

Н. А. Зайцева
В. И. Шляхов

АЭРОЛОГИЯ

*Допущено Государственным комитетом
гидрометеорологии и контроля природной среды СССР
в качестве учебника для учащихся
гидрометеорологических техникумов*



Ленинград
Гидрометеониздат
1978

Рецензенты:

Ю. А. Гильгнер (Московский гидрометеорологический техникум)
А. И. Воскресенский (Арктический и антарктический научно-исследовательский институт)

Ответственные редакторы:

д-р геогр. наук С. С. Гайгеров
канд. техн. наук Б. П. Зайчиков

В учебнике дано систематическое описание приборов, а также методов экспериментальных исследований свободной атмосферы, составляющих предмет аэрологии.

Основное внимание уделено описанию современных систем зондирования атмосферы и перспективам развития аэрологических методов. О преемственности их в этой области науки свидетельствуют материалы по истории ее развития и описания применявшихся ранее методов изучения атмосферы.

Учебник предназначен для учащихся гидрометеорологических техникумов, но также может быть использован студентами гидрометеорологических институтов и географических факультетов государственных университетов.

The textbook contains a systematic description of instruments and methods for investigation of free atmosphere which is the subject of aerology.

Attention is focussed on the description of modern systems of atmospheric sounding and on the outlook for development of aerological methods. Some materials on the history this branch of science and a description of some obsolete out-of-date methods are given to show the development of aerology.

Нина Александровна Зайцева, Василий Иванович Шляхов

АЭРОЛОГИЯ

Редактор Л. В. Царькова. Художник К. А. Карпошечев. Техн. редактор Г. В. Ивкова. Корректор И. А. Крайнева. ИБ № 519. Сдано в набор 20.12.77. Подписано в печать 23.08.78. М-09537. Формат 80×90¹/₁₆. Бум. тип. № 1. Гарнитура литер. Печать высокая. Печ. л. 18. Уч.-изд. л. 19,78. Тираж 4300 экз. Индекс МЛ-36. Заказ № 7. Цена 1 р. 10 к. Гидрометеопечат. 199053, Ленинград, 2-я линия, д. 23.

Ленинградская типография № 8 «Союзполиграфпрома» при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 190000, Ленинград, Прачечный пер., 6.

А 20607-142
069(02)-78 7-77

© Гидрометеоиздат, 1978 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий учебник подготовлен в соответствии с программой курса «Аэрология» для гидрометеорологических техникумов. В книге последовательно описаны современные методы экспериментальных исследований свободной атмосферы. Особое внимание уделено методам оперативного зондирования, наиболее широко применяемым на сети аэрологических станций. Для того чтобы показать преемственность современных методов, кратко описана история аэрологических исследований атмосферы и изложены перспективы их дальнейшего развития.

В связи с быстрым развитием и совершенствованием приборов и методов исследования свободной атмосферы изданный в 1962 г. учебник «Аэрология» В. А. Белинского и В. А. Побияхо в значительной своей части потребовал обновления. Однако некоторые разделы этой книги не утратили своего значения и в наши дни, поэтому с разрешения В. А. Белинского содержание глав 1 и 3 частично заимствовано из учебника «Аэрология» издания 1962 г., за что авторы приносят профессору В. А. Белинскому свою глубокую благодарность. Главы 3 и 8 написаны авторами совместно, главы 1, 2, 4—7 написаны Н. А. Зайцевой, главы 9—10 — В. И. Шляховым, глава 11 — Б. И. Зимним (ЦАО) совместно с Н. А. Зайцевой. Большую помощь в подготовке глав 2 и 4 оказала преподаватель Ленинградского арктического училища Э. И. Волкович, которой авторы выражают самую глубокую признательность. Очень полезны были советы и помощь Н. А. Семиной и О. В. Марфенко.

Авторы благодарны рецензентам А. И. Воскресенскому и Ю. А. Гильгнеру за большой и кропотливый труд по прочтению рукописи и за сделанные ими замечания и предложения, которые были учтены при подготовке рукописи к изданию. В техническом оформлении рукописи очень помогли сотрудники отдела аэрологии ЦАО Л. И. Тимакова, А. А. Исаченкова и другие. Научное редактирование книги выполнили С. С. Гайгеров и Б. П. Зайчиков, которым авторы выражают свою глубокую признательность и отмечают их громадную помощь при окончательной подготовке рукописи к печати.

Разумеется, книга не свободна от недостатков, поэтому авторы заранее приносят благодарность всем читателям, которые сочтут нужным сделать свои замечания или выскажут предложения по улучшению ее содержания.

1 ВВЕДЕНИЕ

Изучение атмосферных процессов во всем их многообразии, взаимодействия атмосферы с другими сферами Земли, выяснение причин возникновения различных явлений в атмосфере — все это составляет предмет науки метеорологии. Изучение явлений, происходящих в атмосфере, началось еще в глубокой древности. Большей частью это были всего лишь наблюдения, но на их основе было составлено немало примет о погоде для ее предсказания, нередко вполне справедливых и получивших в наши дни научное объяснение. Изобретение главных метеорологических инструментов — термометров и барометров — позволило обогатить наблюдения измерениями температуры и давления воздуха. Начавшиеся в XVIII в. систематические метеорологические измерения и исследования явлений погоды позволили уяснить главные особенности состояния атмосферы у поверхности земли.

Первые метеорологические наблюдения выполнялись, естественно, у поверхности земли. В то же время ход атмосферных процессов и явления погоды, ими вызываемые, полностью определяются взаимодействием всех слоев атмосферы. Поэтому были начаты исследования атмосферы на различных высотах. В наши дни в связи с научно-технической революцией метеорология развивается очень быстро. При этом наука об атмосфере разделилась на ряд самостоятельных дисциплин, предметом изучения которых являются различные физические процессы и явления, происходящие в разных слоях атмосферы. Большое развитие получили такие дисциплины, как динамическая метеорология, синоптическая метеорология, сельскохозяйственная метеорология, климатология, аэрология, а также спутниковая метеорология, в основе которой лежат методы изучения состояния атмосферы с помощью искусственных спутников Земли.

1.1. Предмет и задачи аэрологии

Среди перечисленных выше дисциплин аэрология занимает особое место. Предметом изучения аэрологии являются физические явления и процессы, происходящие в свободной атмосфере, и методы исследования этих явлений. Под свободной атмосферой обычно понимается вся толща атмосферы выше слоя трения, т. е. та ее часть, на которую поверхность земли не оказывает непосредственного влияния. Слой трения — сравнительно тонкий нижний слой атмосферы, в котором развитие процессов и движение воздуха находятся в зависимости от сил трения, возникающих при движении воздуха над неровной и шероховатой поверхностью земли. Высота слоя трения в среднем равна 1—1,5 км. Таким образом, предметом изучения аэрологии является почти вся толща атмосферы, при этом нужно помнить, что верхняя граница атмосферы располагается на высоте около 1000 км. Бесспорно, что наука аэрология возникла благодаря появлению летательных аппаратов, а также развитию радиосвязи и новой техники. Основные задачи аэрологии в наше время состоят в создании и развитии методов исследования свободной атмосферы, а также в создании новых более точных приборов для измерения основных параметров (температура, давление, влажность) свободной атмосферы и для измерения дополнительных параметров, знание которых обогатит нашу науку и даст возможность повысить надежность прогнозирования атмосферных процессов.

Под аэрологическим зондированием понимается измерение различных характеристик атмосферы с помощью поднимаемых в атмосферу аэрологических приборов. В первую очередь это измерения скорости и направления ветра, температуры и влажности воздуха, а также других характеристик атмосферы вплоть до ее состава. Измерения ветра с помощью шаров-пилотов называют *ветровым зондированием*, а измерения ветра, температуры и влажности с помощью радиозондов называют *температурно-ветровым зондированием*. Измерения с помощью аппаратуры, поднимаемой на самолетах, называют *самолетным зондированием*, на аэростатах — *аэростатным зондированием*; различают также *ракетное* и *спутниковое зондирование*, а также *горизонтальное зондирование* — измерения, выполняемые с помощью трансзондов — шаров, осуществляющих длительный дрейф аппаратуры на различных высотах. Измерения дополнительных характеристик состояния атмосферы — микроструктуры облаков, радиации, озона, атмосферного электричества и др., называют *специальным зондированием*. Эти разнообразные виды аэрологического зондирования составляют предмет современной аэрологии.

1.2. Краткая история аэрологических исследований

Хотя современные методы аэрологических исследований появились в основном в XX в., сама аэрология возникла раньше благодаря пыливости ученых, изучавших атмосферу. Уже в XVIII в. исследование атмосферы не ограничивалось приземными слоями. Интересные наблюдения за полярными сияниями были выполнены нашим великим русским ученым М. В. Ломоносовым, результаты этих наблюдений не утратили своего значения до наших дней. На протяжении истории человечества ученые использовали все возможности для изучения слоев атмосферы от подъема в горы с метеорологическими приборами в руках до искусственных спутников Земли.

Первым аэрологическим измерением было измерение давления атмосферы при подъеме в горы. В 1647 г. француз Перье с помощью ртутного барометра, поднятого на гору Пюи-де-Дом, установил факт уменьшения давления с высотой. Позднее, во второй половине XVIII в., многочисленные метеорологические измерения при подъемах в Альпах выполнил швейцарский физик Соссюр.

В 1820 г. А. Гумбольдт провел обширные наблюдения в Южной Америке в Андах. Высокогорные обсерватории, на которых наблюдения можно проводить регулярно, появились позднее. Измерения, выполняемые на разных высотах в горах, дают интересный материал для исследования атмосферы, но они неполностью характеризуют условия свободной атмосферы. Настоящие исследования свободной атмосферы возможны только на летательных аппаратах, поэтому именно с развитием летательных аппаратов тесно связана история аэрологических исследований.

Исследования свободной атмосферы начались в полетах людей на воздушных шарах. Первый подъем человека на воздушном шаре был произведен в России в 1731 г. — подъячий Крякутский в Рязани поднялся на шаре, оболочка которого была наполнена нагретым воздухом. Следующий, более удачный полет на воздушном шаре произвели братья Монгольфье во Франции в 1783 г. Первым научным полетом следует считать полет американского врача Джеффриса с французским аэронавтом Бланшаром в 1784 г. Однако метеорологическое значение наблюдений, выполненных в первых полетах, было невелико из-за искажения измерений температуры влиянием солнечной радиации. Среди них интересен только полет академика Я. Д. Захарова, совершенный 30 июня 1804 г., который происходил после захода Солнца, и результаты измерений температуры не были искажены влиянием солнечной радиации. Кроме измерений температуры в этом полете производились разнообразные физические опыты, наблюдения за отклонениями магнитной стрелки и другие.

Первые систематические полеты с приборами на воздушных шарах осуществил английский ученый Уэлш в 1852 г., он же первый применил вентиляцию термометров. Однако по-настоящему надежными измерения температуры на аэростатах стали после изобретения Ассманом аспирационного психрометра в 1887 г. В этом психрометре термометры защищены от влияния солнечной радиации и вентилируются. Воздушные шары использовались для исследования атмосферы и производства физических опытов в воздухе многими известными учеными практически во всех странах. В России научные полеты возобновились в 1868 г., их выполняли М. А. Рыкачев, М. М. Поморцев, на воздушных шарах летали Д. И. Менделеев, С. И. Савинов, В. В. Кузнецов, Н. Н. Калитин и др. Измерения в этих полетах были очень тщательными. Особенно большая работа была проведена М. М. Поморцевым. Результаты первых 40 полетов были обработаны и опубликованы в 1891 г. Несколько позже (в 1897 г.) была издана вторая работа, содержащая научный отчет о 80 полетах. В работах М. М. Поморцева содержится много интересных и оригинальных наблюдений и обобщений, не потерявших значения и в наши дни.

Большая серия научных исследований на воздушных шарах была проведена в Германии под руководством Ассмана, Берсона и Зюринга. Особенную ценность представляют данные берлинских полетов, совершенных в 1888—1889 гг.

С 1940 г. свободные аэростаты (рис. 1.1) весьма широко использовались для специальных исследований атмосферы в Центральной аэрологической обсерватории. В послевоенные годы (1946—1952) в ЦАО был выполнен обширный комплекс наблюдений на свободных аэростатах, находящихся в длительном дрейфе. В некоторых случаях были осуществлены уникальные одновременные измерения на аэростатах, летящих на разной высоте. Эти аэростаты были оснащены разнообразной аппаратурой для метеорологических и актинометрических наблюдений. Исследования на аэростатах проводили С. С. Гайгеров, В. Г. Кастров, В. А. Белинский, П. Ф. Зайчиков, В. Д. Решетов, Н. З. Пинус, А. М. Боровиков и другие известные советские ученые. В. А. Белинский проанализировал результаты

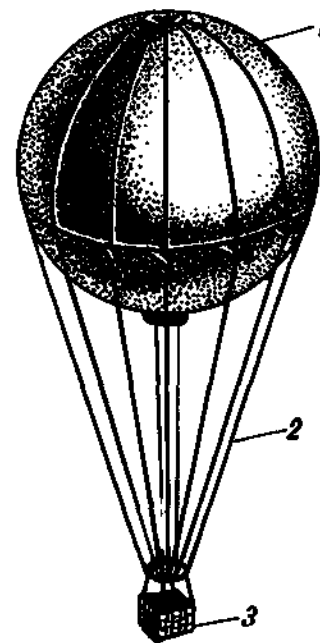


Рис. 1.1. Аэростат.

1 — оболочка; 2 — стропы; 3 — гондола.

актинометрических наблюдений и впервые сделал выводы о вертикальных, горизонтальных и временных вариациях прямой солнечной радиации, рассеянной, отраженной и суммарной радиации, альбедо различных поверхностей и других радиационных параметров. В. Г. Кастров и С. С. Гайгеров выполняли на аэростатах уникальные исследования термической трансформации движущегося воздуха, А. М. Боровиков получил первые данные о физическом строении облаков и микроструктуре облачных элементов.

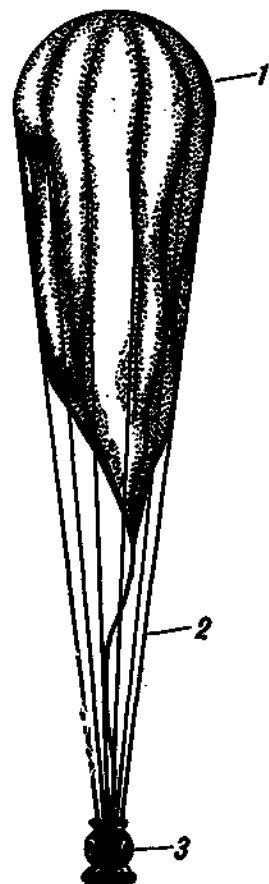


Рис. 1.2. Стратостат.
1 — оболочка; 2 — стропы; 3 — герметичная гондола.

