующего постепенного удара),

c_1, c_i — скорость первого и i -го шара до удара,

c'_1, c'_i — скорость первого и i -го шара после удара,

${}_x w_1, {}_x w_i$ — скорость первого и i -го шара при x -м постепенном ударе (индекс x — римскими цифрами),

k — коэффициент упругого восстановления принимаем постоянным при столкновении любых шаров. В противном случае было бы необходимо ставить индекс, который показывал бы, между какими двумя шарами произошел удар.

Все скорости учитываются в системе S . Для преобразования в систему T можно применить те же обозначения, что и в примечании 2. В случае, если суммарная масса всех членов прямого ряда $\sum_2^n m_i \rightarrow \infty$, обе системы становятся тождественными: $S = T$.

7. Подобный случай удара изложен автором в статье: «О скоростном и энергетическом спектрах в процессе удара в ряду n шаров», опубликованной в 1956 г. в ЧССР.

8. Последний постепенный удар будет протекать только между первым и вторым шарами и состоит из единственного «частного» удара.

Если прямой ряд состоит из $(n-1)$ членов, в этом случае протекают $(n-1)$ постепенных ударов, содержащих $(n+1) \frac{n}{2}$ простых частных ударов. Чтобы можно было отличить частные удары при разных постепенных ударах, прибавляется индекс очередности постепенного удара, обозначенный римскими цифрами (например, ${}_{III} c'_2$ — скорость второго шара после третьего постепенного удара, которая тождественна со скоростью второго шара до четвертого постепенного удара). Скорость шара, отскакивающего от ряда и не участвующего уже в дальнейших ударах, обозначена без очереди соответствующего постепенного удара.

9. В отличие от предыдущего случая (1а), когда большое число постепенных ударов последовательно проходит через ряд шаров и только в случае $m_1 > m_i$ и $m_1 = m_i$ протекает только один постепенный удар, здесь встретится (для $0 < k < 1$) всегда целое число постепенных ударов (для

$m_1 > m_i$). Для упрощения дальнейшего решения принимаем $m_1 = m_i$, $a_1 = a_2 = a$ (см. примечание 6).

10. Второй постепенный удар может протекать иначе: первый шар (в случае $m_2 < m_1$) может уже при первом постепенном ударе (или же после первого простого частного удара) остановиться (потом $rc_1 = 0$) или отскочит обратно, так что уже во втором постепенном ударе и в дальнейших постепенных ударах он не будет принимать участия. В данном случае второй постепенный удар протекать бы таким способом:

$2 \rightarrow 3$	$rc_2 \neq 0$	$rc_3 \neq 0$	rc_2	rc_3
$3 \rightarrow 4$	rc_3	$rc_4 \neq 0$	rc_3	rc_4
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots

Подобным образом происходили бы дальнейшие постепенные удары.

11. Если рассмотреть описанный выше случай, целое ударное явление будет состоять из $(n-2)$ постепенных ударов. Всего будет $\frac{1}{2}(n^2 - n + 2)$ простых частных ударов.

12. Решение уравнений (9) и (10) дано автором в статье «Прямой удар материальных частиц для больших скоростей», журнал Чехословацкой АН, Прага, ноябрь 1968 г.

Поступила в редакцию:

10/IV 1968 г.

СОДЕРЖАНИЕ И ЗАДАЧИ ПРИКЛАДНОЙ МЕТРОЛОГИИ

Вся деятельность человека тесно связана с различного рода измерениями. Меры и измерительные приборы обеспечивают правильную организацию и ведение производственных процессов; обеспечивают надлежащее качество изготавливаемой предприятиями продукции. В современном промышленном производстве измерительная техника играет решающую роль.

В автоматизированных процессах функции человека как наблюдателя, вычислителя, исполнителя полностью заменяют измерительные и регулирующие приборы и счетно-решающие устройства.

Возможность тех или иных новых открытий в значительной мере зависит от наличия соответствующей измерительной техники. В силу этого измерительная аппаратура стала основным видом оборудования научно-исследовательских учреждений и лабораторий.

Для проведения любого научного эксперимента необходимы измерительные приборы. «Мера и вес — суть главные орудия познания», — говорил великий ученый, основоположник метрологической службы в нашей стране Д. И. Менделеев. Меры и измерительные приборы имеют важнейшее значение при изготовлении и практическом использовании оборонной техники, так как безотказная и надежная работа боевой техники находится в прямой зависимости от надежности, а значит и от точности измерительных средств, с помощью которых юстируют, настраивают и проверяют оборонную технику.

Измерительные приборы являются важнейшим средством установления правильного диагноза при заболеваниях человека, помогают охранять его здоровье и труд. Они необходимы также при всякого рода хозяйственных расчетах, учете продукции, торговле и т. п.

Различные сложные измерительные приборы автоматически управляют производственными процессами, обеспечивают безаварийное движение транспорта. Характерно, например, что стоимость измерительной техники современного самолета, включая докационное и другое контрольно-измерительное оборудование, в настоящее время составляет более 60% стоимости всей машины. Без точнейших измерительных приборов невозможно освоение космического пространства.

Применение неверных мер и измерительных приборов и неправильных методов измерений наносит государству колоссальный ущерб: вызывает брак продукции, аварии, непроизводительный расход материалов и т. п. Меры и измерительные приборы только тогда будут удовлетворительно выполнять свои функции, если они верны и ими правильно пользуются.

В свете сказанного единство мер и измерительных приборов и достоверность результатов измерений имеет огромное народнохозяйственное значение. Состояние и уровень измерительной техники характеризуют развитие производительных сил и материальной культуры страны, а совершенствование этой техники способствует их прогрессу.

Метрология — наука об измерениях — составляет научную основу всей измерительной техники.

В связи с большим народнохозяйственным значением мер и измерительных приборов надзор за их верностью и правильным применением поручен Государственной метрологической службе. Основной задачей этой службы является обеспечение единства мер и измерительных приборов путем установления и регламентации единиц измерений, которые должны быть воспроизведены в виде государственных эталонов. Государственные эталоны — это фундамент, без которого невозможно осуществить единство мер и измерений в стране.

Одной из важнейших задач метрологии является также проведение большого комплекса мероприятий по обеспечению единства мер и измерений путем правильной передачи размеров единицы измерения от эталона к образцовым мерам и приборам и далее к рабочей измерительной аппаратуре. Совокупность работ по осуществлению этого комплекса мероприятий и относится к задачам прикладной метрологии.

В число задач прикладной метрологии входит создание и совершенствование законодательных основ измерительной техники; организация и осуществление Государственной службы единства мер и измерений в стране, Государственной службы стандартных и справочных данных и стандартных образцов и Государственной службы аттестации качества.

Создание и совершенствование законодательных основ измерительной техники имеет целью обеспечение единства измерений в стране путем узаконения определенной совокупности единиц

измерений, допускаемых к применению, и системы эталонов, служащих для воспроизведения этих единиц.

Документами, в которых фиксируются определенные требования, условия, технические характеристики и показатели, обязательные для всей страны, являются государственные стандарты. Государственные стандарты должны охватывать не только всю совокупность допущенных к применению единиц измерений и эталонов, служащих для их воспроизведения, но и методику оценки точности измерений самих измерительных средств и классов точности измерительной аппаратуры, а также средств и методов для измерения технических показателей различного вида продукции. Сюда же относится узаконение справочных данных о характеристиках материалов и веществ как путем издания соответствующих официальных справочников, так и путем введения этих данных в соответствующие стандарты.

В задачи Государственной службы по обеспечению единства и достоверности измерений в стране входит в первую очередь осуществление периодической поверки измерительных средств, применяемых во всех областях народного хозяйства; осуществление контроля за состоянием и правильным применением измерительных средств на предприятиях, в учреждениях и организациях, а также осуществление государственных испытаний измерительных средств как вновь разрабатываемых, так и выпускаемых из производства.

Эта работа осуществляется учреждениями Комитета стандартов, а также ведомственными метрологическими службами, деятельность которых регламентирована специальными положениями и находится под контролем местных учреждений Комитета.

Организационные формы, в которых осуществляется деятельность метрологических служб в стране, определяются соответствующими постановлениями правительства, что обеспечивает обязательность выполнения всех предусмотренных мероприятий по обеспечению единства мер и измерений в стране и надзору за состоянием измерительной техники.

Необходимость в организации измерительного хозяйства страны на основе Государственной метрологической службы появилась еще в XIX веке, когда впервые в России было создано метрологическое учреждение — Депо образцовых мер и весов.

Начало Государственной метрологической службы в нашей стране принято связывать с Положением о мерах и весах, введенным в 1842 г., которое по существу отражало только подготовительную метрологическую работу, заключающуюся в создании единых эталонов и образцовых мер. Однако фактически начало Государственной службы было положено Д. И. Менделеевым — основателем Главной палаты мер и весов, при котором впервые была начата разработка научных основ измерительного дела в стране.