Свободные аэростаты с открытыми гондолами имеют серьезный недостаток — ограниченную высоту подъема. Эти аэростаты обычно поднимаются до высоты около 5 км. Очень редко полеты аэростатов ЦАО с наблюдателями в открытой гондоле достигали 10—11 км. На больших высотах из-за уменьшения парциального давления кислорода работа наблюдателя затруднена. На возможность полета человека на большие высоты в герметичной гондоле указывал Д. И. Менделеев. В 1931—1932 гг. О. Пиккар впервые использовал для подъема наблюдателя металлическую герметичную гондолу, имеющую форму шара. Аэростат, поднимающийся в стратосферу до больших высот, называется *стратостатом* (рис. 1.2). Оболочка стратостата на земле наполняется на $\frac{1}{10}$ объема. По мере подъема газ внутри оболочки расширяется и она принимает сферическую форму. Пилоты и наблюдатели размещаются в герметичной гондоле, которая изготовляется из стали или алюминиевых сплавов. Гондола имеет иллюминаторы, закрытые толстыми прочными стеклами. Измерительные датчики размещаются снаружи, регистрирующая аппаратура — внутри гондолы.

Первый удачный полет стратостата в СССР был произведен 30 сентября 1933 г., стратонавты Г. А. Прокофьев, К. Д. Годунов и Э. К. Бирябаум поднялись на стратостате «СССР-1». Объем оболочки был равен 24 300 м³, стратонавты поднялись на высоту 19 000 м и выполнили большой комплекс наблюдений. Трагически закончился полет стратостата «Осоавиахим-1», который поднялся на высоту 22 000 м. Полет был выполнен 30 января 1934 г. экипажем в составе П. Ф. Федосеевко, А. Б. Ва-

сенко и И. Д. Усыскина, при спуске оболочка стратостата разорвалась и гондола упала. В предвоенные годы в СССР был выполнен целый ряд успешных подъемов стратостатов для исследования стратосферы. В связи с большой сложностью организации полетов и опасностью для жизни экипажа полеты стратостатов с людьми после войны стали очень редки. Один из последних — полет стратостата «Волга» в 1962 г. Пилоты-аэронавты П. И. Долгов и Е. И. Андреев поднялись на высоту 25 458 м, однако спуск был произведен на индивидуальных парашютах. Оболочка стратостата объемом 72 900 м³ была выполнена из полиэтилена.

В США для наполнения оболочек аэростатов и стратостатов применяют гелий. В 1935 г. американцы Стивенс и Андерсон поднялись на стратостате «Эксплорер-2» до высоты 22 066 м. Полеты на стратостатах, наполненных гелием, продолжались в США и после второй мировой войны.

На стратостатах производились разнообразные исследования: изучалась интенсивность космических лучей, солнечной радиации, брались пробы воздуха, проводились наблюдения за оптическими и электрическими явлениями и др.

Идея выполнения метеорологических наблюдений на шарах без людей была высказана примерно тогда же, когда началась подъемы воздушных шаров. Простейшими шарами являются шары-пилоты.

Шаром-пилотом называется небольшой шар, наполненный газом (водородом или гелием), выпускаемый в свободный полет. Такие шары могут быть использованы только для измерения скорости и направления ветра и определения высоты нижней границы облаков. Первые выпуски бумажных шаров-пилотов были выполнены в 1806 г. русскими моряками во время кругосветного плавания под руководством И. Ф. Крузенштерна.

Сначала шары изготовлялись из животной пленки, затем из бумаги, прорезиненного шелка и др. Аппендиксы у этих шаров были открыты, что приводило к изменению их вертикальной скорости. Только в 1901 г. Ассман ввел для аэрологических исследований резиновые шары-пилоты, обладающие почти постоянной скоростью.

Первые опыты по подъему приборов, автоматически регистрирующих температуру и давление воздуха, были произведены в Париже в 1892 г. Шар, поднимающий в атмосферу самопишущий прибор — метеорограф, называли *шаром-зондом*. После разрыва шара метеорограф опускался на парашюте или вспомогательном шаре. Метеорографы находили и возвращали в обсерваторию по указанному на нем адресу. Регулярные выпуски шаров-зондов в России производились с 1901 г. в Павловской обсерватории (под Петербургом). Благодаря этому методу в 1902 г. французский ученый Тейсеран де Бор открыл стратосферу.

Зондовые метеорографы были хорошо приспособлены для аэрологических измерений. Они отличались небольшим весом, малой инерцией и хорошей защитой от радиации. Диапазон измерения всех метеорологических элементов у метеорографов был большой, так как он предназначался для подъемов до высоты 30—35 км.

В СССР применяли метеорографы В. В. Кузнецова (рис. 1.3), а затем П. А. Молчанова. Весьма успешное соревнование раз-

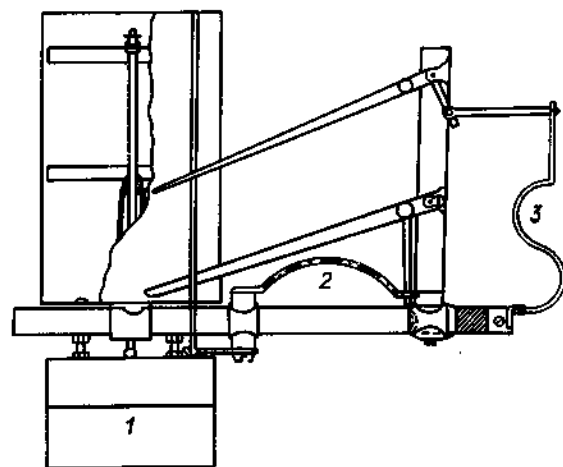


Рис. 1.3. Зондовый метеорограф В. В. Кузнецова.

1 — часовой механизм; 2 — приемник давления; 3 — биметаллическая пластинка.

вивалось между учеными и конструкторами за уменьшением веса и улучшение качества метеорографов. Так, немецкие метеорографы системы Бош-Хергезеля имели сначала вес 550 г, а позднее 350 г. Англичанин Дайнс построил метеорограф весом 40 г, убрав из него барабан и часовой механизм. В этом метеорографе запись температуры производилась алмазом на стеклянной пластинке, перемещаемой датчиком давления. Таким образом, в результате подъема метеорографа получалась кривая температуры в функции давления. Вайсала (Финляндия) в 1934 г. сконструировал метеорограф весом 18 г. В СССР П. А. Молчанов добился существенного уменьшения веса метеорографа, заменив часы для вращения барабана легкой ветрянкой. С помощью шаров-зондов была достигнута рекордная высота — около 36 000 м. Они широко применялись для научного исследования атмосферы в так называемые международные аэрологические дни.

Особенно успешными были исследования атмосферы с помощью шаров-зондов, проводившиеся в Москве. Благодаря большой плотности населения в окрестностях Москвы и отсутствию крупных озер, болот и т. п. возврат метеорографов достигал 95%. Иногда возвращались метеорографы, пролежавшие в лесу 2—3 года. Записи метеорографов всегда удавалось обработать и получить ценные результаты.

Однако при всех своих достоинствах метод шаров-зондов обладал рядом недостатков. Он неприменим в пустынях, в Арктике, на море и в других слабо населенных или необитаемых районах. Кроме того, результаты обработки метеорограммы могут быть использованы только после нахождения и возвращения приборов. Поэтому они совершенно непригодны для использования в оперативной работе службы погоды. Этот метод вскоре был заменен более удобным — методом радиозондов. В настоящее время метод шаров-зондов используется при проведении специальных исследований, например, для изучения космических лучей, для взятия проб воздуха, для актинометрических наблюдений и т. п.

В 1903 г. Хергезель предложил теорию метода шаров-пилотов, доказав, что их вертикальная скорость зависит только от подъемной силы и веса оболочки, т. е. от таких величин, которые могут быть найдены заранее до выпуска шара. Это дало возможность определять высоту шара как функцию времени. Таким образом, метод получил теоретическое обоснование и стал широко применяться в аэрологии.

Для наблюдения за шарами-пилотами потребовался особый теодолит с ломаной трубой. Такой теодолит был сконструирован де Кервенном. Вскоре В. В. Кузнецовым был предложен очень простой и удобный теодолит, который применялся в СССР для шаропилотных наблюдений в течение нескольких десятков лет. Одновременно получил развитие метод базисных наблюдений за шарами-пилотами, позволяющий определять высоту подъема шара тригонометрическим способом.

Метеорографы выпускались не только на шарах-пилотах, в конце XIX в. с помощью метеорографов в ряде стран выполнялись исследования пограничного слоя атмосферы. Метеорографы поднимались на воздушных змеях или привязных аэростатах, средняя высота подъема составляла 1,5—2 км, хотя в некоторых случаях удавалось достичь высоты 3 км. Наибольшая высота 9740 м была достигнута в аэрологической обсерватории в Линденберге около Берлина, в этом случае был применен «поезд» из нескольких змеев.

Воздушный змей представляет собой легкую конструкцию из поддерживающих и стабилизирующих поверхностей. Эта конструкция под действием ветра получает некоторую подъемную силу. Наиболее употребительные типы змеев, которые применялись для аэрологических подъемов, имели поперечные

сечения в виде прямоугольника, полуокружности и треугольника.

Метеорографы, поднимаемые на змеях, имели несколько иную конструкцию, чем зондовые. Вследствие большой тряски змейковый метеорограф должен быть более прочным. С его помощью можно записывать не только температуру, давление и влажность воздуха, но и скорость ветра.

Возможность подъема воздушного змея в большой степени зависит от погоды, змей не может подниматься при штиле или

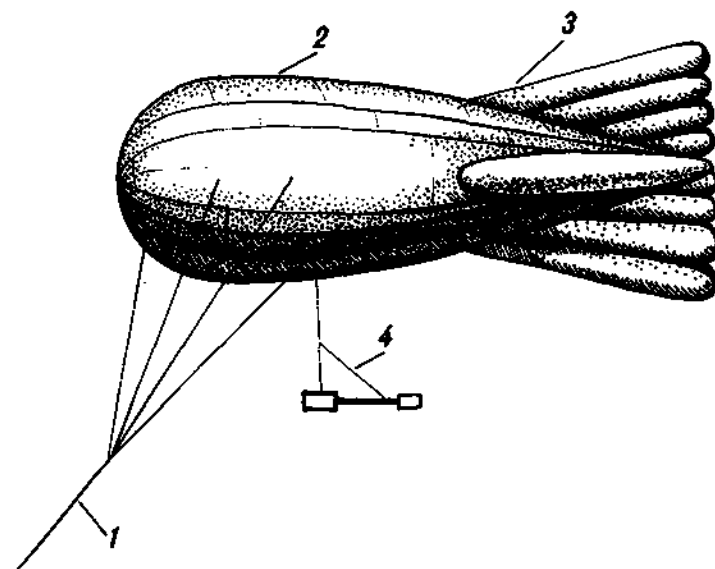


Рис. 1.4. Привязной аэростат.

1 — привязной трос; 2 — оболочка аэростата; 3 — стабилизирующее устройство; 4 — прибор.

малом ветре, поэтому более удобно проводить исследования пограничного слоя атмосферы с помощью метеорографов на привязных аэростатах, которые иногда называют еще змейковыми. Привязной аэростат (рис. 1.4) имеет удобообтекаемую сигарообразную форму. Для стабилизации в полете и для получения дополнительной подъемной силы он снабжается в хвостовой части специальными стабилизирующими устройствами. Таким образом, для подъема привязного аэростата используется как аэростатическая подъемная сила газа, которым наполняется аэростат, так и змейковый эффект, создаваемый стабилизирующим устройством. Привязные аэростаты до сих пор являются очень удобными для исследования пограничного слоя атмосферы, они широко применялись на научно-исследовательских

судах в Атлантическом тропическом эксперименте по программе исследований глобальных атмосферных процессов (ПИГАП) в 1974 г.

После зарождения авиации на смену шарам-зондам и привязным аэростатам пришли самолеты. В основном эта замена произошла в период с 1918 по 1939 г. С помощью самолетов было выполнено большое количество разнообразных исследований атмосферы и этот метод заслуживает более подробного упоминания, чем предыдущие.

Самолетное зондирование по сравнению с предшествовавшими ему методами имело немало преимуществ. На самолетах вместе с приборами поднимался также и наблюдатель-борт-аэролог, который существенно дополнял результаты измерений визуальными наблюдениями за облаками, туманами и видимостью на различных высотах. На самолетах появилась возможность проводить разнообразные наблюдения за облаками (измерения водности, интенсивности обледенения, фазового состава и микроструктуры облаков), а также получать данные о болтанке самолета, турбулентности и пр. Самолеты достигали больших высот и меньше зависели от погодных условий. Все это привело к тому, что самолет довольно быстро заменил привязные аэростаты и змеи.

Первый подъем метеорографа на самолете был произведен в 1912 г. по поручению Ассмана во Франкфурте-на-Майне.

В 1916 г. начались исследования атмосферы на самолетах в России, их инициатором был выдающийся ученый А. А. Фридман. Он проводил отдельные самолетные зондирования в связи с военно-метеорологическим обслуживанием. В 1921 г. В. И. Виткевич организовал регулярное самолетное зондирование атмосферы в Москве. В 1922 г. ежедневные самолетные подъемы стали проводить в Вашингтоне. После 1930 г. в США была организована сеть регулярного самолетного зондирования, а подъемы змеев совершенно прекратились.

В послевоенное время самолеты широко применялись для исследования арктических районов, где было невозможно проводить систематические выпуски радиозондов. В 1948 г. начала работать летающая метеорологическая обсерватория Арктического научно-исследовательского института (АНИИ), на которой на протяжении более чем 10 лет выполнялись разносторонние исследования атмосферы в Арктике, позволившие получить первые представления о структуре атмосферы в этом районе. В первых антарктических экспедициях (1958—1962 гг.) для этих же целей использовалась летающая метеорологическая обсерватория «Антарктида».

В 60-х годах в Советском Союзе действовало около 30 пунктов самолетного зондирования, на которых производились регулярные подъемы самолетов до высоты 5—6 км с последующей оперативной обработкой результатов зондирования и

подачей телеграмм. На сети самолетного зондирования использовались самолеты типа Ли-2 и Ил-12.