В 1893 г. Д. И. Менделеев для осуществления задач прикладной метрологии разработал Положение о поверочных «палатках» мер и весов, в обязанности которых входило проведение поверок и клеймения приборов узкого профиля, в основном торгового назначения (весов, гирь, мер длины и объема).

По мысли Д. И. Менделеева число поверочных «палаток» в России следовало довести до 150, однако это предложение не было реализовано. До Великой Октябрьской социалистической революции в России функционировало всего 25 поверочных «палаток» с общим техническим персоналом около 150 человек. Только после Великой Октябрьской социалистической революции и издания декрета о введении в нашей стране метрической системы метрологическая служба получила возможность подлинного развития.

На всех этапах введения метрической системы за период с 1918 по 1927 г. наравне с Главной палатой мер и весов, возглавлявшей в то время всю работу по организации измерительного хозяйства в стране, ее поверочные органы также являлись важнейшими центрами по осуществлению этой реформы.

Бурный рост промышленности и науки в Советском Союзе потребовал коренной перестройки поверочных учреждений. Для руководства всей работой по организации измерительного хозяйства в стране создаются последовательно, по этапам развития измерительного хозяйства: Центральное управление мер и весов (1930—1939), Комитет по делам мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР (1939—1954) и в настоящее время — Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР.

Необходимо отметить, что постановлением Совета Министров СССР № 1762 от 1 октября 1955 г. Комитету были предоставлены значительные материальные средства для укрепления и расширения метрологической службы.

За 50 лет существования Советского государства метрологическая служба проделала большой путь, значительно расширила свою деятельность. В настоящее время в системе Комитета стандартов насчитывается 10 метрологических научно-исследовательских институтов и более 300 лабораторий государственного надзора за стандартами и измерительной техникой.

Значительно изменилось содержание работы органов Комитета, в задачу которых в настоящее время входит, кроме поверки мер и измерительных приборов: работа по организации надзора за приборостроением по широкой номенклатуре; организация и методическое руководство ведомственными метрологическими службами на предприятиях, в учреждениях и организациях, разработка нормативной документации по поверке измерительных средств; внедрение новой измерительной техники и работа по повышению стабильности показаний приборов, их надежности, долговечности путем изучения эксплуатационных характеристик;

организация ремонта измерительной аппаратуры и, в первую очередь, образцовых мер и измерительных приборов.

Одновременно на местные органы Комитета возложен контроль за внедрением и соблюдением государственных стандартов и надзор за качеством продукции, а также организация государственной службы аттестации качества, в функции которой входит: систематическое изучение, оценка уровня качества промышленной продукции и технических потребительских свойств изделий; составление и анализ качества показателей изделий различных стран и фирм.

Возможность присвоения изделию данного предприятия знака качества с последующей обязательной регистрацией в Комитете стандартов устанавливается на основе детального изучения качественных показателей изделий нашей страны.

Поскольку аттестованное изделие по своим качественным показателям лучше аналогичных изделий других предприятий, оно пользуется большим спросом и обеспечивает определенную выгоду, вследствие чего аттестация становится объективным фактором, заставляющим и другие предприятия улучшать свои изделия. В дальнейшем это приводит к необходимости внесения изменений в действующие стандарты на данную продукцию или к разработке новых стандартов, предусматривающих более высокие показатели качества, увеличенные сроки гарантированной надежности и долговечности изделий.

Внедрение новых стандартов на предприятиях, изделия которых не имеют знак качества, в конечном итоге приведет к общему повышению качества продукции.

Достигнутый уровень качества изделий должен сохраняться в течение длительного времени, в соответствии с чем должна быть установлена четкая система контроля за соблюдением технологической дисциплины.

Измерения являются основным источником для получения информации о количестве, свойствах и характеристиках сырья, изделий, оборудования и технологических процессов, на основе которых осуществляется учет, управление и техническое совершенствование всех звеньев производства. Недостаточность или недостоверность информации приводит к дезорганизации производства и ухудшению качества продукции.

Государственный надзор за соблюдением и внедрением стандартов и за качеством аттестованной продукции, осуществляемый лабораториями государственного надзора и инспекциями министерств и ведомств по качеству, способствует выпуску продукции высокого технического уровня. Измерительная техника в этом случае имеет также решающее значение, так как объективная оценка качественных показателей может быть произведена только с помощью измерительных средств.

В число основных задач промышленности, наряду с увеличением объема производства, резкое повышение качества продук-

ции, надежности и долговечности машин, приборов и оборудования, входит также повышение качества материалов и сырья, расширение ассортимента и улучшение качества товаров народного потребления. В решении этой задачи важнейшую роль играет правильная организация измерений и испытаний как в процессе производства, так и на конечном контроле, определяющем соответствие продукции государственным стандартам или техническим условиям.

Основной задачей метрологической службы на данном этапе является обеспечение не только единства мер, но и единства и достоверности результатов измерения. В соответствии с этим роль метрологических служб значительно возрастает.

Вопросы, связанные с достоверностью измерений, и в первую очередь всех технологических измерений, в системе министерств и ведомств должны решаться ведомственными метрологическими службами под контролем местных органов Комитета стандартов.

Поэтому должна значительно повыситься ответственность министерств и ведомств за состояние измерений и испытаний продукции в подведомственных им отраслях народного хозяйства и органах ведомственного надзора за измерительной техникой на предприятиях, в учреждениях и организациях. Для практического решения этой задачи Комитет стандартов разрабатывает типовое положение о метрологической службе министерств и ведомств, которое должно являться базой для развития метрологической службы до уровня, отвечающего современным требованиям народного хозяйства.

Действующая система государственного надзора за состоянием измерительной техники регламентирована специальными правилами Комитета стандартов «Об организации проведения поверки измерительных приборов и контроля за состоянием измерительной техники, соблюдением стандартов и технических условий». Эти правила являются обязательными для всех предприятий, учреждений и организаций нашей страны.

В настоящее время Комитет стандартов проводит большую работу по реализации перспективного плана совершенствования системы надзора за качеством продукции и соблюдением стандартов и единства мер и достоверности измерений, что позволит поднять уровень метрологических работ по повышению качества продукции.

Следующим новым этапом развития поверочной деятельности является организация республиканских и межобластных центров, снабженных необходимыми рабочими эталонами и образцовыми измерительными средствами. В их задачу будет входить также проведение определенного круга научно-исследовательских работ по вопросам метрологии и руководство прикрепленными лабораториями государственного надзора.

Основная цель такого преобразования службы государственного надзора за измерительной техникой состоит в том, чтобы обеспечить дальнейшее систематическое повышение качества промышленной и сельскохозяйственной продукции.

Оснащение республиканских и межобластных лабораторий рабочими эталонами и современным измерительным оборудованием позволит существенно повысить научно-технический уровень лабораторий госнадзора и организовать поверку исходных образцовых мер и измерительных приборов самых высших рядов как для органов метрологической службы, так и для научно-исследовательских учреждений, промышленных предприятий и организаций.

На республиканские и межобластные лаборатории будет возложена также работа по обеспечению единой службы образцовых веществ, которые как носители определенных свойств или состава находят все большее применение во всех отраслях народного хозяйства. В связи с этим республиканские лаборатории государственного надзора будут аттестовать такие вещества непосредственно для организаций и предприятий республики.

Для осуществления этих работ лаборатории будут снабжены, помимо эталонной аппаратуры, специальным оборудованием, необходимым для определения состава и свойств различных веществ физическими и химическими методами с высокой степенью точности, необходимой для удовлетворения потребностей науки и техники. Для проведения испытаний на высоком техническом уровне, позволяющем определять характеристики измерительной аппаратуры в реальных условиях эксплуатации, республиканские и межобластные лаборатории будут снабжены аппаратурой для климатических испытаний, испытаний на вибро- и тряскоустойчивость, пыле- и брызгонепроницаемость и др.

Организация республиканских и межобластных лабораторий позволит в кратчайшие сроки освоить достижения науки в области измерений и обеспечить освоение этих достижений промышленными и другими предприятиями и организациями.

Такое содержание работы республиканских и межобластных лабораторий поднимает их авторитет и превратит их в подлинный организационно-технический центр практической борьбы за претворение в жизнь программного требования нашей партии: «советское — значит лучшее».

Комитет стандартов и его местные органы в настоящее время располагают огромной технико-экономической информацией о состоянии внедрения и соблюдения стандартов, об уровне качества продукции и измерительной техники. Однако оперативно использовать эту информацию для управления качеством продукции в стране не всегда представляется возможным из-за нередко примитивных, отсталых методов ее обработки и передачи. Очевидно, что для совершенствования работы по прикладной метрологии предстоит решить еще одну важную задачу

создания автоматизированной системы оптимального управления государственным надзором (АСГН), разработку которой уже ведет Управление государственного надзора Комитета совместно с институтами и рядом лабораторий государственного надзора. Внедрение этой системы позволит существенно повысить эффективность работы поверочных служб страны.