По мере развития авиации скорости самолетов все более возрастали. Вместе с этим увеличивалось вредное влияние трения и динамического давления на показания метеорографа, в связи с чем все измеренные этим прибором величины следовало тщательно исправлять. Таким образом, точность измерений с помощью самолетных метеорографов уменьшалась. Кроме того, метод самолетного зондирования дорогой и недостаточно оперативный. Возможностям массового применения, оперативности и малой стоимости удовлетворял разрабатываемый с 20-х годов метод *радиозондирования*.

Самолет уступает радиозондам в первую очередь в высоте подъема (радиозонды поднимаются до высоты 25—30 км), а также по ограничениям в погоде. В результате этих ограничений самолеты в оперативной практике были заменены радиозондами.

В настоящее время самолеты используются главным образом в качестве летающих лабораторий, оснащенных большим комплексом аппаратуры для наблюдений за состоянием атмосферы.

В Советском Союзе летающие лаборатории (самолеты Ил-18) имеют Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, Центральная аэрологическая обсерватория и Украинский научно-исследовательский гидрометеорологический институт (самолеты Ил-14).

Радиозондом называется физический прибор, который измеряет параметры состояния воздуха в свободной атмосфере и результаты измерений передает по радио. Параметры атмосферы (температура воздуха, давление, влажность и др.) при радиозондировании измеряются с помощью чувствительных элементов или датчиков, а скорость и направление ветра на разных высотах определяются по координатам радиозонда, которые получают путем наблюдений за ним в оптический теодолит или путем сопровождения его с помощью радиотеодолита или радиолокатора.

Приоритет в создании метода радиозондирования атмосферы принадлежит Советскому Союзу. Изобретателем радиозонда и метода его использования для исследования атмосферы является выдающийся советский ученый-аэролог Павел Александрович Молчанов.

Впервые идея метода радиозондов была высказана Молчановым в 1923 г.; он предложил прибор, подобный зондовому метеорографу с передатчиком, не записывающим своих показаний, а передающим их в виде радиосигналов на землю. Таким образом, данные зондирования могли быть получены немедленно и независимо от дальнейшей судьбы прибора. На созда-

ние действующего радиозонда, однако, потребовалось около семи лет.

Первый в мире успешный запуск радиозонда в свободный полет был осуществлен 30 января 1930 г. в 13 ч 44 мин по московскому времени с территории Аэрологической обсерватории в Павловске.

Радиозонд был прикреплен к связке резиновых шаров, наполненных водородом, которые унесли его вверх. Во время подъема прибор автоматически измерял температуру и давление воздуха и передавал результаты измерений на землю в виде условных радиосигналов. Последние сигналы, по которым еще можно было определить значение температуры воздуха, были приняты через 32 мин после начала полета на высоте 8300 м. После расшифровки принятых сигналов были получены следующие сведения о распределении температуры по высотам (табл. 1.1).

ТАБЛИЦА 1.1

Высота, м	Температура, °С	Высота, м	Температура, °С	Высота, м	Температура, °С
30	-11,0	3000	-15,9	6000	-28,5
350	-12,8	3500	-18,0	7000	-35,4
500	-11,6	4000	-20,3	7350	-38,0
1000	-11,0	4500	-22,8	7500	-38,6
1500	-11,4	4740	-24,5	7800	-40,7
2000	-12,0	5000	-24,5	8000	-40,7
2500	-13,7	5500	-25,9	8300	-40,7

Выпущенный прибор не был найден, однако результаты зондирования атмосферы от этого несколько не пострадали.

Первый успешный выпуск радиозонда в Германии состоялся в мае 1931 г. Во Франции первый выпуск, давший удовлетворительные результаты, был сделан в сентябре 1930 г., в Финляндии — в 1931 г., в США собственные радиозонды начали появляться только с 1935 г.

Первый радиозонд модели 1930 г. получил название гребенчатого радиозонда в связи с тем, что контактные шкалы в радиозонде собраны из пластинок, которые с одного края имеют зубцы прямоугольной формы и собраны в дугообразно изогнутый пакет. Каждая пластинка с зубцами несколько напоминает гребенку.

В первых конструкциях гребенчатого радиозонда влажность не измерялась. В процессе совершенствования радиозонда в него был введен узел влажности. Трубка Бурдона, использовавшаяся в первых моделях, была заменена блоком из двух

анероидных коробок. Некоторые модификации имели облакомер, отмечающий нижнюю и верхнюю границы облаков. Наиболее совершенной моделью гребенчатых радиозондов являлся радиозонд РЗ-049 (рис. 1.5). На этой модели закончилась модернизация гребенчатого радиозонда. В дальнейшем стали появляться приборы другого типа. Развитие метода радиозонди-

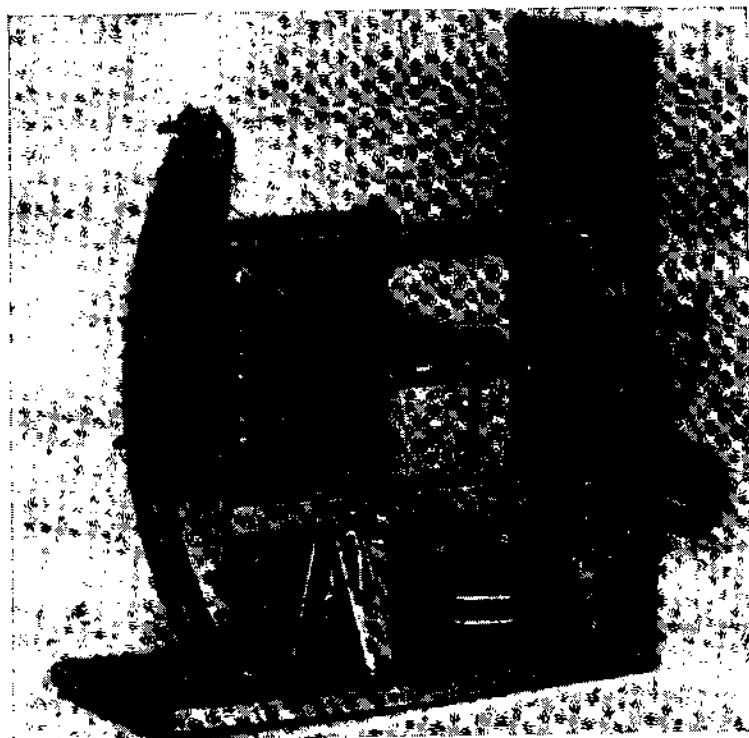


Рис. 1.5. Гребенчатый радиозонд РЗ-049.

рования пошло по пути повышения точности измерения параметров атмосферы и применения радиозонда в комплексе с радиолокационной техникой.

Вначале была создана система радиозондирования «Малахит» — А-22, затем появилась принципиально новая система зондирования «Метеор» — РКЗ, которая явилась основой для дальнейшего совершенствования и модернизации метода радиозондирования.

До появления радиолокации ветровые измерения велись методом шаров-пилотов, применение которого ограничено возмож-

ностью визуальных наблюдений. К тому же шаропилотным наблюдениям сильно мешает облачность. Уже первые опыты использования радиолокационных станций для сопровождения шаров с подвешенными системами пассивных отражателей показали большие перспективы применения нового метода. Его возможности принципиально исключали основное ограничение шаропилотного метода — работу только в зоне визуальной видимости.

Радиолокация наряду с использованием для прослеживания траектории радиозонда применяется для исследования атмосферы с земли. Применение радиолокационной техники для обнаружения и прослеживания областей ливневых осадков относится к послевоенным годам. В. В. Костарев, возглавивший разработку этого метода, доказал его эффективность и большое научное значение. Уже на начальной стадии этих работ радиолокационные данные о ливнях и грозах успешно применялись для краткосрочных прогнозов по Москве. Позднее удалось создать сеть радиолокационного штормового оповещения. Кроме обеспечения штормоповещения аэропортов эта сеть одновременно позволила выполнить ряд интересных и важных работ по изучению атмосферы. В настоящее время радиолокационная техника используется для изучения тонкой структуры ветра, турбулентности в облаках и осадках, а также для оценки благоприятных условий для активных воздействий на градовые облака.

Много усилий приложено для анализа и совершенствования методов радиолокационного измерения осадков на больших площадях. Для решения этой задачи нужны были подробные данные о спектрах размеров капель осадков и о детальном сравнении результатов, полученных путем радиолокационных наблюдений и на дождемерной сети. Большие перспективы открыло применение двухволнового радиолокатора.

Работы в области применения радиолокационных средств для исследований атмосферы позволяют осуществить дистанционные измерения некоторых параметров атмосферы и дают в руки исследователей хорошее современное средство для непрерывного контроля за состоянием атмосферы.

Развитие ракетной и космической техники дало возможность распространить аэрологические исследования на верхнюю атмосферу. Разработка метода ракетного зондирования атмосферы началась в 1949 г. в Центральной аэрологической обсерватории под руководством Г. И. Голышева и В. А. Путохина. Первая советская метеорологическая ракета МР-1 была выпущена уже в октябре 1951 г. Ракета была возвратной. Впервые был обеспечен спуск на полигон как аппаратуры, так и двигательной установки, что позволило заметно увеличить количество запусков ракет. Некоторые ракеты и комплекты приборов совершали по 2—3 подъема в высокие слои атмосферы.

В результате запусков ракет МР-1 были получены первые данные о температуре, плотности воздуха и ветре до высоты более 50 км. Эти совершенно новые данные о строении верхней атмосферы были серьезным достижением отечественной науки.

На смену МР-1 в 1957 г. пришла более удобная и легкая ракета ММР-1. Существенной особенностью советских метеорологических ракет было непосредственное измерение в полете температуры воздуха и давления. Разработка теории применявшихся для этих целей приборов потребовала значительных усилий в организации обширных лабораторных опытов. Парашют, предназначенный для спуска головной части ракеты с приборами (а позднее и сбрасываемые с ракеты специальные диполи-отражатели), позволил организовать также и наблюдения за ветром.

В 1964 г. вошла в строй советская метеорологическая ракета М-100, которая позволяет зондировать атмосферу до высоты 80 км. Существует также геофизическая ракета (МР-12) с высотой подъема 170 км. На геофизических ракетах определяется плотность атмосферы, ее состав и другие физические характеристики. По данным многочисленных подъемов ракет для нескольких пунктов СССР оказалось возможным построить диаграммы типичного распределения ветра и температуры до высоты 80 км.

В 1960-х годах для исследования атмосферы начали использоваться *искусственные спутники Земли* (ИСЗ). В Советском Союзе была создана постоянно действующая система метеорологических спутников «Метеор».

На ИСЗ «Метеор» установлена аппаратура для получения телевизионных снимков облачного покрова, для измерения уходящей коротковолновой и длинноволновой радиации, а также спектральные приборы для восстановления профиля температуры и обнаружения зон осадков.

Актуальной проблемой физики атмосферы является исследование метеорологических объектов (облаков, туманов, атмосферных дымок, инверсий и других явлений) при помощи *оптических систем*.

Наиболее перспективными приборами в этом направлении являются лазерные локаторы, основной частью которых являются оптические квантовые генераторы (лазеры), которые представляют собой в принципе новые источники излучения. Обычно их называют лидарами. Эти системы дают возможность в принципе получать при однократном зондировании практически мгновенные температурные разрезы атмосферы. Большая частота посылок зондирующего импульса позволяет проследивать быстрые изменения исследуемых параметров. Эти особенности лидаров привели к тому, что в середине 60-х годов возник новый перспективный метод исследования атмосферы — *лазерная локация*.

1.3. Развитие аэрологических исследований в Советском Союзе

Развитие науки об атмосфере тесно связано с развитием общества. Те достижения, которые имеет советская аэрология, как и вся советская наука, определились великим историческим путем, пройденным советским народом под руководством Коммунистической партии. Эти достижения определились государственным строем, созданным под руководством В. И. Ленина.

Великая Октябрьская социалистическая революция создала все необходимые условия для подлинного расцвета науки в СССР, в частности, для развития аэрологии.

21 июня 1921 г. Совет Народных Комиссаров РСФСР за подписью В. И. Ленина вынес решение об организации метеорологической службы РСФСР. Работам по метеорологии было придано общегосударственное значение.

Центральным аэрологическим учреждением долгие годы являлась Аэрологическая обсерватория в Павловске, руководителем которой был выдающийся советский аэролог П. А. Молчанов. С его именем связаны новые методы аэрологических исследований и новые приборы, в том числе круг Молчанова (планшет для обработки шаропилотных наблюдений), аэрологический самопишущий теодолит, зондовый метеорограф с ветрянкой вместо часового механизма, змейковый метеорограф с приемником для изучения порывистости ветра, самолетный метеорограф, треугольный дюралюминиевый змей, привязной аэростат с жесткими стабилизаторами и др. Самым выдающимся достижением этой обсерватории является разработка нового метода исследования свободной атмосферы — метода радиозондов.

В Павловской обсерватории были проведены также важные методические работы. К ним относятся: исследование влияния турбулентности на вертикальную скорость шаров-пилотов, основанное, в частности, на систематических базисных наблюдениях; разработка методов измерения порывистости ветра в свободной атмосфере; большой цикл работ, посвященных исследованию точности аэрологических измерений; непрерывные работы по усовершенствованию и модернизации радиозондов, в результате которых появились новые конструкции радиозондов, например коммутаторный радиозонд.

Большое внимание уделялось Павловской обсерваторией организации сети шаропилотных станций (1924 г.), а затем радиозондовых станций (1934 г.). Создание сети радиозондовых станций дало возможность Центральному бюро погоды использовать данные радиозондирования в практике службы погоды.

В 1920 г. в Москве была организована Аэрологическая обсерватория, в которой с 1921 г. проводились регулярные исследования атмосферы на самолете. Еще раньше, в 1919 г., в Москве были начаты шаропилотные и змейковые наблюдения, а несколько позже — подъемы шаров-зондов и привязных аэростатов. Руководитель обсерватории В. И. Виткевич в 1920 г. впервые в СССР применил акустический метод для исследования атмосферы.

Большую работу по созданию научного оборудования для полета стратостатов в 1933 и 1934 гг. провел коллектив Главной геофизической обсерватории (С. И. Савинов, Н. Н. Калитин, П. Н. Тверской, М. И. Гольцман).

По инициативе О. Г. Кричака, С. С. Гайгерова, Н. З. Пинуса и других ученых в 1940 г. московская Аэрологическая обсерватория была переведена в г. Долгопрудный (под Москвой) и преобразована в Аэрологическую обсерваторию Центрального института прогнозов. Обсерватории передали большое количество свободных аэростатов вместе со штатом высококвалифицированных воздухоплавателей.

8 сентября 1941 г. Аэрологическая обсерватория ЦИПа была реорганизована в Центральную аэрологическую обсерваторию (ЦАО). Ее деятельность основывалась на широком использовании воздухоплавательных средств для различных экспериментальных работ. Основной лабораторией при этом была сама атмосфера. Изучалась трансформация движущихся воздушных масс, физика и микрофизика облаков, атмосферные фронты. Кроме того, с самого начала своей деятельности обсерватория приступила к изучению высоких слоев атмосферы. Особое место занимали высотные полеты субстратостатов. В этих исследованиях участвовали О. Г. Кричак, С. С. Гайгерер, Н. З. Пинус, В. А. Белинский, П. Ф. Зайчиков, А. М. Боровиков, В. Д. Решетов и ряд других сотрудников обсерватории.

С началом Великой Отечественной войны полеты были прекращены, многие сотрудники ушли на фронт. Научная работа в обсерватории велась в двух направлениях: в области разработки новых методов аэрологических наблюдений и в области конструирования приборов и проведения оперативных наблюдений для службы погоды войск противовоздушной обороны. Наблюдения не прерывались ни на один день, несмотря на то что было очень много трудностей, связанных с необходимостью находить радиозонды и ремонтировать их для следующих выпусков. Проводилось также самолетное зондирование атмосферы.

В 1943 г. в Главном управлении гидрометслужбы встал вопрос о создании общесоюзного аэрологического центра, так как Аэрологическая обсерватория в г. Павловске была полностью разрушена фашистами. Было принято решение возложить функции всеобщего аэрологического центра на ЦАО. Тогда же было определено, что ЦАО должна быть научно-методическим центром, ответственным за состояние аэрологических наблюдений в нашей стране, а также научно-исследовательским центром, имеющим широкие возможности для непосредственного проведения экспериментов в атмосфере, применяя для этого самые современные средства аэрологических наблюдений.

В послевоенные годы ЦАО сыграла огромную роль в восстановлении аэрологической сети нашей страны. Уже в 1946 г. сеть радиоветрового зондирования насчитывала 22 станции, существовало около 100 станций радиозондирования и 300 шаропилотных пунктов. В обсерватории велась очень кропотливая работа по подготовке наставлений и руководств для аэрологической сети.

Хороший аэростатный парк в обсерватории позволил в течение 1947—1954 гг. провести серию интересных полетов на аэростатах с целью изучения трансформации движущихся воздушных масс. В этот же период там велись работы по созданию автоматических стратостатов. В 1948 г. с летной площадки обсерватория впервые в мире был запущен такой стратостат с грузом 125 кг, который поднялся на высоту 22 км. В последующие годы с помощью аппаратуры, поднимаемой на стратостатах, был осуществлен широкий комплекс исследований верхней атмосферы.

1947—1948 гг. особое внимание было уделено изучению облаков и их микрофизики. Эти исследования проводились под руководством А. Х. Хргиана и А. М. Боровикова. В результате обширнейших летних исследований облачности с помощью аэростатов и самолетов в ЦАО собран единственный в мире по полноте, по охвату разнообразных географических и климатических районов и качеству экспериментальный материал об облаках. Исследования облаков положили основу для разработок методов активных воздействий на облака и осадки. В течение последних лет большие усилия в этой области науки были направлены на борьбу с градом, был разработан и успешно внедрен метод противогололедной защиты ценных сельскохозяйственных культур.

К послевоенным годам относится применение радиолокационной техники для обнаружения облаков и прослеживания зон осадков, в настоящее время развиваются радиолокационные методы изучения структуры ветра, турбулентности, фазового состояния облаков и других параметров атмосферы. На самолетах ЦАО под руководством Н. З. Пинуса был выполнен обширный круг исследований турбулентности свободной атмосферы. Изучение турбулентности ясного неба, не связанной с видимыми облаками, оказалось наиболее важным для авиации, в особенности при полетах в стратосфере. Вплотную к нему

примыкают исследования динамики мощной атмосферной конвекции, которыми руководит С. М. Шметер.

Крупным шагом вперед в развитии метеорологической науки явились ракетные исследования, за последние два с лишним десятилетия пройден путь от первой советской ракеты МР-1 до серийных метеорологических ракет М-100, ММР-06, МР-12, создана сеть ракетного зондирования. Получены совершенно новые данные о строении верхней атмосферы до высот порядка 100 км. Работами в этом направлении руководит Г. А. Кокин. В 1965 г. в ЦАО начаты работы по применению лазеров для изучения различных атмосферных явлений (руководитель В. М. Захаров).

В ЦАО еще с 1948 г. производятся измерения солнечной и длинноволновой радиации в свободной атмосфере. Для этого вначале был использован аэростат, затем самолет, поднимавшийся до высот 6—7 км. Работами в области актинометрии и атмосферной оптики весьма плодотворно руководил В. Г. Кастров. Важным шагом вперед было создание специального актинометрического радиозонда АРЗ—ЦАО, позволяющего измерять потоки длинноволновой радиации Земли и атмосферы до высоты 30—35 км.

Наряду с развитием новых методов исследования свободной атмосферы в ЦАО непрерывно велись работы по развитию и реконструкции аэрологической сети. Сейчас в нашей стране регулярно действует около 223 пунктов температурно-ветрового зондирования, проводятся систематические аэрологические наблюдения в Центральной Арктике на станциях «Северный полюс», в Антарктиде и на многих научно-исследовательских судах в Мировом океане. Обеспечить бесперебойную и высококачественную работу такого количества станций — это большое и трудное дело, значительный вклад в него внесли сотрудники отдела аэрологии ЦАО во главе с В. Д. Решетовым, О. В. Марфенко и Г. П. Трифионовым.

С течением времени техническое оснащение аэрологической сети сильно изменилось. Вместо оптических теодолитов применяются радиотеодолиты и радиолокаторы. Созданы новые типы радиозондов, которые заменили прослуживший много лет первый в мире гребенчатый радиозонд. В последние годы для комплексного ветрового и температурного зондирования атмосферы разработана наиболее совершенная система «Метеорит-2» — РКЗ-5. Эта система имеет большую дальность действия и точность определения координат. Система дополнена комплексом ОКА-3 для автоматической обработки данных зондирования, в котором сигналы радиозонда преобразуются в цифровую форму для передачи в вычислительные центры и последующей обработки на ЭВМ.

На протяжении всех лет Центральная аэрологическая обсерватория была и остается научно-методическим центром, ответственным за состояние и развитие аэрологических измерений в стране. В своей деятельности коллектив ЦАО всегда учитывает практические нужды Гидрометслужбы и специальные проблемы, связанные с интересами народного хозяйства и с обороной страны.

Как научно-исследовательский центр ЦАО, каким она является, располагает широкими возможностями дальнейшего проведения и развития экспериментов в атмосфере до самых больших высот. Основной лабораторией для этих экспериментов является сама атмосфера Земли на разных широтах и в самых различных состояниях.

Одной из важнейших задач аэрологии на современном этапе является переход к комплексным исследованиям крупномасштабных атмосферных процессов, их физического механизма и эволюции во времени и пространстве. Для решения этой задачи необходимо совершенствовать методы наблюдения и исследовать явления в нижней и верхней атмосфере.

1.4. Прямые и косвенные методы исследований свободной атмосферы

Методы исследований атмосферы можно условно разделить на следующие две основные группы: 1) прямые методы, 2) косвенные методы.

Косвенные методы в свою очередь могут быть подразделены на активные и пассивные.

Прямые методы исследований (иногда их называют контактными) основаны на применении тех или иных приборов, поднимаемых непосредственно на ту высоту, на которой нужно произвести измерения. Подъем приборов осуществляется с помощью различных средств, описанных в п. 1.2.

С помощью радиозондов производятся измерения температуры и давления воздуха, скорости и направления ветра, количества содержащегося в атмосфере водяного пара, потоков радиации, озона и др. В среднем высота радиозондирования составляет 30—35 км, в отдельных случаях 40—45 км. Радиозондирование является в настоящее время наиболее широко и регулярно используемым методом изучения нижнего 30-километрового слоя атмосферы.

Для целей радиозондирования в разных странах создана специальная сеть пунктов, на каждом из которых подъемы радиозондов осуществляются в определенное время ежедневно по 2—4 раза в сутки.

С помощью аппаратуры, поднимаемой на автостратостатах (стратостатах без наблюдателя), самолетах и ракетах, помимо измерения основных параметров производится изучение химического состава и загрязнения атмосферы, радиационных потоков и плотности воздуха. Комплекс исследований, производимых с помощью ракет и искусственных спутников, весьма широк. С их помощью исследуется состав атмосферы, ее температура, давление и плотность, космические лучи, ультрафиолетовое, рентгеновское и корпускулярное излучение Солнца, а также земное магнитное поле, ионосфера, метеориты и ряд других явлений.

Для измерения температуры, давления и плотности воздуха в разных слоях атмосферы прямыми методами применяются разнообразные типы приборов, основанные на различных физических принципах.

Общим для всех перечисленных методов является непосредственный контакт аппаратуры с изучаемой средой. Скорость и направление ветра определяются путем оптического или радиолокационного прослеживания за движением шара или каких-либо специальных предметов или веществ, выбрасываемых для этой цели с ракет (головная часть ракеты, спускающаяся на парашюте; дымовые облака; облака светящегося газа и др.). Движущийся предмет является непосредственным указателем движения воздушного потока.

Состав атмосферы для высот, которые не превышают 100 км, исследуют путем забора проб воздуха с помощью специальных баллонов, поднимаемых на соответствующие высоты, и последующего их химического анализа в лаборатории. Для изучения состава атмосферы выше 100 км с помощью ра-

кет и искусственных спутников Земли используются специальные приборы, называемые масс-спектрометрами. Принцип их работы основан на взаимодействии магнитных и электрических полей, создаваемых в приборе, с потоками электрически заряженных молекул. Это взаимодействие определенным образом зависит от массы молекулы, что и позволяет решить вопрос о массах присутствующих молекул и тем самым определить состав исследуемой смеси газов.

Косвенные методы позволяют изучать явления, происходящие в атмосфере, не вмешиваясь в их природу (на расстоянии).

С помощью *активных косвенных методов* изучаются такие явления, которые связаны с посылаемыми с Земли различными сигналами: звуковыми (акустический метод), световыми (прожекторный и лазерный методы) или радиосигналами (радиометоды).

Пассивные косвенные методы основаны на регистрации различных видов энергии от естественных атмосферных процессов. К таким явлениям относятся метеоры, полярные сияния, свечение ночного неба, серебристые облака, изменения яркости неба во время сумерек, спектральное поглощение радиации.

Косвенные методы, как и прямые, широко применяются при изучении высоких слоев атмосферы. Различные косвенные методы применимы на разных высотах.

Рассмотрим состав и строение земной атмосферы, изученные с помощью всего комплекса методов исследования атмосферы.

1.5. Строение атмосферы

Описанные выше разнообразные методы определения характеристик атмосферы позволили изучить ее состав и строение практически на всех высотах от поверхности земли до границы, где она постепенно переходит в межпланетное пространство.

Одним из главных свойств атмосферы является ее большая неоднородность как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении. Разнообразны температурные условия движения воздушных масс, неоднороден ее состав. В разных слоях атмосферы наблюдаются неодинаковые метеорологические и оптические явления.

До высоты примерно 100 км атмосфера сравнительно однородна по составу и молекулярный вес воздуха в ней постоянен. Вблизи поверхности земли сухой атмосферный воздух содержит 78,08% азота, 20,95% кислорода, 0,93% аргона, 0,03% углекислого газа и 0,01% таких газов, как водород, неон, гелий, криптон, ксенон, аммиак, перекись водорода, иод, радон. Процентное содержание этих основных составляющих атмосферного воздуха характеризуется большим постоянством во времени и одинаково в разных географических районах.

Кроме того, в атмосфере содержится еще небольшое количество водяного пара и озона (соответственно 0—4 и 0,000001%), а также пыли—твердых частиц земного и космического происхождения. В отличие от других газовых составляющих атмосферного воздуха, количество водяного пара и озона в атмосфере весьма изменчиво. Оно сильно меняется от дня ко дню и от сезона к сезону и различно в разных географических районах. Несмотря на то что по сравнению с основными составляющими они содержатся в воздухе в небольшом количестве, их роль в атмосферных процессах весьма существенна. Так, водяной пар и озон вместе с углекислым газом и кислородом способствуют установлению теплового режима атмосферы, особенно на больших высотах. Кроме того, присутствие водяного пара в атмосфере обуславливает образование облачности и осадков.

Выше 100 км происходит диссоциация молекул газов и молекулярный вес воздуха уменьшается. На высотах около 1000 км начинают преобладать более легкие газы—гелий и водород, а на еще больших высотах атмосфера Земли постепенно переходит в межпланетный газ.

1.5.1. Разделение атмосферы на различные слои

Несмотря на большое разнообразие условий в атмосфере на разных высотах, оказывается возможным и практически удобным рассматривать атмосферу как состоящую из нескольких слоев, в которых те или иные основные, наиболее важные свойства оказываются достаточно сходными. Отдельным слоям при этом даются определенные названия. Такое деление позволяет более отчетливо представить себе общую схему строения атмосферы и те характерные свойства, которые присущи тем или иным атмосферным слоям.

Разделение атмосферы на слои в разных случаях производится различным образом в зависимости от того, какие именно свойства атмосферы (тепловое состояние, динамика, электрические свойства, содержание основных или переменных составляющих) кладутся в основу разделения. Наиболее часто в основу такого разделения кладется одно из наиболее важных свойств атмосферы—ее термическое состояние. Мы рассмотрим общую схему строения атмосферы (используя терминологию, наиболее часто употребляемую в настоящее время), в которой разделение атмосферы на слои делается именно исходя из ее термического состояния.