В заключение следует сказать, что в настоящее время, когда роль измерительной техники и ее высшего звена — метрологии — стала особенно важным фактором в деле научно-технического прогресса, значение прикладной метрологии еще более возрастает.

Поступила в редакцию

24/III 1969 г.

ЗАДАЧИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМАМИ

С развитием современной техники все большее значение приобретают сложные технологические процессы, в управлении режимом которых уже ощущается все возрастающая роль метрологии. С этим расширяющимся развитием метрологии старые границы между измерительными направлениями видоизменяются и приобретают новый смысл.

Требование повышения точности эталонов и мер неизбежно приводит к использованию в метрологии достижений современной науки и особенно научных открытий квантовой физики. Классические метрологические направления по видам измерений суживаются до основных эталонов единиц. Появляется потребность народного хозяйства в концентрации измерений в определенных отраслях производства и науки. В настоящее время метрологическая деятельность развивается в области измерений: физико-технических (классические — измерение длины, температуры и т. д.), радиотехнических, физико-химических, измерения ионизирующих излучений и др.

Кроме того, появляются такие направления, как строительная, медицинская, фармацевтическая метрология и т. д., т. е. создаются новые группы измерений, которые объединяются в систему по производственному признаку. Такие системы в более сложных случаях имеют выход в виде информационно-измерительных систем, обеспечивающих измерения на целых комплексах. Уже сегодня некоторые из народнохозяйственных отраслей образуют единую систему, замкнутую по управлению.

В связи с развитием комплексных производственных отраслей: химии, энергетики, всесторонних испытаний крупных агрегатов (например, самолетов), появляется необходимость в новой классификации метрологических работ как по видам измерений, так и по отраслям.

Эти особенности развития метрологии на современном этапе приводят к необходимости создания базовых отраслевых метрологических организаций, объединяющих специалистов разных профилей и оснащенных вторичными эталонами, образцовыми мерами высших разрядов, образцовыми веществами и средствами для проведения необходимых измерений и метрологических работ.

Современные системы электроэнергетики — одна из народнохозяйственных отраслей, поддающихся единому управлению. Самые крупные электроэнергетические объекты, объединенные в энергосистему, находятся в Сибири. Поэтому одной из самых важных и назревших задач Сибирского филиала ВНИИФТРИ, как метрологического учреждения, является метрологическое обеспечение этой энергосистемы Сибири.

Сейчас уже созданы электронно-вычислительные машины, способные управлять и выдавать команды, а вычислительная техника может дать алгоритмы для обработки соответствующей кодированной информации, но состояние самой измерительной техники и метрологическая методика не достигли уровня, позволяющего перейти к автоматическому управлению такой народнохозяйственной отраслью, как энергетические системы. Некоторый успех имеется в отраслях науки, где человек уже не справляется либо по недоступности, либо по быстрдействию измерительных объектов.

Энергосистемами еще управляют диспетчерские службы, хотя многие процессы уже не во власти человека и ими можно управлять автоматически. В связи с необходимостью улучшения технико-экономических показателей и значительным снижением экономических потерь на объектах современных энергосистем важное значение приобретают проблемы получения полной и достоверной измерительной информации.

В конце 1967 г. ряд организаций под руководством Сибирского филиала ВНИИФТРИ предварительно обследовано состояние измерительной техники на энергетических объектах Сибири. Объекты обследования выбирали с таким расчетом, чтобы получить характерное представление о всей отрасли в целом.

Анализ состояния измерений показал, что точность и объем исходных данных для установления технико-экономических показателей не обеспечивают правильного планирования работы энергетических предприятий. В этих условиях экономические показатели (например, экономия топлива и т. д.) теряют свое значение, так как расход топлива и выработку электроэнергии измеряют с погрешностью 7÷10%, а планирование и учет требуется осуществлять с точностью до 1%. Не разработаны объективные методы и приборы автоматического определения физико-химических характеристик качества твердого (теплотворной способности, зольности, влаги и т. д.) и жидкого топлива (теплотворной способности, механических примесей,

вязкости). Часть необходимых теплотехнических измерений не производят: например, не измеряют температуру обмоток ротора при работе генератора, температуру меди и стали в трансформаторах и др. Не соответствуют необходимым требованиям по точности многие существующие теплотехнические измерительные приборы (расходомеры, электроконтактные манометры, термопары).

Уровень электрических измерений существенно отстает от потребностей эксплуатации. Даже имеющиеся приборы недостаточной точности не обеспечены полностью метрологическим обслуживанием, особенно это относится к измерениям в высоковольтных сетях большой мощности; не разработаны методы и образцовая аппаратура для поверки существующих высоковольтных приборов. Многие применяемые в настоящее время измерительные приборы имеют низкий уровень надежности по сравнению с уровнем надежности силовых агрегатов; системы телеизмерений как в нормальном, так и в аварийном режимах недостаточно надежны и помехоустойчивы.

В результате обследования выяснилось, что объем и содержание измерительной информации в энергосистемах не отвечают требованиям даже существующих диспетчерских служб и тем более автоматизированных систем управления.

Важнейшая задача управления объединенными энергосистемами — это оптимизация их режимов с целью повышения эффективности выработки электроэнергии и распределения энергии потребителям с учетом их значимости в народном хозяйстве страны. Энергосистему с точки зрения развивающихся в настоящее время методов анализа следует рассматривать как сложную динамическую систему, подверженную влиянию случайных и детерминированных воздействий. Для таких динамических систем актуальным является прогнозирование и предотвращение аварийного состояния.

Все эти задачи могут быть решены созданием кибернетических систем, осуществляющих управление процессом как выработки электроэнергии и ее распределения, так и измерения, переработку информации и ее передачу по каналам связи. Это требует создания новых специфических управляющих элементов и узлов, первичных измерительных преобразователей (датчиков), мер сравнения, измерительных усилителей и т. д., причем одни и те же элементы могут участвовать в управляющих, измерительных и вычислительных операциях.

Объем исследовательских работ в этом направлении недостаточен; требуется разработка аналитических методов описания процессов, происходящих в энергосистемах, определения их основных параметров, изучение, классификация и совершенствование способов рационального математического выражения искомых и измеряемых характеристик.

Это ставит принципиально новые задачи перед метрологами и конструкторами измерительной аппаратуры. Помимо обычных требований обеспечения заданных метрологических характеристик (погрешности, чувствительности, диапазона измерений и т. п.) при измерении одной величины, предъявляются требования измерения обобщенных характеристик, например, статистических параметров процессов, и с другой стороны — требования раздельного измерения нескольких взаимосвязанных величин. Специальная информационно-измерительная аппаратура должна позволять не только измерять статистические параметры, но и обрабатывать с достаточным быстродействием результаты измерений. В настоящее время разработка ведется методы такой обработки на ЭВМ, соответствующей же аппаратуры для сбора измерительной информации практически нет.

На основе информации, заложенной в системы управления энергетическими объектами, должно осуществляться оперативное управление режимами энергосистем и определение технико-экономических показателей их работы.

Информация для оперативного управления энергосистемой в нормальном и аварийном режимах может быть разделена условно на четыре потока, содержащих данные: о гидродинамических и термодинамических параметрах; электрических параметрах элементов и режимов; состояниях элементов, узлов энергосистемы и системы управления; внешних климатических воздействиях.

В нашей стране энергия передается на разном уровне, на разных высотах, на больших расстояниях, где климатические условия в одном конце отличаются от климатических условий в другом.

Кроме указанных потоков информации, в энергосистеме должны генерироваться на разных уровнях управления потоки технико-экономической информации.

Одним из важных требований к информационно-измерительным системам является обеспечение оптимальной точности измерения.

Создание комплексных измерительных систем с выходом на специализированные управляющие вычислительные машины, обеспечивающих централизованное управление энергосистемами, требует объединения усилий метрологов разных специальностей, т. е. необходимо создание метрологической базы энергосистем, располагающей для необходимых единиц измерений образцовыми мерами высших разрядов, включая вторичные эталоны.

В целях повышения эффективности управления энергосистемами и для дальнейшего успешного развития энергетики необходимо решить следующие важнейшие проблемы в области метрологии и измерительной техники:

изучение влияния уровня измерительной техники и точности измерения отдельных величин на экономические показатели энергетических предприятий;

разработка новых измерительных приборов и систем повышенной и высокой точности, предназначенных специально для оснащения электростанций и энергосистем;

разработка методов и образцовых средств для поверки приборов теплотехнических и физико-химических измерений на местах их установки;

разработка методов и образцовых средств для измерений в высоковольтных сетях большой мощности, организация метрологического обслуживания высоковольтных измерений;

разработка приборов и систем для дистанционного измерения, сигнализации, управления и регулирования;

разработка приборов и систем для измерения статистических характеристик процессов в энергосистемах; разработка специальных вычислительных машин и методов обработки результатов этих измерений;

создание специальных информационно-измерительных систем, осуществляющих выбор оптимального метода измерений, сбор и обработку измерительной информации и выдачу результата измерений и (или) управляющего воздействия.

Успешное решение этих проблем требует участия министерств энергетики и электрификации, приборостроения, радиотехнической промышленности, Академии наук, Комитета стандартов, мер и измерительных приборов и ряда других ведомств. В этой работе уже участвуют некоторые институты Академии наук.

Первоочередными метрологическими задачами Сибирского филиала ВНИИФТРИ в этом направлении являются:

всестороннее изучение потребностей энергетики в решении метрологических задач, в средствах и методах измерений, включая определение экономической целесообразности оптимизации и повышения точности измерений;

создание высоковольтной измерительной лаборатории, оснащенной образцовой аппаратурой для измерений в высоковольтных сетях постоянного и переменного тока и осуществляющей государственные испытания и поверку высоковольтной измерительной аппаратуры, разработку новых высоковольтных измерительных приборов, главным образом образцовых, разработку нормативных документов на методы измерений, испытаний и поверок;

проведение метрологических работ по оптимизации и автоматизации измерительно-управляющих процессов в системах электроэнергетики; разработка метрологических вопросов унифицированного кодирования и подготовки измерительной информации для ввода в управляющие вычислительные машины; метрологическое изучение и разработка методов измерения

теплофизических свойств топлива и других тепловых величин (теплопроводность, теплота сгорания и т. п.), разработка для этих измерений стандартной аппаратуры и нормативных документов.

Для решения этих задач необходимо создать в Сибирском филиале ВНИИФТРИ совместно с Иркутскэнерго метрологическую базу, которая позволит в комплексе с другими сибирскими научно-исследовательскими институтами и в первую очередь с Сибирским энергетическим институтом СО АН СССР обеспечить современные энергосистемы средствами централизованного автоматического управления в целях повышения эффективности использования энергетических богатств страны.

Задача эта грандиозная и ее разрешение требует десятков лет, но отдельные этапы могут быть начаты уже сейчас.

В ближайшее время необходимо разработать точные методы измерения параметров и процессов в целях большой мощности при высоких напряжениях, что может быть решено путем применения новых физических методов измерения электрических величин. Особенно перспективным при этом является развитие высоковольтных измерений на основе использования ядерных явлений.

Поступила в редакцию

25/III 1969 г.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
✓ В. В. Бойцов. 50-летие метрической реформы в СССР и 75-летие ВНИИМ имени Д. И. Менделеева (Вступительное слово)	5
✓ В. О. Арутюнов. Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии имени Д. И. Менделеева и метрическая реформа	11
Ю. Я. Базилевский, К. К. Илюнин. Советское приборостроение в метрология	24
Б. М. Исаев. Метрология и стандартизация	31
А. М. Каган, Ю. В. Линник. О некоторых проблемах математической статистики в метрологии	39
✓ С. В. Горбачевич. Физические константы и их роль в развитии метрологии	48
А. Х. Кук. Современная метрология и основные физические константы	58
✓ Б. С. Джелепов. Метрология и ядерная физика	62
Ж. М. Отеро. Некоторые соображения по поводу основных единиц	74
✓ М. Ф. Юдин. Развитие метрологии ионизирующих излучений	78
А. Н. Ораевский. Квантовая электроника в метрологии и измерительной технике	89
Клаус Мёбвус. Атомный эталон частоты Германского ведомства по измерениям и контролю товаров ГДР (DAMW)	97
Л. М. Закс, В. Д. Фрумкин. Состояние и развитие техники точных радиоизмерений	101
А. С. Лесков, Е. П. Николаев. Метрологические задачи в области радиоспектроскопии	112
Р. С. Дадашев, Б. М. Исаев. Проблемы метрологии в медицине и биологии	118
✓ Т. Б. Рождественская, Е. Н. Чечурина, Е. Г. Шрамков. Состояние и развитие метрологических работ в области электрических и магнитных измерений	125
Г. П. Зедгинидзе. Кибернетика и вычислительная техника в метрологии	141
А. П. Юркевич. Метрологические задачи в области автоматизации технологических процессов	151
М. Керстен. Основные направления работ Федерального физико-технического института (PTB) в настоящее время	157
✓ В. В. Кандыба, И. И. Кириков. Метрологические основы пирометрии	166

	Стр.
✓ Б. Н. Олейник, О. А. Сергеев. Задачи метрологии в области тепловых измерений	173
Ион Искрулеску. Задачи и некоторые результаты работ Института метрологии Социалистической Республики Румынии	185
Г. Б. Бокий. Государственная служба стандартных и справочных данных	188
Д. Л. Оршанский, В. А. Павленко. Значение метрологии для научного приборостроения	191
✓ Д. К. Коллеров. Метрологические основы аналитических измерений	200
Ю. А. Вдовин, А. Б. Шаевич. Стандартные образцы	208
А. М. Трохан, С. А. Христианович. О некоторых задачах метрологии в области гидро- и газодинамики	216
✓ Д. Ф. Тартаковский. Метрологические работы ВНИИМ в области измерения параметров турбулентности	222
✓ А. И. Карташев. Задачи измерения параметров светового излучения	230
✓ Е. Ф. Долгинский, Л. К. Каяк. Механические измерения	242
✓ В. Л. Лассан, В. С. Пеллинец, А. Е. Сидельников, В. С. Шкаликот. Проблемы измерения параметров механических движений	251
✓ Вацлав Шинделарж. К вопросу соударения твердых тел	262
✓ М. Е. Балашов. Содержание и задачи прикладной метрологии	272
Р. В. Гострем. Задачи метрологического обеспечения централизованного управления энергосистемами	280
Рефераты статей, опубликованных в сборнике	288

Рефераты статей, опубликованных в сборнике

УДК 389.1

50-летие метрической реформы в СССР
и 75-летие ВНИИМ имени Д. И. Менделеева

В. В. Бойцов

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 5—10.

В 1918 г. декретом правительства по предложению В. И. Ленина в нашей стране введена метрическая система мер и весов. Проведена в условиях невероятной экономической и хозяйственной разрухи.

Еще в 1870 г. Д. И. Менделеев выступил с докладом о необходимости введения метрической системы, но царское правительство не позволило провести эту реформу.

Метрическая реформа сыграла огромную роль в техническом прогрессе страны. Большой и славный путь пройден метрологами за годы Советской власти. Государственная метрологическая служба превратилась в эффективную научно-техническую систему, влияющую на все отрасли народного хозяйства и оборону страны. Видное место занимает Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии имени Д. И. Менделеева (ВНИИМ), 75-летие которого отмечается. Он является метрологическим центром страны. Охарактеризована деятельность остальных метрологических институтов. Указаны задачи и пути дальнейшего развития метрологических работ.

УДК 389.1

Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии
имени Д. И. Менделеева
и метрическая реформа

В. О. Арутюнов

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 11—23.

В статье кратко излагаются пути развития метрической системы и роль в ее внедрении научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева, введенная декретом правительства в 1918 г. Метрическая система оказала большое влияние на развитие нашей промышленности, и ведущую роль в реализации этой системы играл ВНИИМ.

УДК [681.2+389.1](47)

Советское приборостроение и метрология

Ю. Я. Базилевский, К. К. Илюмин

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 24—30.

Созданная в СССР за годы Советской власти практически заново приборостроительная промышленность занимает одно из ведущих мест в решении главной экономической задачи Советского общества — создании материально-технической базы коммунизма. Дана характеристика технической политики в приборостроении на данном этапе. Показано влияние метрологии и измерительной техники на развитие производительных сил и указана тесная связь метрологии и приборостроения. Освещены перспективы дальнейшего развития приборостроения в нашей стране.

УДК 389.1+389.6

Метрология и стандартизация

Б. М. Исаев

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 31—38.

Показаны неразрывная связь между метрологией и стандартизацией и путь их развития, а также стоящие перед ними задачи. Важнейшую роль в обеспечении единства измерений в стране имеют лаборатории государственного надзора за стандартами и измерительной техники. Советская метрологическая служба выросла в эффективную научно-техническую систему, охватывающую своим влиянием все отрасли народного хозяйства, производства, техники, науки. Показана связь метрологии и физики, а также связь ее с измерительной техникой.

УДК 389.1 : 519.2

О некоторых проблемах математической статистики в метрологии

А. М. Казан, Ю. В. Липник

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 39—47.

Работа посвящена обзору интенсивно развиваемых в последнее время новых, так называемых крепких (robust) методов оценивания параметров, позволяющих довольно реалистически трактовать задачу обработки данных прямых измерений.

Таблиц 1, иллюстраций 1, библиографий 12.

УДК 53.081.7 : 389.1

Физические константы и их роль в развитии метрологии

С. В. Горбачевич

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 48—57.