На рис. 1.6 представлено среднее вертикальное распределение температуры воздуха в атмосфере. Этот профиль показывает, что температура весьма сложным образом изменяется с высотой. Характер распределения температуры с высотой различен в разных географических районах и значительно изме-

няется во времени. Изменения температуры воздуха могут вызываться разными причинами: изменчивостью теплового баланса атмосферы и земной поверхности в связи с колебаниями количества поступающей солнечной радиации, например, при переходе от дня к ночи, от зимы к лету (суточный и сезонный ход температуры), а также различными сложными процессами в атмосфере, связанными с движениями воздуха. По характеру

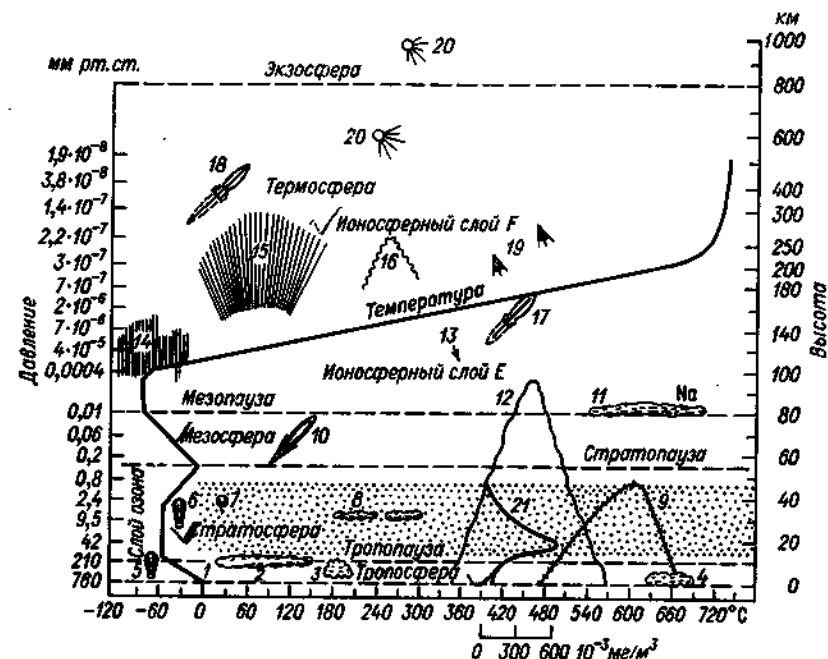


Рис. 1.6. Строение атмосферы и методы ее исследования.

1 — уровень моря; 2 — перистые облака; 3 — кучевые облака; 4 — слоистые облака; 5 — свободный аэрозоль; 6 — стратостат; 7 — радиозонд; 8 — перламутровые облака; 9 — отражение звуковых волн; 10 — ракета М-100; 11 — серебристые облака; 12 — слой отражения средних радиоволн; 13 — метеоры; 14, 15 — полярные сияния; 16 — отражение коротких радиоволн; 17 — ракета МР-12; 18 — геофизическая ракета; 19 — пилотируемые космические корабли; 20 — метеорологические спутники Земли; 21 — вертикальное распределение озона над средними широтами.

изменения температуры с высотой атмосфера разделяется на пять основных слоев (рис. 1.6).

Согласно схеме разделения атмосферы на слои, приведенной на рис. 1.6, за границы между слоями принимаются высоты, где происходит резкий изгиб температурной кривой. При этом в пределах одного слоя характер распределения температуры по высоте остается в общем неизменным.

Нижний слой атмосферы, который характеризуется падением температуры с высотой (примерно 6°C на 1 км), назван *тропосферой*. Лежащий над ним слой характеризуется в общем

повышением температуры с высотой и называется *стратосферой*. Граница между тропосферой и стратосферой называется *тропопаузой*. В нижней части стратосферы до уровня 25—30 км температура мало зависит от высоты и нередко даже падает с увеличением высоты. Верхняя граница стратосферы — *стратопауза* — расположена на высоте, соответствующей максимуму температуры (примерно 0°C и даже выше). Слой над стратопаузой, в котором температура уменьшается с высотой, назван *мезосферой*, на его верхней границе — *мезопаузе* — температура может достигать —80 ... —130°C. Над мезопаузой лежит слой, характеризующийся повышением температуры с высотой и называемый *термосферой*.

Высоты отдельных слоев и границ между ними, а также толщины слоев испытывают значительные колебания во времени и в пространстве. В среднем границы между слоями располагаются на следующих высотах: тропопауза 9—17 км (средняя высота на экваторе 17 км, на полюсе 9—10 км); стратопауза 45—55 км; мезопауза 80—85 км.

Кроме указанного деления атмосферы на слои, еще весьма часто выделяются слои не по характеру распределения температуры, а с учетом некоторых особых физических свойств, присущих атмосфере на разных высотах. Такими слоями, в частности, являются озоносфера, ионосфера и экзосфера.

Под озоносферой понимается слой от 10 до 50 км, в котором расположена основная масса озона.

Ионосферой называют слой, расположенный выше 80 км, т. е. примерно там, где находится термосфера. Она получила такое название вследствие большого количества ионов в этом слое.

Экзосфера — внешняя область атмосферы, нижняя граница которой расположена на высоте 800 км. Иногда этой слой называется сферой рассеяния.

1.5.2. Стандартная атмосфера

Большое количество разнообразных методов исследования свободной атмосферы позволило ученым получить представление о составе воздуха, а также о строении атмосферы. Накопленная в течение многих лет информация позволяет изучить изменения в состоянии различных слоев атмосферы и получить средние характеристики атмосферы. На основе этих данных учеными разработана модель стандартной атмосферы.

Под *стандартной атмосферой* понимается совокупность параметров, характеризующих среднее состояние атмосферы. Вначале стандартная атмосфера имела значение как основа для расчета авиационных приборов. В дальнейшем эти данные стали использоваться для проектирования авиационной техники и градуировки приборов и для обработки геофизических и метеорологических наблюдений.

В качестве основы для разработки Международной стандартной атмосферы (МСА) был использован профиль температуры, наиболее близкий к среднему годовому для северного полушария. Развитие летательной техники

вызывает необходимость исследовать широтную, сезонную и долготную неоднородность параметров атмосферы и учитывать эти новые данные при стандартизации путем разработки справочных и дополнительных атмосфер. Чем больше мы будем иметь информации о состоянии атмосферы, тем более подробные и близкие к реальным модели стандартных атмосфер сможем составлять. Поэтому работа по уточнению и расширению параметров стандартной атмосферы неразрывно связана с развитием методов исследования свободной атмосферы.

1.6. Мировая аэрологическая сеть. Глобальное изучение атмосферы

Поверхность нашей планеты, в особенности суши, разделена границами на территории различных государств, в атмосфере же границ нет и они не могут существовать. Для понимания состояния атмосферы в том или ином месте земного шара совершенно необходимо иметь информацию об ее истории, т. е. об ее состоянии в тех районах, из которых пришла воздушная масса. Поэтому уже давно метеорологам стало ясно, что для понимания общей циркуляции атмосферы необходимы усилия всех стран в организации метеорологических и аэрологических наблюдений и в сборе информации.

Существенную роль в истории исследований свободной атмосферы сыграла Международная аэрологическая комиссия, образованная в 1896 г., которая впоследствии именовалась «Международная комиссия научного воздухоплавания», «Международная комиссия для исследования свободной атмосферы» и, наконец, до 1945 г. «Международная аэрологическая комиссия».

После 1945 г. была основана Всемирная метеорологическая организация (ВМО), в которой имеется Комиссия по аэрологии.

Международная комиссия установила международные дни для повсеместных одновременных наблюдений, имеющих большое значение для изучения атмосферы.

Русские ученые М. А. Рыкачев, М. А. Поморцев и В. В. Кузнецов принимали участие в работе Международной аэрологической комиссии и в проведении международных исследований.

В истории аэрологии особую роль сыграли также международные годы, в которых участвовали многие страны. Во время Международных полярных годов (МППГ), организованных в 1882/83 и 1932/33 гг., были проведены обширные аэрологические наблюдения. За период Международного геофизического года (МГГ) (1957—1958) была осуществлена широкая всемирная программа аэрологических исследований. Совместная работа продолжалась и в дальнейшем в период Международного геофизического сотрудничества (МГС) в 1959 г.

В работе по программе МГГ и МГС участвовало более 50 стран, причем Советскому Союзу принадлежит одно из первых мест как по разнообразию исследуемых проблем, так и по масштабу выполненных работ.

Интенсивное развитие науки и техники позволило выдвинуть ряд новых глобальных (как в географическом, так и в международном смысле) проблем, без разрешения которых трудно представить дальнейший прогресс в развитии всего человеческого общества. Одна из таких проблем — проблема изучения окружающей среды — требует четкого и ясного понимания различных механизмов, действующих в атмосфере, океане и на подстилающей поверхности. Уровень знаний об этих механизмах совершенно недостаточен для решения даже чисто метеорологических задач, таких, как изучение климата и его изменений, разработка надежных методов прогноза погоды и ее отдельных элементов на сроки различной заблаговременности, разработка методов

активного воздействия на ураганы, штормы и другие стихийные метеорологические явления с целью уменьшения ущерба и т. д.

Метеорологи многих стран мира, отчетливо представляя невозможность интенсивного изучения глобальных атмосферных процессов силами отдельных стран, разработали проект международной Программы исследования глобальных атмосферных процессов (ПИГАП).

В 1967 г. две крупнейшие организации, объединяющие метеорологов, а именно Международный совет научных союзов (МСНС — неправительственная организация) и Всемирная Метеорологическая Организация (ВМО — правительственная организация), пригласили видных ученых из различных стран мира для того, чтобы четко сформулировать, во-первых, цели и задачи ПИГАП, а во-вторых, требования к наблюдательным системам, которые необходимо иметь во время проведения ПИГАП, чтобы решить поставленные задачи.

В настоящее время в официальных документах используется следующее определение ПИГАП. Это программа, предназначенная для изучения тех физических процессов в тропосфере и стратосфере, которые имеют важное значение для понимания:

а) изменяющихся атмосферных процессов, проявляющихся в крупномасштабных колебаниях, которые обуславливают изменение погоды, что будет способствовать увеличению точности прогноза на период от одного дня до нескольких недель;

б) факторов, которые определяют статистические свойства общей циркуляции атмосферы, что приведет к лучшему пониманию физической основы климата.

Таким образом, осуществление этой программы будет иметь большое научное и практическое значение, особенно для долгосрочных прогнозов погоды и теории общей циркуляции, для создания физических основ теории климата и возможных его изменений под действием различных факторов, в том числе и искусственных.

Для успешного осуществления сложного глобального эксперимента необходимо предварительно провести большую организационную работу, решить, что принципиально важно, ряд отдельных физических проблем и хотя бы приблизительно привести наши знания о метеорологических процессах над различными районами земного шара к одному и тому же уровню. Известно, что степень изученности процессов в полярных областях, в южном полушарии и в тропической зоне гораздо ниже, чем над средними широтами и в северном полушарии.

Глобальное наступление геофизиков на атмосферу и гидросферу планируется на 1978—1980 гг., так как оно требует тщательной и всесторонней подготовки. В рамках проведения Первого глобального эксперимента ПИГАП (ПГЭП) будут организованы различные специальные наблюдательные периоды.

В июне—сентябре 1974 г. в центральной части Атлантики был осуществлен первый в мире крупнейший международный Атлантический тропический эксперимент ПИГАП (АТЭП) с целью исследования атмосферных процессов в тропической зоне и изучения взаимодействия атмосферы и океана. В эксперименте АТЭП участвовало около 3000 человек, в том числе 1500 советских ученых, 31 научно-исследовательское судно, 12 самолетов и многие наземные станции.

Еще при обсуждении ПИГАП было решено планировать и проводить наблюдения в полярных областях Земли в виде отдельной подпрограммы «Полярный эксперимент» (ПОЛЭКС). Эту подпрограмму с 1971 г. выполняет Арктический и антарктический научно-исследовательский институт. Если тропики интересны для изучения в первую очередь тем, что они являются областями накопления энергии и притока тепла, то полярные районы, напротив, являются основными областями стока (потери) энергии. Одной из главных задач ПОЛЭКСа является количественная оценка роли атмосферы и океана в формировании их энергетического баланса. В зависимости от района исследований ПОЛЭКС подразделяется на ПОЛЭКС-юг — изучение Антарктиды и прилегающих к ней морей и ПОЛЭКС-север — изучение Арктики.

Кроме того, в рамках ПГЭП в Индийском океане организуется международный муссонный эксперимент (МОНЭКС), который планируется на 1979 г. В порядке подготовки к нему в мае—августе 1977 г. в центральной части Индийского океана и в Аравийском море проведен международный эксперимент «Муссон-77». Ученые думают о новых экспериментах: проект глобального аэрозольно-радиационного эксперимента (ГАРЭКС) подготовлен группой ленинградских ученых во главе с К. Я. Кондратьевым. Специалисты по радиации и облакам обсуждают СТРАТЭКС — эксперимент по изучению бюджета массы, тепла и влаги и радиационных свойств слоистообразных облаков (St, Sc).

Эти отдельные программы осуществляются с целью конкретизации всех составных частей ПИГАП и усиления направленности глобальных наблюдений на решение основных задач современной метеорологии — улучшения методов прогноза погоды и выяснения физических причин изменения климата и его колебаний.

Практически в ПИГАП принимают участие все страны мира, поскольку одной из важнейших наблюдательных систем является сеть станций Всемирной службы погоды (ВСП). Она включает в себя как метеорологические, так и аэрологические станции, а также большое количество научно-исследовательских судов погоды. Помимо вклада регулярной, постоянно действующей сети ВСП, многие страны вносят дополнительный вклад в ПИГАП, который определяется возможностями страны, степенью организации научно-исследовательской и оперативной гидрометеорологической работы в каждой стране, а также спецификой региональных проблем.

Огромное количество информации, получаемое уже сейчас, и то, которое будет получено в период проведения ПИГАП, нужно очень быстро и оперативно обработать, объединить и сделать доступным для ученых. Поэтому в таких крупнейших странах, как СССР и США, созданы Мировые центры данных (МЦД). У нас в стране в Москве и Обнинске, Калужской области, при Всесоюзном научно-исследовательском институте гидрометеорологической информации имеется Мировой центр данных МЦД-Б, центр МЦД-А находится в Вашингтоне (США).

2 ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА В АТМОСФЕРЕ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ НА АЭРОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ

Ветром называют движение воздуха относительно земной поверхности, вся система воздушных течений на Земле составляет общую циркуляцию атмосферы. Вихревые движения крупного масштаба — циклоны и антициклоны, постоянно возникающие в атмосфере, делают систему воздушных течений очень сложной.

С перемещениями воздуха в процессе общей циркуляции связаны основные изменения погоды: воздушные массы, перемещаясь из одних областей Земли в другие, приносят с собой другие условия температуры, влажности и облачности. Ветер вызывает волнение водных поверхностей, многие океанические течения, дрейф льдов; он участвует в процессах эрозии и рельефообразования. Ветер — это ураганы, штормы, сильные воздушные течения в верхней атмосфере.

Изучение ветра во всей толще атмосферы необходимо вследствие тесного взаимодействия воздушных течений в системе общей циркуляции. Ветер является важнейшим элементом для прогноза погоды, поэтому на многих аэрологических станциях измерение температуры и влажности в атмосфере производится два раза в сутки, а измерение скорости и направление ветра — четыре раза.

Направление ветра определяется направлением, откуда дует ветер, и измеряется в градусах от северного румба по часовой стрелке. Северный ветер — 0° , южный — 180° и т. д. Скорость ветра характеризует скорость перемещения воздуха относительно земной поверхности и измеряется в метрах в секунду (м/с), километрах в час (км/ч) или в узлах. Узел — это одна морская миля (1852 м) в час, один узел соответствует 2 м/с. В настоящее время практически во всех странах мира единица скорости ветра, принятая в аэрологических измерениях, — метр в секунду.

Как упоминалось во введении, имеется много методов измерения ветра в свободной атмосфере. Общим для них является определение в последовательные моменты времени координат

мишени, увлекаемой потоком воздуха (шары-пилоты, радиозонды, парашюты, облака дипольных отражателей, падающие надувные сферы, ионизированные метеорные следы и т. п.). В этой главе мы подробно рассмотрим методы ветрового зондирования, применяемые на аэрологических станциях.

2.1. Оболочки для шаров-пилотов и подъема радиозондов

Оболочки для аэрологических целей вначале изготавливались из бумаги, промасленного шелка, животной пленки, позднее их стали делать эластичными из натурального и синтетического каучука и нерастяжимыми из различных легких пластиков (полиэтилена). Нерастяжимые оболочки применяются только для специальных целей (уравновешенные шары-зонды).

При оперативном аэрологическом зондировании для подъема радиозондов в атмосферу или шаров-пилотов при ветровых наблюдениях применяются эластичные оболочки, наполняемые газами, удельный вес которых меньше воздуха, — водородом или гелием.

Эластичность оболочек является главным их свойством, так как определяет высоту их подъема. Оболочки при наполнении и подъеме в верхние слои, т. е. при уменьшении внешнего давления, должны свободно и равномерно растягиваться без развития значительных упругих сил, имея линейное растяжение до 700%. При этом они должны иметь достаточную прочность и ничтожную газопроницаемость. Чтобы иметь постоянную вертикальную скорость, оболочки должны быть правильной сферической формы. Наконец, они должны быть легкими, устойчивыми к воздействию низких температур, озона и ультрафиолетовой радиации. Свои свойства оболочки должны сохранять при длительном хранении. Большинству этих требований отвечают оболочки, изготовленные из натурального каучука.

Физические свойства каучука, его прочность и упругость связаны с огромным размером и аномальной формой его молекул. Каучук является высокомолекулярным соединением $(C_4H_8)_{1000}$ и обладает молекулярным весом 68 000—100 000. Молекулы каучука имеют длину около 5000 Å и диаметр около 2 Å. Качество изготовленных из каучука оболочек зависит прежде всего от того, насколько он чист, т. е. свободен от посторонних вкраплений. Такие посторонние вещества могут легко попасть в каучук при изготовлении оболочек, когда он имеет вид молочного сока (латекса). Поэтому обработка сырья и изготовление оболочек должны происходить в условиях полного отсутствия пыли. Если в резине окажется частица пыли, то при сильном растяжении она выпадает и в оболочке образуется микроскопическое отверстие, через которое выходит газ, и оболочка теряет скорость подъема. Это отверстие называется «свищ».

Натуральный каучук впервые начали добывать из молочного сока каучконосных деревьев, растущих в тропических лесах Южной Америки (1735 г.). В 1876 г. англичанам удалось вывезти из Южной Америки контрабандным путем семена таких каучконосных деревьев и организовать обширные

плантации на Цейлоне, в Британской Малайе, Голландской Индии, а также в Бирме и Индии. В СССР натуральный каучук получают с 1932 г. из сока дикорастущих каучуконосных растений (кок-сагыза, гваюлы и др.).

Однако огромная потребность в резине не могла быть покрыта за счет натурального каучука, и в настоящее время всюду широко развито промышленное производство синтетического каучука (латекса).

Латексные радиозондовые оболочки являются основным средством для подъема в атмосферу аэрологических приборов. Обычная латексная оболочка представляет собой полый резиновый эллипсоид с трубчатым отростком (аппендиксом), служащим для наполнения оболочки и для подвешивания груза. Для придания ему необходимой прочности аппендикс делают из материала в 10—20 раз более толстого, чем оболочка.

Главным преимуществом латексных оболочек по сравнению с другими средствами подъема приборов, измеряющих физические параметры атмосферы, является их сравнительно небольшие размеры, дешевизна, простота в эксплуатации и в то же время достаточно большая высота подъема.

Оболочки изготавливаются разных размеров, веса и окраски. Их различают по размеру диаметра в нераздутом состоянии. Оболочки имеют условные номера, близкие к размерам их диаметров. В табл. 2.1 даны сведения об оболочках отечественного производства.

ТАБЛИЦА 2.1

№ оболочки	Вес оболочки, г	Диаметр оболочки, см		Средняя вертикальная скорость, м/мин	Средняя гарантийная высота подъема, км (при $T = -60^\circ\text{C}$)
		начальный	разрывной		
10	10 ± 5	10	50	130—140	3
20	35 ± 5	20	100	200—220	7
30	85 ± 10	30	150	230—240	13
100	400 ± 50	90—100	450	250—450	15
150	900 ± 50	140—150	600	280—320	26
200	1600 ± 100	190—210	850	320—350	28

2.1.1. Технология изготовления латексных оболочек

В Советском Союзе латексные оболочки изготавливаются на заводах резино-технических изделий. С целью правильного выбора материала для радиозондовых оболочек, разработки их конструкции и технологии изготовления исследовались процессы, происходящие в пленке во время подъема в реальной атмосфере, поскольку высота подъема обуславливается не только свойствами материала оболочек, особенностями их конструкции и технологией изготовления, но и целым рядом факторов, влияющих на оболочки при их полете.

Современные отечественные оболочки изготавливаются из хлоропренового латекса методом ионного отложения. Латекс в жидком виде содержится

в ванне, его осаждают на специальных формах. Форма представляет собой болванку с ребрами, размер которой определяется номером изготавливаемой оболочки. Стержни с ребристой поверхностью последовательно погружают в различные составы. Вначале стержень погружают в раствор CaCl_2 на 50 с, затем погружают в ванну с латексом. В зависимости от размера форму выдерживают в ванне с латексом разное время:

№ оболочек	10	20	30	100, 150	200
Время, мин	5	10	11—12	15	15—20

Следующей операцией является тальковое суспензирование в течение 30 с, после чего сырые оболочки снимают со стержней и в специальной ванне закаливают в воде в течение различного времени (от 30 мин до 8 ч), обезвоживают и пересыпают тальком. После этого производят «раздутие» их строго дозированными порциями воздуха и просушивание в течение различного времени:

№ оболочек	10	20	30	100, 150, 200
Время, ч	1,5	2	3	3—5

Весь этот процесс автоматизирован, вследствие чего выдерживается толщина и размер оболочек. После просушки в печи производят вулканизацию латекса в течение одного часа при $T = 200^\circ\text{C}$, благодаря которой оболочки делаются растяжимыми. На всех этапах изготовления оболочки пересыпают тальком, чтобы они не слипались. Последним этапом изготовления оболочек является контроль их качества. Показатели средней гарантийной высоты проверяются заводом во время периодических полевых испытаний. Обычно такие испытания проводятся два раза в год (летом и зимой) на одной из аэрологических станций ГУГМС совместно с потребителями, т. е. аэрологами.

Начальный диаметр оболочек в метрах на заводе определяется по формуле

$$D_0 = 1,24 \sqrt[3]{v_0}, \quad (2.1)$$

где v_0 — объем воздуха в м^3 , который требуется для наполнения оболочки до начального момента растяжения пленки.

Существует специальная величина, характеризующая качество изготовления оболочки, которая называется фактором качества. Фактор качества количественно определяется как отношение относительного удлинения оболочки при разрыве к относительному разрывному удлинению образца латекса, из которого изготовляется оболочка, при комнатной температуре. Разрывное удлинение оболочки определяется следующим образом. Вначале измеряется начальный объем оболочки v_0 , а затем по формуле определяется ее разрывной объем $v_{\text{раз}} = Q/t$, где Q — производительность газодувки в $\text{м}^3/\text{мин}$, а t — время от начала раздувания до разрыва в минутах. Разрывное удлинение оболочки λ_0 далее рассчитывается по формуле $\lambda_0 = \sqrt[3]{Q/t/v_0}$.

Определение разрывных удлинений образцов производится на приборе двумерной деформации при скорости подачи воздуха 8 м/мин. Для испытаний из партии выбирают 4—5 оболочек, забракованных по внешнему виду. Из каждой оболочки вырезают по 5 образцов диаметром 8—10 см, при этом отбор образцов обязательно производят из разных частей оболочки. Разрывное удлинение образца $\lambda_{0\text{бр}}$ определяется по формуле $(a+2,75)/1,75$, где a — длина горизонтальной полуоси эллипсоида, образующегося при раздувании образца, в сантиметрах. За $\lambda_{0\text{бр}}$ данной партии принимается среднее значение из всех испытаний. Фактор качества рассчитывается по формуле $M = \lambda_0/\lambda_{0\text{бр}}$ и служит контролем качества оболочек. При $M < 0,5$ оболочки бракуются.

После контроля всей партии оболочки упаковываются в полиэтиленовые мешки или картонные коробки, защищающие их от повреждения.

Химическая и резиновая промышленности непрерывно ведут работу по усовершенствованию качества оболочек. Работы ведутся в направлении поиска и синтеза новых типов латексов на основе более морозостойких полимеров. Другим направлением является увеличение морозостойкости пленок из хлоропренового латекса за счет введения различных пластификаторов.

В направлении синтеза новых типов латексов успешные результаты пока не достигнуты, все полученные образцы имеют меньшую морозостойкость, чем хлоропреновые, обработанные в керосине.

Более успешны работы по повышению морозостойкости хлоропренового латекса за счет введения различных пластификаторов. В качестве пластификаторов применялись сложные эфиры адипиновой, фталевой, себацтиновой, фосфорной кислот и другие соединения. По комплексу свойств, которые следует придать латексу (большая морозостойкость, возможность длительного хранения, отсутствие летучести и минимальное падение фактического качества), наилучшим пластификатором оказался *дибутил-себацат*. Однако его использование приводит к ухудшению технологических свойств латекса, за счет чего падает прочность пленок; для избежания этого в латекс вводятся успокаивающие добавки. Сложность такого пластифицирования препятствует внедрению его в массовое производство латекса.

В последние годы были созданы также пластифицированные пленки. Оболочки, сделанные из таких пленок, не требуют обработки в керосине. Испытания этих оболочек не показали значительного преимущества в высоте подъема, однако они намного дороже латексных оболочек. Следует отметить, что за рубежом в основном применяются пластифицированные оболочки, они доставляются на аэрологические станции запаянными в герметичные коробки и распечатываются только перед наполнением. Увеличение высоты подъема американских оболочек достигается не за счет увеличения начального диаметра, а путем увеличения разрывной длины и утолщения пленки, т. е. увеличения запаса вещества, но из-за более толстых стенок эти оболочки тяжелее отечественных.

2.1.2. Выбор размера оболочек и правила их эксплуатации

Для того чтобы оболочка достигла большой высоты подъема, следует правильно выбирать номер оболочки и правильно с ней обращаться. Оболочки малых размеров (№ 10, 20 и 30) используются при шаропилотных наблюдениях за ветром, обычно они изготавливаются разных цветов. Выбор номера и цвета оболочки в каждом случае производится в зависимости от погоды и облачности. При солнечной безоблачной погоде применяют светлые шары, которые хорошо видны на фоне голубого неба, при разорванной облачности используют оболочки красного цвета, а при сплошной облачности — черные.

Оболочки № 100, 150 и 200 применяются для подъема радиозондов, выбор номера зависит от веса радиозонда. Оболочки № 100 чаще применяются для подъема радиозондов весом около 1 кг, более тяжелые радиозонды поднимают на оболоч-

ках № 150 и 200. Превышение груза приводит к уменьшению высоты подъема.

На аэрологической станции оболочки хранятся в заводской упаковке, пересыпанные тальком, при температуре от -30 до 35°C . Не допускается одновременное хранение в том же помещении кислот, щелочей, масел, керосина и бензина. При правильном хранении оболочки не теряют своих свойств более года.

Перед использованием производят внешний осмотр оболочки. Поверхность оболочки должна быть гладкой, без вздутий и механических включений, пузырей, заплат и складок. Цвет оболочки должен быть однородным, не допускается наличие желтых пятен. После осмотра латексную оболочку обязательно надо обработать с целью придания ей эластичных свойств. Этот процесс называется *пластификацией* и производится следующим образом:

1) из оболочки удаляют тальк, после чего ее взвешивают на весах с точностью до 5 г;

2) оболочку прогревают в расплавленном виде в специальном шкафу-термостате при температуре $70 \pm 5^{\circ}\text{C}$ в течение 60 мин.

3) прогретую оболочку опускают в керосин на несколько минут, после чего дают стечь избытку керосина и взвешивают оболочку на тех же весах с точностью до 5 г. Определяют набухание в процентах по формуле $\Pi = (p - p_0) \cdot 100 / p_0$, где p — вес оболочки после обработки, а p_0 — начальный вес. Набухание должно составлять 30—35%. Если вес оболочки оказался меньше, то обработку повторяют до требуемого привеса. В случае чрезмерного набухания надо расправить оболочку и дать улетучиться части керосина. Обработанные оболочки складывают в полиэтиленовые мешки и хранят при комнатной температуре, они должны быть использованы в течение 1—2 суток. Замечено, что хранение оболочек при слегка повышенной температуре (около $+40^{\circ}\text{C}$) приводит к увеличению высоты подъема шара. Обработка оболочек ведется в перчатках, чтобы их случайно не повредить.

Для шаропилотных наблюдений достаточно только прогреть оболочку в термостате при температуре $60-70^{\circ}\text{C}$ в течение 10—15 мин, т. е. до тех пор, пока она не станет мягкой и эластичной. После этого оболочку сразу же наполняют газом и выпускают.

2.2. Газы, применяемые для наполнения оболочек

Подъемная сила оболочки зависит от разности удельных весов вытесняемого оболочкой воздуха и газа, наполняющего оболочку. Чем больше эта разность, тем больше скорость подъема и подъемная сила оболочки, поэтому для наполнения оболочек применяются самые легкие газы — гелий и водород.