Приведены данные о согласовании констант, их значениях, полученных разными исследователями. Необходимы дальнейшие работы по уточнению постоянной тонкой структуры, магнитного момента протона и ядерных магнетонах, кванта магнитного потока. Приведены соображения по использованию эффекта Джозефсона для поддержания размера вольта.

Таблиц 5.

УДК 389.1 : 53.081.7

Современная метрология и основные физические константы

А. Х. Кук

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 58—61.

Обсуждены особенности метрологических систем, основные аспекты использования атомных эталонов. Указаны возможности получения точности для волн порядка единиц 8-го знака. Приведены соображения о методах определения числа Авогадро и некоторые моменты из деятельности Национальной физической лаборатории (Англия) по определению основных физических констант.

УДК 389 + 539.1

Метрология и ядерная физика

Б. С. Джеленов

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 62—73.

Рассматривается вопрос о возможности и желательности перехода в будущем к ядерным эталонам физических величин. Обосновывается утверждение, что атомные ядра являются эталонами, созданными самой природой, притом одновременно для нескольких физических величин. Рассматриваются масса и заряд ядра, его магнитный дипольный и квадрупольный моменты и вопрос о монохроматичности ядерных излучений.

Таблиц 1, иллюстраций, библиографий 12.

УДК 53.081.1(100)

Некоторые соображения по поводу основных единиц

Ж. М. Отеро

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 74—77.

Этапоны должны отличаться высокой точностью, легкостью в изготовлении и высокой воспроизводимостью. Они должны основываться на хорошо известных физических явлениях, чтобы первичный эталон не был связан с каким-либо материальным предметом. Кроме того, вся система должна быть гармоничной. Рассмотрены эталоны шести основных единиц Международной системы (СИ).

УДК 539.1.03 : 389

Развитие метрологии ионизирующих излучений

М. Ф. Юдин

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 78—88.

Изложена краткая история развития работ в области метрологии ионизирующих излучений во ВНИИМ с 1914 по 1968 г. ВНИИМ располагает шестью эталонными комплексами, которые воспроизводят основные единицы ионизирующих излучений. Успешно развиваются работы в отделе измерения ионизирующих излучений ВНИИФТРИ и в рентгено-радиологической лаборатории в Новосибирске. Изложены ближайшие задачи метрологии ионизирующих излучений.

Иллюстраций 7.

УДК (389+621.317+681.2) : 621.38

Квантовая электроника в метрологии
и измерительной технике

А. Н. Ораевский

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 89—96.

Дан краткий обзор использования достижений квантовой электроники в метрологии. Создание молекулярного генератора из пучка молекул аммиака ознаменовало начало квантовой электроники. Интересным приложением квантовых стандартов частоты является спектроскопия сверхвысокого разрешения. Освоение оптического диапазона расширило возможности квантовой электроники вообще и ее применение в метрологии. Приведены соображения об использовании ОКГ в качестве эталонов частоты. Намечены пути развития стандартов частоты оптического диапазона.

Библиографий 7, иллюстраций 9.

УДК 529.786

Атомный эталон частоты Германского ведомства
по измерениям и контролю товаров ГДР (ДАМВ)

Клаус Мёбиус

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 97—100.

В 1967 г. создан цезиевый эталон частоты, разработанный на основе метода двойного резонанса с применением газонаполненных ячеек. В основу метода положена структура энергетических уровней атома цезия. Дано описание метода. С помощью опытной модели атомного эталона частоты исследованы параметры, от которых зависят абсолютное значение атомной резонансной частоты и точность ее воспроизведения. Достижута точность воспроизведения атомной частоты порядка $5 \cdot 10^{-11}$. Долговременная стабильность опытной модели атомного эталона частоты равна $1 \cdot 10^{-10}$.

УДК 621.317.7.

Состояние и развитие техники точных радиоизмерений

Л. М. Закс, В. Д. Фрумкин

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 101—111.

В статье рассмотрено современное состояние техники точных измерений и поверки измерительных приборов в области высоких частот.

Приведены перспективы развития этой области измерений. Иллюстраций 6.

УДК 389.1 : 539.28

Метрологические задачи
в области радиоспектроскопии

А. С. Лесков, Е. П. Николаев

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 112—117.

Дан краткий обзор состояния техники радиоспектроскопических измерений. Изложены задачи, стоящие в области радиоспектроскопии электронного парамагнитного резонанса.

Первоочередной задачей является создание Государственной службы стандартных образцов парамагнетиков и прежде всего стандартных образцов количества парамагнитных центров. Необходимо развивать и совершенствовать абсолютные методы измерения количества парамагнитных центров, без чего невозможно аттестовать стандартные образцы. Не менее важен выбор парамагнетиков, наиболее подходящих по своим параметрам для изготовления стандартных образцов. Третий этап метрологических работ в области ЭПР-спектроскопии включает разработку надежных и точных относительных методов измерения количества парамагнитных центров, а также некоторых других параметров спектров ЭПР с использованием стандартных образцов.

Библиографий 7.

УДК 389.1 : 61 : 57

Проблемы метрологии в медицине и биологии

Р. С. Дадашев, Б. М. Исаев

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 118—124.

Дан обзор состояния метрологии и измерительной техники в области медицины и биологии. Медицинская метрология и медицинские измерения имеют специфические особенности. Приведен анализ методик медицинских измерений и выводы из него. Обобщен материал по отечественному и зарубежному медицинскому приборостроению. Сформулированы стоящие перед медицинской метрологией основные проблемы.

УДК (621.317.7+621.317.4) : 389.1

Состояние и развитие метрологических работ в области электрических и магнитных измерений

Т. Б. Рождественская, Е. Н. Чечурина, Е. Г. Шрамков

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 125—140.

Дана историческая справка развития метрологической базы электрических и магнитных измерений, состояние эталонов и образцовых средств в этой области измерений и сформулированы перспективы их развития.

Иллюстраций 17.

УДК 389.1 : (62—50+681.3)

Кибернетика и вычислительная техника в метрологии

Г. П. Зедсигидзе

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 141—150.

Изложены вопросы о путях рационального применения методов математики и кибернетики, а также средств вычислительной техники для решения основных метрологических проблем и задач техники измерения.

Библиографий 23.

УДК 389.1 : (62—50+681.2)

**Метрологические задачи
в области автоматизации технологических процессов**

А. П. Юркевич

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 151—156.

Рассматриваются вопросы метрологии приборов, анализируются технические направления развития отраслей приборостроения и приводятся данные по количественной оценке предложенных способов улучшения метрологии приборов.

УДК 061.62 : 53

**Основные направления работ
Федерального физико-технического института (РТВ)
в настоящее время**

М. Керстен

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 157—165.

Дана краткая историческая справка о создании Федерального физико-технического института, общее описание института, задачи, стоящие перед ним, некоторые результаты работы за последнее время отделов механических, электрических и тепловых, оптических и акустических измерений, а также отдела атомной физики.

УДК 536.52.089.6

Метрологические основы пирометрии

В. В. Кандыба, Н. И. Киренков

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 166—172.

Рассматриваются основные требования к эталонам высоких температур и к образцовым приборам, а также основные пути построения аппаратуры и методики измерений, принятые в метрологии для реализации этих требований. Приведены физические обоснования шкалы высоких температур и история ее развития. Показана роль Д. И. Менделеева в развитии науки о термодинамической температурной шкале.

Кратко рассмотрены возможности и преимущества фотоэлектрического метода построения шкалы высоких температур, а также затруднения, возникающие при применении этого метода. Развитие точной фотоэлектрической пирометрии в СССР обеспечило повышение в 3—5 раз точности эталонов и послужило стимулом для применения фотоэлектрического метода в других странах.

Приводятся принятые в советской метрологии основные принципы построения образцовой пирометрической аппаратуры и методики градуировки, поверки и испытания технических пирометров излучения, позволяющие осуществлять метрологическое обеспечение оптической пирометрии на всей территории страны.

УДК 389.1:536

Задачи метрологии в области тепловых измерений

Б. Н. Олейник, О. А. Сергеев

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 173—184.

Проведен анализ развития тепловых исследований и на его основе формулируются задачи, которые ставит перед метрологами современная теплофизика и термохимия.

Предлагается основное внимание уделять разработке эталонных и образцовых средств для воспроизведения единиц измерения тепловых величин, созданию стандартных образцов и совершенствованию службы стандартных справочных данных о теплофизических свойствах веществ и материалов.

Библиографий 32.

УДК 061.62:389.1(498)

Задачи и некоторые результаты работ Института метрологии Социалистической Республики Румынии

Ион Искрулеску

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 185—187.

Дана характеристика некоторых направлений работы института метрологии Социалистической Республики Румынии. Его роль в развитии румынской метрологии увеличивается. Коротко сказано о некоторых результатах работ по увеличению точности и передаче размеров единиц измерений. Институт разрабатывает методы определения физических констант и анализа результатов измерений. Отмечено значение взаимопомощи между институтами разных стран.