2.2.1. Гелий и его свойства

Гелий является самым лучшим газом для наполнения шаров, так как он не вступает в соединения ни с какими веществами, он не горит, не разрушает резину и не ядовит. Удельный вес гелия равен $0,1785 \text{ кг/м}^3$, а удельная подъемная сила составляет $1,1143 \text{ кг/м}^3$. Однако в природе гелий встречается редко, а искусственно получать его чрезвычайно сложно. США — единственная страна, где гелий имеется в неограниченном количестве, так как там он выходит из недр земли на огромных площадях, поэтому в США в аэрологии применяется только гелий. В других странах и в СССР большого количества естественного гелия нет, в этих странах используется водород. Существуют, однако, такие условия производства аэрологических наблюдений, когда применение водорода невозможно по технике безопасности. Такие условия имеются на научно-исследовательских судах погоды и при работе с полиэтиленовыми оболочками, так как полиэтиленовые оболочки и аэростаты обладают свойством сильно наэлектризовываться.

Для наполнения радиозондовых оболочек на судах погоды применяется технический гелий, в котором содержатся примеси, за счет этого подъемная сила гелия уменьшается до $0,95 \text{ кг/м}^3$. Гелий транспортируется и хранится в стальных цилиндрических баллонах емкостью от 41 до 43 л.

2.2.2. Водород и его свойства

Водород является самым легким из всех атмосферных газов. Удельный вес водорода равен $0,0899 \text{ кг/м}^3$, а удельная подъемная сила $1,2029 \text{ кг/м}^3$. Вследствие большой летучести водород редко встречается в свободном состоянии, но в отличие от гелия он в больших количествах находится в природе в виде разнообразных соединений. В воде, а также почти во всех органических телах большой процент весового содержания приходится на водород. Водород, особенно в смеси с воздухом, является исключительно взрывоопасным газом.

Вопросы техники безопасности при работе с водородом рассмотрим особо.

Химически чистый водород не имеет запаха, цвета и вкуса. В аэрологии применяется технический водород, который содержит примеси и вследствие этого имеет больший вес. Удельный вес технического водорода составляет $0,130\text{—}0,195 \text{ кг/м}^3$. Так как водород входит в очень многие соединения, существует довольно много способов его получения. Обычно водород является побочным продуктом при некоторых производствах, например при электролитическом производстве кислорода.

2.2.3. Устройство водородных и гелиевых баллонов

Гелий и водород, получаемые промышленностью, поступают на аэрологические станции в специальных баллонах. На рис. 2.1 и 2.2 показаны общий вид водородного баллона и устройство крана водородного баллона.

Водородный баллон (рис. 2.1) представляет собой стальной цельнотянутый цилиндр. Наиболее употребительный баллон имеет емкость 36—40 л. Длина его с навинченным колпаком 160 см, наружный диаметр 22 см, толщина стенок 8 мм, вес около 67 кг. Баллоны изготавливаются с большим запасом прочности, и сопротивление на разрыв равно около $70 \text{ кг на } 1 \text{ мм}^2$. Объем газа в таком баллоне равен $5\text{—}5,5 \text{ м}^3$ при температуре 15°C и давлении 150 атм.

Давление водорода в баллоне измеряется специальными манометрами со шкалой до 160 или 250 атм класса точности 2,5 или 4,0. Манометр навинчивается на штуцер к выходному отверстию водородного баллона. Открыв кран, по шкале отсчитывают давление, развиваемое водородом.

Вес водорода в баллоне менее 1 кг. Для отличия от баллонов, применяемых для других газов, водородные баллоны окрашивают в зеленый цвет и наносят красные надписи «водород». Баллоны, предназначенные для других газов, не могут быть использованы для наполнения водородом.

Основание баллона закруглено, а верхний его конец сужен. В суженую часть (шейку) баллона ввинчен специальный газовый кран (вентиль) (рис. 2.2), обеспечивающий плавный выпуск газа. Для предохранения от ударов, толчков и загрязнения кран закрывают колпаком, навинчивающимся на шейку баллона.

Основная часть крана А ввинчена непосредственно в шейку баллона Б. Внутри крана имеется выходной канал. Выходное отверстие закрывается заглушкой 5, имеющей левую резьбу, в отличие от баллонов, предназначенных для других газов. Другая часть крана В ввинчена в основную часть. Запирающее приспособление имеет стержень 4. Выходное отверстие канала

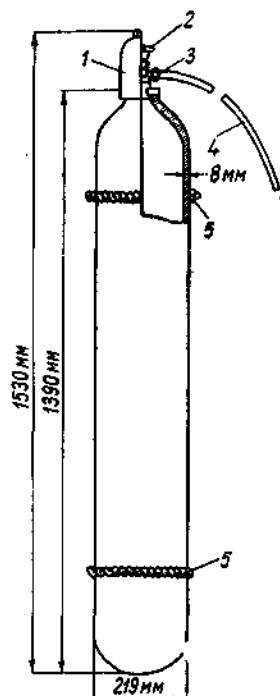


Рис. 2.1. Баллон для водорода.

1 — защитный колпак; 2 — вентиль; 3 — накидная гайка; 4 — шланг дюритовый; 5 — предохранительное кольцо.

закрывается металлической винтовой пробкой 2, имеющей правую резьбу. Пробка ходит по нарезке внутри крана. В пробке снизу запрессована прокладка 1 из мягкой красной меди; в нее врезаются острые края канала, чем и достигается его запирание. На четырехгранный верхний конец стержня насажена вентильная розетка 3.

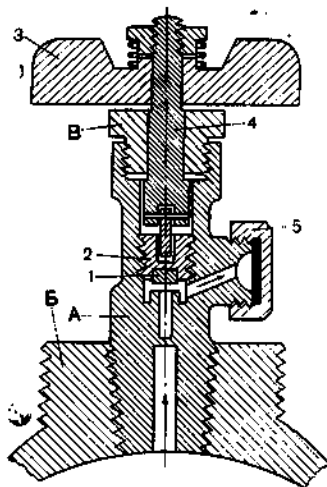


Рис. 2.2. Кран водородного баллона.

А — основная часть крана; Б — шейка баллона; В — вторая часть крана; 1 — прокладка; 2 — винтовая пробка; 3 — вентильная розетка; 4 — стержень; 5 — заглушка.

Баллоны для гелия точно такие же, как для водорода, и отличаются только тем, что выходной штуцер вентиля имеет правую резьбу.

Готовый водород получают очень немногие аэрологические станции, на большинстве же аэрологических станций сети СССР, на антарктических станциях, дрейфующих станциях «Северный полюс» и в экспедициях водород добывается в газогенераторах.

2.2.4. Добывание водорода в газогенераторах

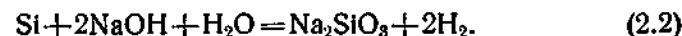
Для добывания водорода на аэрологических станциях используются газогенераторы высокого и низкого давления. Водород получают следующими способами.

Силиколевый способ заключается в воздействии кремния (силиция) на горячий раствор едкого натра (каустической соды). На практике вместо кремния используется ферросилиций (сплав железа и кремния), содержащий около 80% кремния. Ферросилиций имеет вид мелкого молотого порошка (диаметр зерен не превышает 1,0 мм) темно-серого цвета; он безвреден, особых предосторожностей при обращении с ним не требуется.

Едкий натр, или каустическая сода NaOH, представляет собой белую плотную массу волокнисто-кристаллического строения с удельным весом 2,13. Едкий натр разъедающе действует на кожу, платье и обувь, поэтому при работе с ним необходимо пользоваться резиновыми перчатками, сапогами, фартуком и защитными очками. На воздухе он быстро сыреет, оплывает и постепенно покрывается белым слоем углекислой соды, образующейся под воздействием углекислоты, содержащейся в воздухе. Едкий натр легко растворяется в воде с выделением 250 ккал тепла на 1 кг едкого натра. Не допускается совместное хранение едкого натра с ферросилицием или алюминием,

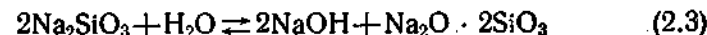
так как оба эти вещества в присутствии влаги соединяются между собой и выделяют водород.

При силиколевом способе водород получают обычно согласно уравнению



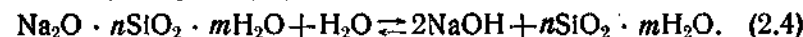
Значительное количество железа, присутствующее во время реакции, уравнением (2.2) не учитывается, так как оно практически не участвует в реакции выделения водорода и не взаимодействует со щелочью.

Однако процессы, происходящие при добывании водорода силиколевым способом, сложнее, чем это следует из приведенного уравнения, описывающего лишь первую стадию процесса. Полученный силикат натрия Na_2SiO_3 подвергается гидролизу с выделением едкого натра и образованием силикатов натрия с различными модулями. Например, в результате реакции гидролиза



получается силикат натрия с модулем $n=2$.

При избытке воды полученный силикат может подвергаться дальнейшему гидролизу, увеличивая свой модуль. Например,



Освободившийся едкий натр вновь вступает в реакцию согласно уравнению (2.2).

Это явление гидролиза позволяет при получении водорода уменьшить количество щелочи в три раза и более по сравнению с расчетом по уравнению (2.2). Однако при этом используется в 10 раз больше воды, чем требуется по уравнению (2.2), так как она нужна также, во-первых, для растворения большого количества едкого натра, во-вторых, для растворения полученного силиката натрия и, в-третьих, для процесса гидролиза полученного силиката натрия в целях значительного уменьшения количества едкого натра, необходимого по уравнению реакции (2.2).

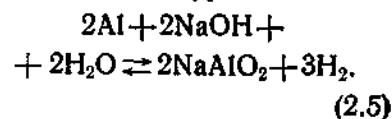
Реакция протекает при давлении около 100 атм и температуре свыше 250°C . Поэтому такая реакция может происходить только в прочных стальных баллонах — газогенераторах.

Получаемый таким образом водород оказывается довольно чистым: доля примесей других газов составляет около 2%. После окончания реакции остается смесь из силиката натрия и окиси железа в виде сильно затвердевающего остатка.

Алюмино-силиколевый способ отличается от силиколевого тем, что 5—15% весовой части ферросилиция замещается алюминиевым порошком. Количество едкого натра и воды остается без изменения. Алюминий, взаимодействуя со щелочью и водой, развивает высокую температуру и дает толчок для начала

реакции ферросилиция со щелочью и водой без всякого подогрева воды даже при низких отрицательных температурах воздуха. В результате реакции получается примерно такое же количество водорода. Остатки от реакции сильно не затвердевают и не доставляют особых хлопот при очистке. Однако добавка алюминия при температуре выше 10°C нецелесообразна, так как это приводит к повышению давления и температуры и образованию твердых продуктов реакции, затрудняющих чистку газогенераторов.

Щелочно-алюминиевый способ. Этим способом водород получается при взаимодействии алюминия со щелочью и водой согласно уравнению



Преимуществом этого способа перед силиколовым является экономия химикатов (примерно в два раза меньше на то же количество водорода) и возможность использования водорода любой температуры; кроме того, осадок в данном случае не затвердевает. Бурное течение реакции затрудняет применение этого способа в газогенераторах высокого давления. Он используется в газогенераторах низкого давления, где можно регулировать скорость реакции в процессе добывания водорода.

На аэрологических станциях применяются газогенераторы высокого давления АВГ-45 и низкого давления.

Газогенератор высокого давления АВГ-45. На рис. 2.3 изображен общий вид баллонного газогенератора для водорода АВГ-45. Реактором генератора служит приспособленный стандартный водородный баллон 6, имеющий емкость 45 л. Зарядка реактора химикатами производится через отверстие горловины 14. Для выпуска образовавшегося водорода служит обычный баллонный вентиль 9, который ввинчивается не в горловину баллона, а в особую головку 8 реактора. В головку ввернут манометр 11 для контроля за давлением газа.

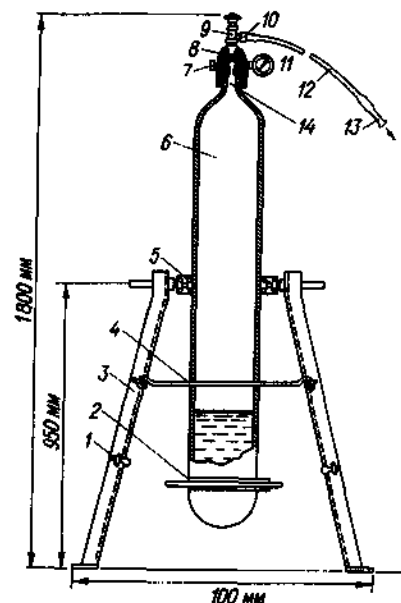


Рис. 2.3. Баллонный газогенератор АВГ-45.

1 — крюк сборочный малый; 2 — обойма нижняя с ручьями; 3 — штатив; 4 — крюк сборочный большой; 5 — обойма верхняя с полуосями; 6 — баллон; 7 — предохранительный клапан; 8 — головка; 9 — вентиль; 10 — наконечник; 11 — манометр; 12 — шланг; 13 — патрубок; 14 — горловина.

в баллоне и предохранительный клапан 7. Головка снабжена двумя ручками, которыми она плотно навинчивается на горловину с уплотняющей резиновой прокладкой. На реактор насажены две обоймы: верхняя и нижняя. К верхней обойме прикреплены две цапфы или полуоси, которыми реактор устанавливается в штативе или подставке, к нижней прикреплена ручка, с помощью которой реактор устанавливают в нужное положение (под углом 45°C или вертикально), покачивают его во время споласкивания и переворачивают при опоражнивании.

Давление газов, получаемых в процессе реакции генератора, допускается до 90 атм, оно называется рабочим давлением газогенератора и измеряется на пунктах зондирования манометром, который должен подвергаться поверке в контрольных лабораториях Государственного комитета стандартов СССР не реже одного раза в шесть месяцев. Для избежания превышения давления в баллоне газогенератор защищается предохранительным клапаном на 100 ± 5 атм. Клапан устроен в гнезде головки, которое сообщается с реактором. Основной частью предохранительного клапана является тонкая серебряная пластина. Действие клапана заключается в том, что если давление в реакторе превысит 100 атм, то предохранительная пластина клапана прорвется и давление упадет. Газ при этом теряется.

Для зарядки одного газогенератора применяются нормы химикатов, рассчитанные на получение 1,5 м³ водорода: едкий натр — 800 г., ферросилиций — 1250 г, вода — 6 л. Все химикаты тщательно взвешивают. Перед забором химикатов мерку также тщательно взвешивают.