УДК 389.1

Государственная служба стандартных и справочных данных

Г. Б. Бокий

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 188—190.

Приведены данные о состоянии Государственной службы стандартных и справочных данных (ГССД), а также организационные принципы ее. Особенностью этой службы является не только сбор опубликованных данных, но и оценка их достоверности. Приведены принципы, определяющие экономическую эффективность ГССД. Указаны первоочередные задачи ГССД, этапы развития программы по созданию фондов.

УДК 389 : 681.2

Значение метрологии для научного приборостроения

Д. Л. Оршанский, В. А. Павленко

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 191—199.

Рассматривается историческое развитие и современная сущность содержания, вкладываемого в понятия «метрология» и «научное приборостроение», и критерии, служащие основанием для отнесения того или иного средства измерения к категории «научных» измерительных приборов. Анализ предмета и метода научно-технической дисциплины «научное приборостроение» приводит к выводу, что предмет этой дисциплины во многом совпадает с предметом дисциплины «метрология». Различие этих двух дисциплин заключается в основном в их целевой направленности, что поясняется рассмотрением основных актуальных задач научного приборостроения.

УДК 389 : 543

Метрологические основы аналитических измерений

Д. К. Коллеров

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 200—207.

Отмечены отдельные этапы развития во ВНИИМ работ в области физико-химических измерений, начатых еще Д. И. Менделеевым как исследование свойств газов. Последнее направление начало развиваться в конце 60-х годов текущего столетия. Оно было связано с появлением новой измерительной техники — автоматических измерительных приборов и имело целью разработку проблем теоретической и практической метрологии в этой области.

Библиографий 7, иллюстраций 1.

УДК 389.6 : 620.1 : 543.08.

Стандартные образцы

Ю. А. Вдовин, А. Б. Шаевич

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 208—215.

Обсуждаются особенности развития техники измерений, связанные с бурным ростом числа разновидностей измерений, основанных на зависимостях «состав — свойство» или «свойство — свойство», и повышенном требовании к их точности.

Обсуждены преимущества применения стандартных образцов. Рассмотрены научные и организационные задачи, решение которых необходимо для массового выпуска высококачественных образцов.

Библиографий 10.

УДК 389 : (532.5+533)

**О некоторых задачах метрологии
в области гидро- и газодинамики**

А. М. Трохан, С. А. Христианович

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 216—221.

Дан обзор состояния метрологии и измерительной техники в области гидро- и газодинамики. Объем измерений в области гидро-газодинамики занимает одно из первых мест, но уровень измерительной техники, состояние метрологии далеко не всегда соответствуют уровню предъявляемых требований. Одной из основных задач в области гидро-газодинамики является разработка новых методов измерений. Остро стоит задача создания эталонных приборов для измерения переменной скорости, давления, расхода и других параметров жидких и газовых сред. Приведены основные требования к измерительным системам для гидро-газодинамических исследований. Поставлен вопрос об оперативной информации.

УДК 532.507 : 389.

**Метрологические работы ВНИИМ
в области измерения параметров турбулентности**

Д. Ф. Тартаковский

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 222—229.

В статье сообщается о работах ВНИИМ в области измерения параметров турбулентности. Отмечается, что эти измерения приобретают все большее значение в решении теоретических и прикладных задач гидромеханики. Показано, что осуществление измерений параметров турбулентности требует использования современных достижений метрологии в самых различных видах измерения: механических, электрических, оптических и др. Основным условием обеспечения единства гидродинамических измерений является учет специфики турбулентности.

Иллюстраций 2.

УДК 535.2.05(047)

Задачи измерения параметров светового излучения

А. И. Каргаев

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 230—241.

Дан обзор работ по основам измерений в области физической оптики, приведены современные методы воспроизведения основных и производных единиц по параметрам светового излучения. Представлены основные задачи в области световых и оптических измерений по характеристикам взаимодействия света и вещества.

Иллюстраций 8.

Механические измерения

Е. Ф. Долинский, Л. К. Каяк

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 242—250.

В статье дан краткий обзор основных метрологических исследований в области механических измерений (длины, массы, плотности, силы, давления, вязкости и расхода), выполненных в лабораториях ВНИИМ (ранее Главной Палаты мер и весов) в течение 75 лет со времени организации Главной Палаты и доложенных авторами на Всесоюзном метрологическом симпозиуме, посвященном 50-летию метрической реформы в СССР и 75-летию ВНИИМ.

УДК 531.7:389

Проблемы измерения параметров механических движений

*В. Л. Лассан, В. С. Пеллинец, А. Е. Симельников,
В. С. Шкаликов*

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 251—261.

В работе рассмотрены состояние и перспективы развития техники измерения параметров движения: угловых скоростей, постоянных и низкочастотных ускорений, вибрации и удара.

Указаны уровни достигнутой точности и освещены основные направления метрологических работ в этой области.

УДК 539.63

К вопросу соударения твердых тел

Вацлав Шинделарж

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 262—271.

В статье теоретически исследованы различные случаи соударений последовательного удара упругих шаров. Выводятся математические выражения, связывающие массы и скорости первого и последнего шаров ряда.

Таблиц 7.

Содержание и задачи прикладной метрологии

М. Е. Балашов

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 272—279.

На современном этапе технического прогресса в народном хозяйстве нашей страны важное значение приобретает опережающее развитие техники измерений, без чего нельзя обеспечить правильной организации научных исследований, технологических процессов производства и высокого качества продукции.

Государственная метрологическая служба осуществляет большой комплекс работ по поддержанию в стране единства измерений, основой которого является передача значений единиц измерений от государственных эталонов до мер и измерительных приборов, применяемых во всех отраслях народного хозяйства, науки и техники.

Весь огромный парк измерительной техники страны периодически подвергается проверке, осуществляемой органами государственной и ведомственной метрологической службы, которые контролируют также состояние и правильность применения средств измерений на местах эксплуатации.

К серийному производству допускаются только типы мер и измерительных приборов, прошедшие специальные испытания. Осуществляемые также органами государственной метрологической службы.

Задачи метрологического обеспечения
централизованного управления энергосистемами

Р. В. Гострем

Труды метрологических институтов СССР. Метрическая реформа в метрологии, вып. 123 (183), 1972 г., стр. 280—285.

Указаны важнейшие проблемы в области метрологии и измерительной техники, которые необходимо решить для повышения эффективности управления энергосистемами и для дальнейшего успешного развития энергетики. Приведены первоочередные метрологические задачи, стоящие перед Сибирским филиалом ВНИИФТРИ.



50 лет МЕТРИЧЕСКОЙ РЕФОРМЫ В СССР
Труды метрологических институтов СССР
Выпуск 123(183)

Редактор *Н. Н. Александрова*
Техн. редактор *З. Г. Вагер*

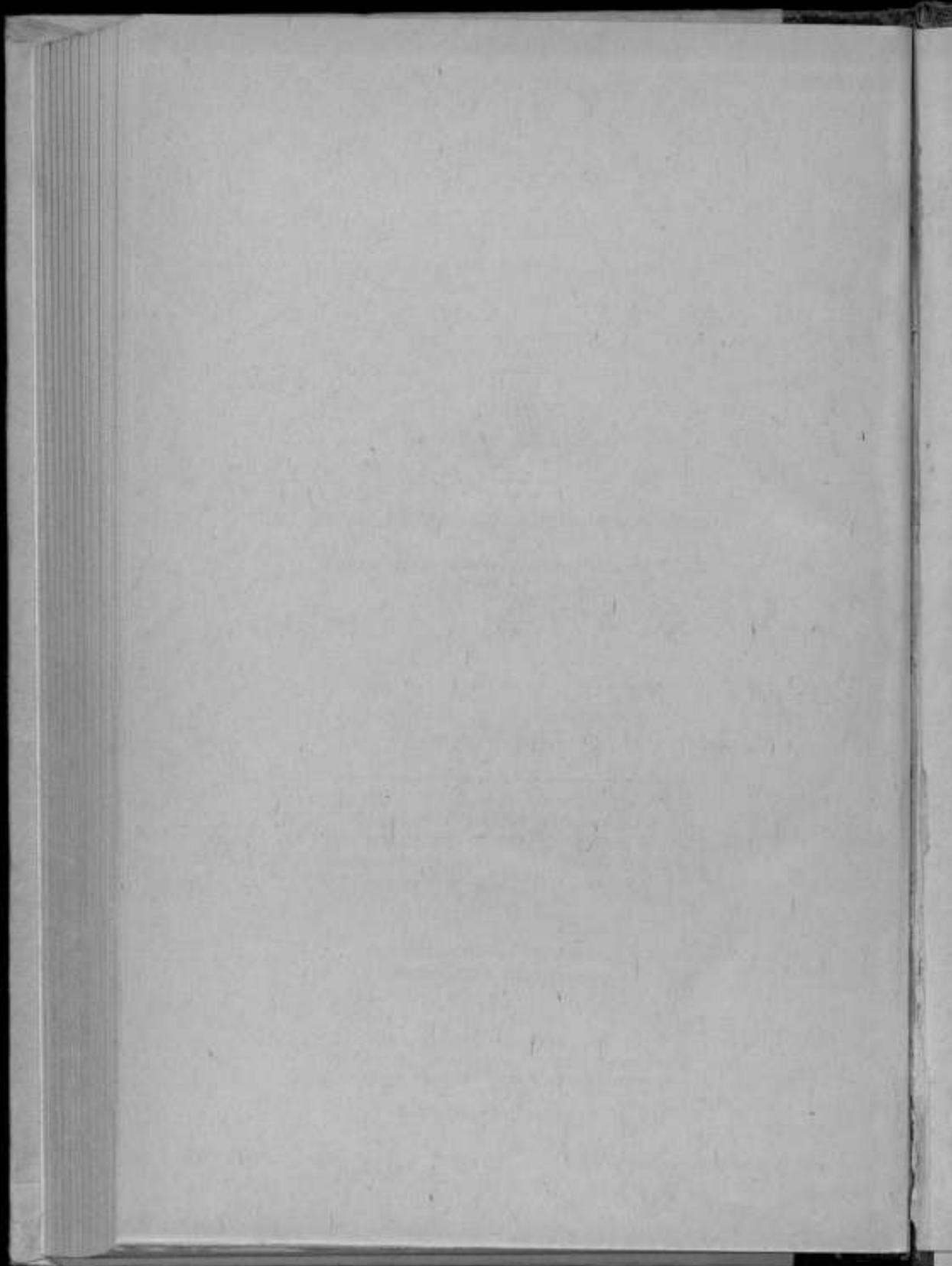
М-12887. Сдано в набор 13/VI 1971 г.
Подписано к печати 13/VII 1972 г.
Формат бумаги 60×90¹/₁₆. Печ. л. 19.
Уч.-изд. л. 21,3. Тираж 500 экз.
Цена 2 р. 05 к. Заказ 851

Издательство стандартов
Москва, К-1, ул. Щусева, 4

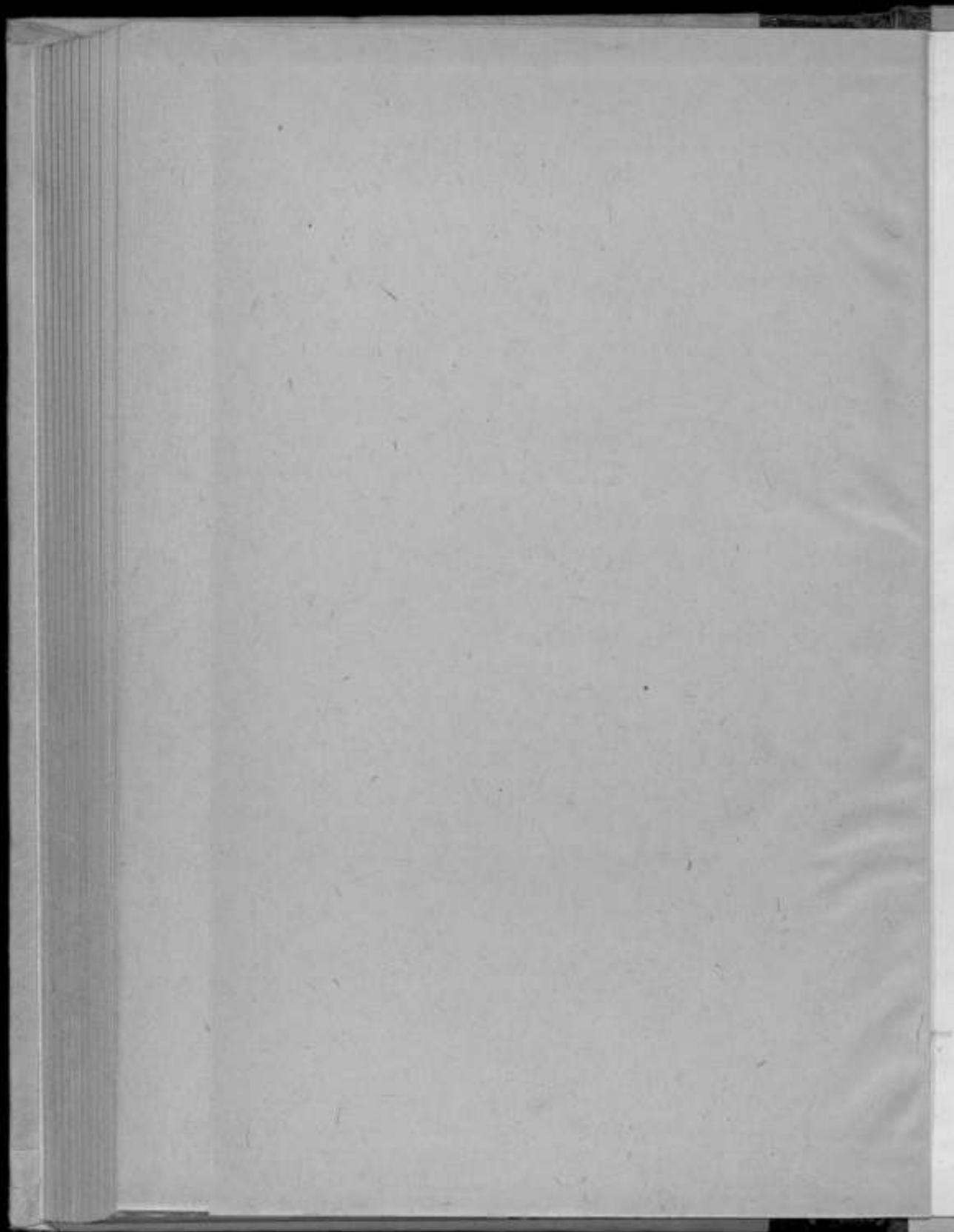
Ленинградская типография № 12
им. М. И. Лоханкова Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров
СССР.

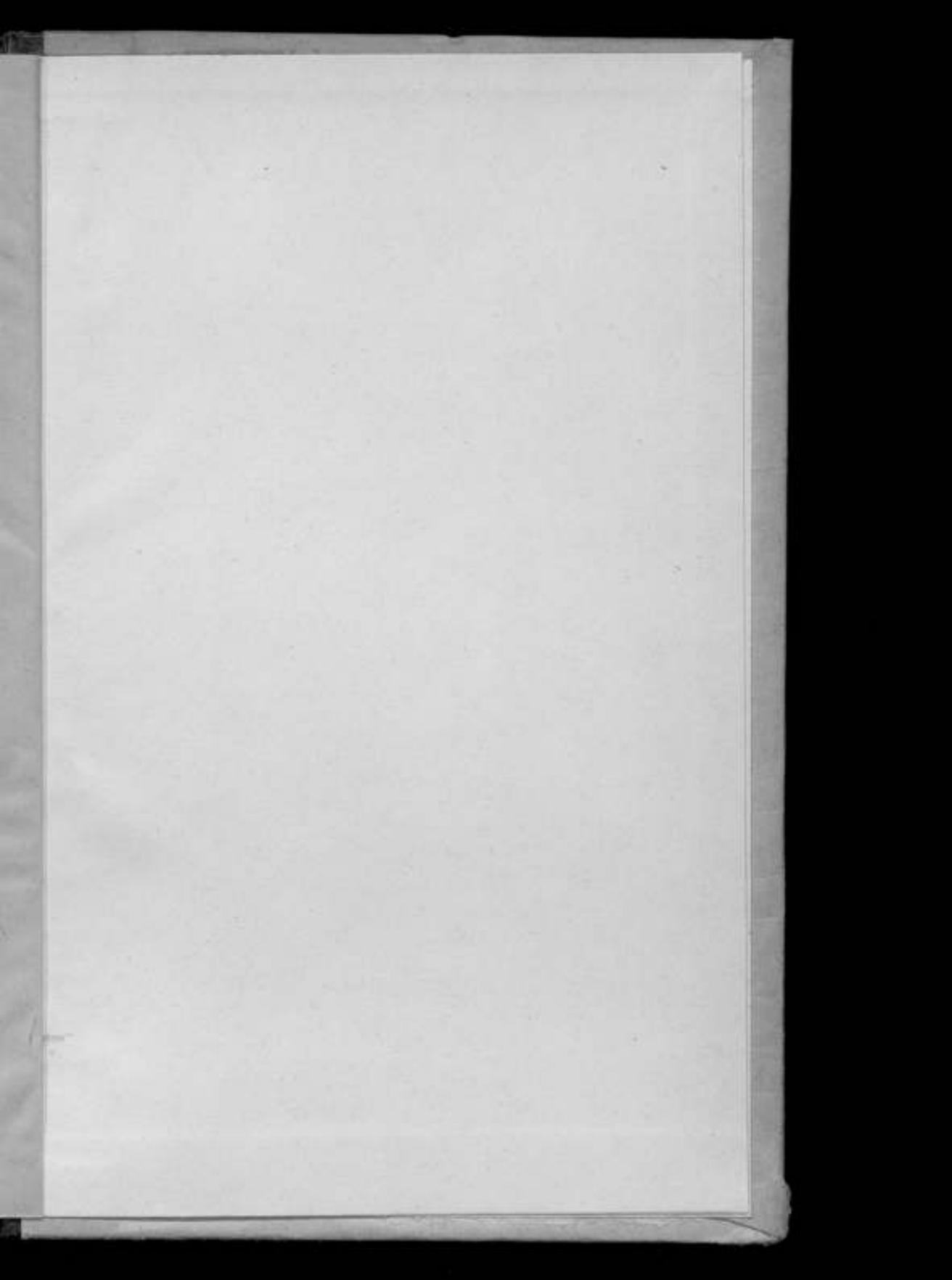
Ленинград, ул. Правды, д. 15

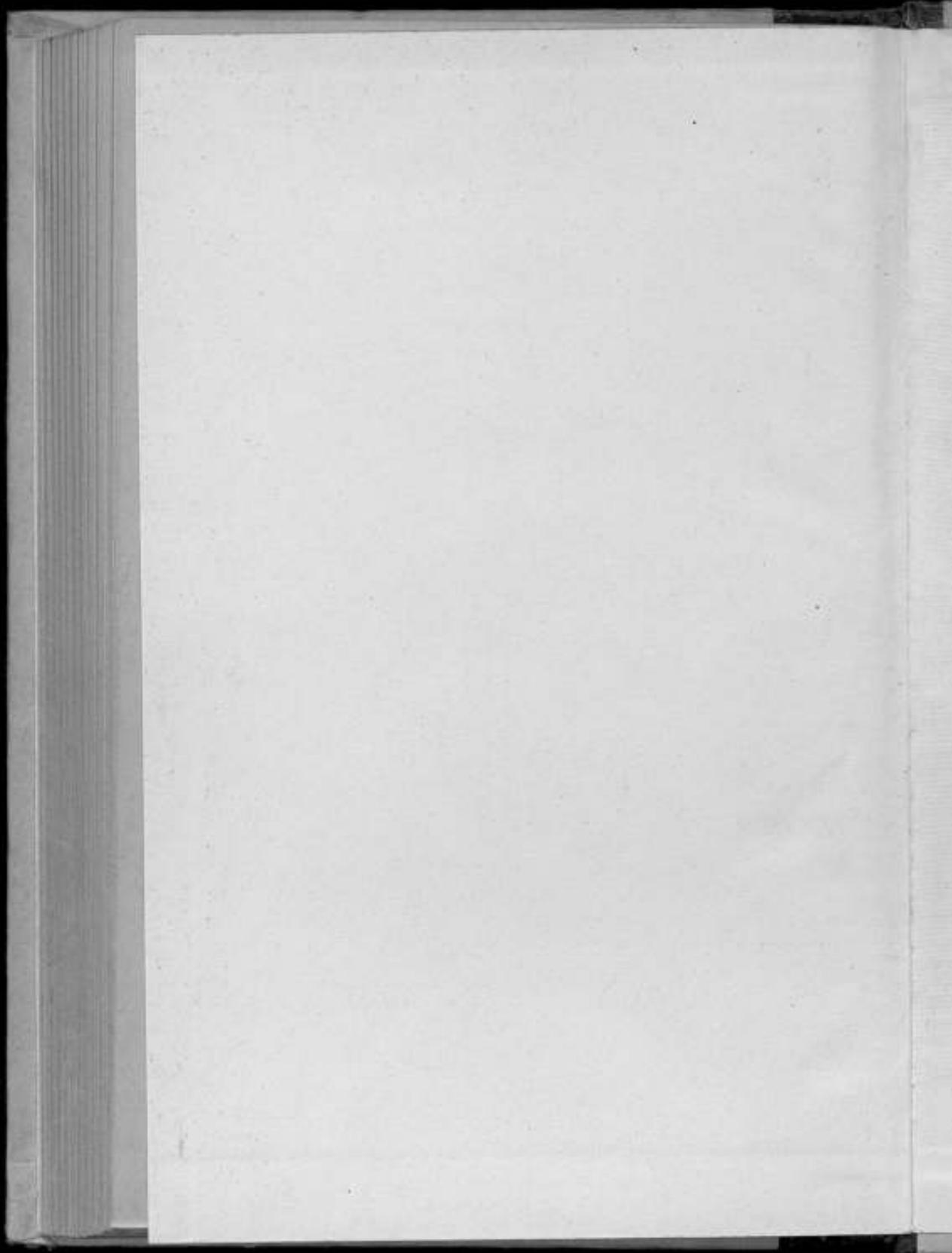


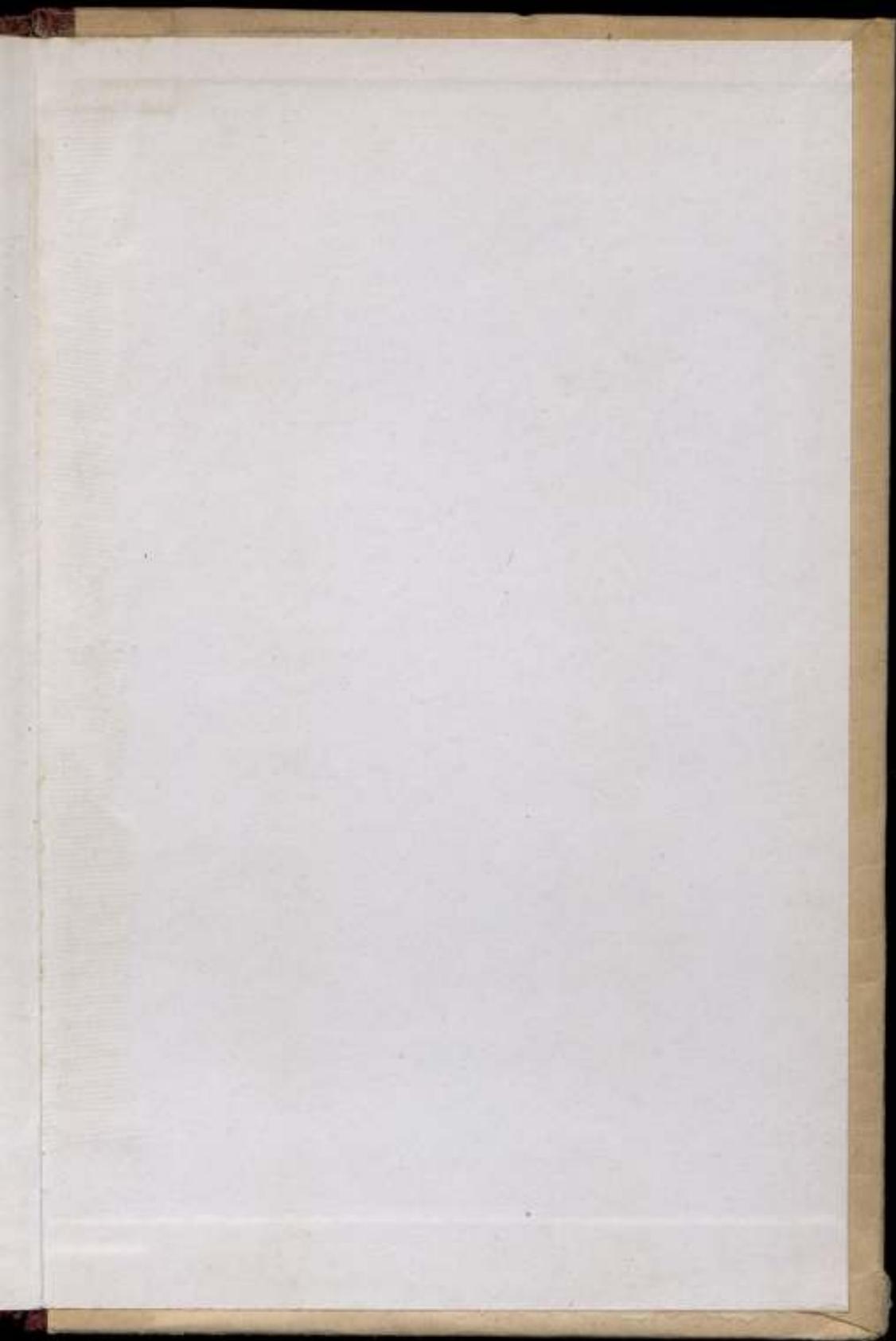












2 р. 05 к.