При высокой температуре воздуха (летом) едкого натра закладывают несколько меньше. В табл. 2.2 показаны нормы закладки едкого натра в граммах при высокой температуре воздуха.

ТАБЛИЦА 2.2

Температура воды, °C	Температура воздуха, °C				
	15	20	25	30	35
15	800	790	780	770	760
20	790	780	770	760	750
25	780	770	760	750	740
30	770	760	750	740	730

При низкой температуре воздуха небольшую часть ферросилиция замещают алюминиевым порошком. В табл. 2.3 дано количество алюминиевого порошка в граммах, необходимое для замены ферросилиция при низкой температуре воздуха.

Перед добыванием водорода баллон должен быть очищен. Зарядка газогенератора производится в следующей последовательности.

ТАБЛИЦА 2.3

Температура воды, °C	Температура воздуха, °C									
	10	5	0	-5	-10	-15	-20	-30	-40	-50
15	15	30	40	55	70	80	95	120	150	170
10	20	35	50	65	80	90	105	130	160	180
5	30	45	60	70	85	100	115	140	170	190
0	40	55	70	80	95	110	125	150	180	200

Снимают кран-головку, в чистый баллон засыпают все нужное количество едкого натра, затем вливают 4 л подогретой воды. После этого засыпают ферросилиций и доливают остаток воды. Немедленно навинчивают кран-головку и закрывают вентиль. Первые 10—15 мин идет медленная реакция и баллон постепенно разогревается. Затем наступает бурная реакция с быстрым ростом давления газа в баллоне и выделением большого количества тепла. Через несколько минут после начала бурной реакции давление достигает максимума, после чего оно постепенно падает, что свидетельствует об окончании реакции. Конечное давление не должно превышать 70 атм. Наполнение оболочки из газогенератора следует производить после полного окончания реакции и прекратить до начала закипания раствора, для того чтобы не допустить попадания пара в оболочку. Кроме того, рекомендуется наполнять оболочку из остывшего газогенератора, что гарантирует получение сухого водорода. Для отбора газа на вентиль 9 (рис. 2.3) навертывается шланг 12 с накидной гайкой 10. На другом конце шланга имеется патрубок 13, на который надевается и привязывается аппендикс оболочки.

Баллон после остывания следует очистить и вымыть. Быстро остывающий осадок разбивается и размельчается с помощью штыря с металлическим наконечником. Качество очистки генератора проверяется с помощью мерной рейки.

Газогенераторы низкого давления. На некоторых полярных станциях получили применение газогенераторы низкого давления. Они менее опасны в обращении. Одним из газогенераторов низкого давления является газогенератор Г-3 (рис. 2.4).

Газогенератор состоит из трех металлических сосудов: реактора 2, холодильника 9 и дозирочного бачка 1, соединенных между собой шлангами. Вес генератора около 90 кг. Емкость реактора 170 л, холодильника 100 л, бачка 7,5 л. В холодильник заливается 90 л воды до контрольного отверстия 8.

При добытии водорода реактор загружается необходимым количеством химикатов. Выделяющийся в результате реакции водород поступает по шлангу в холодильник. Водяные пары,

содержащиеся в водороде, проходя через холодную воду, конденсируются, а высушенный водород выходит через патрубок 5 в оболочку. Но с течением времени температура воды в холодильнике значительно повышается, и водород постепенно обогащается водяным паром. Поэтому воду в холодильнике необходимо менять или пропускать водород через второй холодильник.

Загрузка химикатами производится так. В реактор засыпают алюминиевый порошок, распределяя его равномерным слоем. Затем так же равномерно распределяют едкий натр. На 7 весовых частей алюминиевого порошка берется 1 часть едкого натра. Холодильник и дозирочный бачок наполняют водой. Реактор закрывают крышкой, прижимая ее винтом.

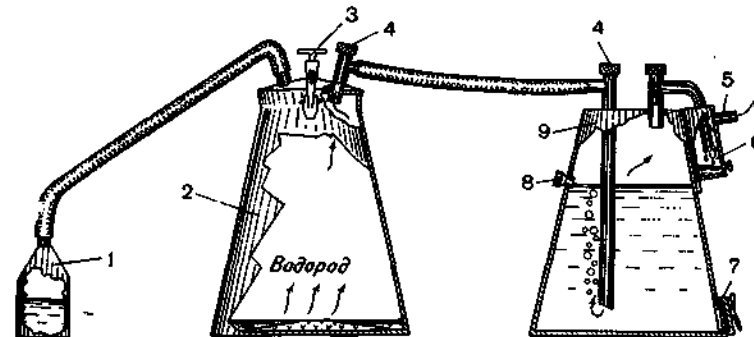


Рис. 2.4. Схема газогенератора Г-3.

1 — дозирочный бачок; 2 — реактор; 3 — зажимной винт; 4 — предохранительные клапаны; 5 — патрубок для выхода водорода в оболочку; 6 — отстойник; 7 — сливное отверстие; 8 — контрольное отверстие; 9 — холодильник.

Реакция начинается после подачи воды из дозирочного бачка. По мере затухания реакции добавляют воду из дозирочного бачка небольшими порциями, чем регулируют скорость выделения водорода. Для более точной подачи воды можно использовать газогенератор ЭГ-3, который отличается от газогенератора Г-3 только тем, что дозирочный бачок в нем расположен на его стенке и доступ воды регулируется краном. Уход за генератором прост: достаточно следить за его чистотой и контролировать целостность шлангов и предохранительных клапанов.

В настоящее время на большинстве аэрологических станций используются газогенераторы АВГ-45. Газогенераторы низкого давления используются на дрейфующих станциях и в Антарктиде, при этом добывают водород алюминио-силиколевым способом. При многократных повторных выпусках радиозондов при сильном ветре рекомендуется создавать на станциях запас газа, для чего используются специальные перкалевые газгольдеры, в которые накачивается газ из газогенератора.

Электролизный способ. Этот способ добытия водорода является перспективным, так как не требует доставки химикатов. Он основан на разложении воды электрическим током. Для увеличения электропроводности в воду иногда добавляют серную кислоту. Электролизный способ широко применяется в промышленности. В некоторых зарубежных странах электролизные газогенераторы уже используются на пунктах зондирования. Подобные установки разрабатываются для аэрологической сети СССР.

2.3. Основные правила техники безопасности при работе с гелием и водородом

Баллон с любым сжатым газом может взорваться в результате значительного роста в нем давления, вызванного длительным действием прямой солнечной радиации. Поэтому при хранении баллонов с водородом нельзя допускать их нагревания прямыми солнечными лучами. Хранятся они в специальных помещениях — водородо- и гелиохранилищах.

Баллоны следует предохранять от соударений, поэтому их надо хранить на деревянных прокладках. При транспортировке на баллоны надеваются кольца из веревок или резины, исключающие возможность их соударений. При хранении и транспортировке на баллоны навинчивают предохранительные заглушки и защитные колпаки. Впрочем, взрывы баллонов при перевозке и хранении сравнительно редки. Водород становится гораздо более опасным, когда он выходит из баллона в шар.

Химически чистый водород горит бесцветным пламенем, развивая температуру 1500°C. При некоторых условиях водород может самовоспламениться, например, при утечке из баллона или оболочки. Водород может воспламениться даже от облучения солнечными лучами при наличии в нем светочувствительных примесей. Температура воспламенения химически чистого водорода составляет 585°C. При сгорании 1 кг водорода и 8 кг кислорода образуется 9 кг водяного пара и выделяется 28 900 ккал тепла.

Смесь водорода и воздуха воспламеняется с сильным взрывом, который особенно интенсивен, если вместо воздуха к водороду примешан кислород, так как в этом случае происходит почти мгновенное химическое соединение водорода с кислородом и образование воды. Смесь двух объемов водорода с одним объемом кислорода называется гремучим газом. Температура воспламенения гремучего газа сильно зависит от наличия дополнительных примесей. Взрываются также иные водородно-кислородные смеси, если они содержат от 6 до 95% водорода по объему. Поэтому даже при самом тщательном обращении с водородом весьма вероятно образование взрывоопасной смеси водорода с воздухом.

Несмотря на относительно большой коэффициент диффузии водорода в воздухе и большую его плавучесть, всякий раз при образовании смеси водорода с воздухом возникает опасность взрыва. Поэтому при работе с водородными баллонами и особенно с газогенераторами необходимо тщательно выполнять следующие правила техники безопасности.

При наполнении оболочек из баллонов

— Баллон и наконечник шланга должны быть тщательно заземлены.

— При снятии защитного колпака с баллона не следует применять металлических предметов и камней, в случае необходимости разрешается применять только деревянный молоток.

— При наполнении оболочки вентиль нужно открывать только с помощью ключа, вначале медленно поворачивая розетку крана влево.

— Строго запрещается наполнять оболочку вблизи огня, запрещается также курить.

— Если водород, выходя из баллона, загорится, следует спокойно закрыть кран и горение прекратится.

— На пустом баллоне следует поставить цифру ноль.

При переноске баллонов

— Баллоны нужно переносить только вдвоем. Нельзя брать баллон за кран и задевать им за посторонние предметы.

— Баллоны нельзя бросать и ударять, нельзя перекачивать их по земле.

При перевозке баллонов

— Баллоны необходимо перевозить только с навинченными колпаками и надетыми резиновыми кольцами, предохраняющими их от соударений.

— Перевозят баллоны в специальных контейнерах или стеллажах, только на рессорном транспорте и в горизонтальном положении.

При хранении баллонов

— Баллоны следует хранить в специальных помещениях, в которых окна и двери открываются наружу, а для освещения используется специальная арматура.

— В этом помещении обязательна хорошая вентиляция — вытяжная труба сверху и поддув снизу.

— При отсутствии водородохранилища допускается хранение баллонов на воздухе под навесом, при отсутствии навеса их можно закрывать брезентом или фанерой.

— В водородохранилище необходимо иметь противопожарные средства — огнетушитель и ведра с водой.

При работе с газогенераторами

— Запрещается работать с газогенератором, у которого истек срок годности (5 лет после изготовления). Нельзя также работать с манометром, у которого истек срок годности поверки (6 месяцев). Газогенератор или манометр могут быть забракованы по внешним признакам и ранее указанных сроков.

— В предохранительном клапане должна быть только серебряная пластинка, нельзя заменять пластинку суррогатными материалами типа монет или других более плотных прокладок. Это может привести к взрыву баллона.

— Необходимо строго соблюдать нормы и порядок закладки химикатов. Не превышать давление в реакторе выше допустимого (90 атм).

— При выпуске водорода из газогенератора штатив и окончательник нужно заземлить.

— В процессе газодобыывания нельзя отлучаться от газогенератора и прерывать наблюдение за манометром.

— При работе с газогенератором низкого давления следует регулярно проверять прочность соединения шлангов с реактором, холодильником и бачком. Добавление воды из дозирочного бачка производить только при замедлении реакции, а не при ее полной остановке, так как в случае остановки может произойти перегонка воды из холодильника в реактор.

2.4. Условия движения шара в атмосфере

Эластичная оболочка, наполненная газом легче воздуха, поднимается вверх, однако на скорость ее движения действуют различные силы, определяемые как размерами оболочки и свойствами газа, так и атмосферными условиями.

2.4.1. Подъемная сила шара-пилота

Оболочка шара-пилота по мере наполнения ее водородом растягивается и приобретает сферическую форму. Давление газа внутри оболочки немного превышает давление окружающего воздуха, это сверхдавление уравнивается упругими силами резиновой оболочки.

По закону Архимеда, всякое тело, погруженное в воздух, теряет в весе столько, сколько весит объем воздуха, вытесненного этим телом. Следовательно, наполненная легким газом (водородом или гелием) оболочка будет находиться под действием некоторой выталкивающей силы.

Если бы оболочка не имела веса, это сила была бы равна разности между весом вытесненного шаром воздуха (архимедовой силой) и весом водорода. Эта разность называется *полной подъемной силой шара*.

Если мы обозначим объем шара через V , удельный вес (плотность) воздуха через $\rho_{\text{возд}}$ и удельный вес водорода через ρ_{H} , а полную подъемную силу через E , то

$$E = \rho_{\text{возд}} V - \rho_{\text{H}} V. \quad (2.6)$$

Разность удельных весов воздуха и водорода ($\rho_{\text{возд}} - \rho_{\text{H}}$) есть не что иное, как полная подъемная сила, отнесенная к единице объема, т. е. *удельная подъемная сила*, которую можно обозначить через e . Тогда

$$e = \rho_{\text{возд}} - \rho_{\text{H}}. \quad (2.7)$$

При нормальных условиях, т. е. при $p = 760$ мм, $t = 0^\circ\text{C}$, удельный вес воздуха и водорода равен соответственно $\rho_{\text{возд}} = 1293$ г/м³, $\rho_{\text{H}} = 90$ г/м³, а $e = 1203$ г. Плотность гелия $\rho_{\text{He}} = 180$ г/м³ и соответственно $e_{\text{He}} = 1113$ г. Удельная подъемная сила гелия на 7,5% меньше удельной подъемной силы водорода.

Однако на самом деле оболочка имеет вес и, кроме того, почти всегда несет какой-то груз (радиозонд, мишень, фонарик и пр.). Обозначим вес оболочки вместе с грузом через B . Разность между полной подъемной силой E и весом B называется *свободной подъемной силой шара*. Обозначим ее через A . Тогда

$$A = E - B$$

или

$$A = \rho_{\text{возд}} V - \rho_{\text{H}} V - B. \quad (2.8)$$

По мере подъема шара в верхние слои внешнее давление уменьшается, и поэтому давление газа, находящегося в оболочке, заставляет ее растягиваться. Это внутреннее сверхдавление все время уравнивается упругими силами оболочки.

Покажем, что подъемная сила шара с высотой не меняется. Будем считать, что давление газа внутри шара всегда равно давлению воздуха снаружи, а температура газа равна температуре воздуха. Плотность воздуха равна

$$\rho_{\text{возд}} = \frac{\rho_{\text{возд}}}{T_{\text{возд}} R_{\text{возд}}}, \quad (2.9)$$

плотность водорода равна

$$\rho_{\text{H}} = \frac{\rho_{\text{H}}}{T_{\text{H}} R_{\text{H}}} \quad (2.10)$$

(где $R_{\text{возд}}$ и R_{H} — газовые постоянные соответственно воздуха и водорода).

В этом случае плотность водорода и плотность воздуха будут изменяться с высотой пропорционально друг другу и обратно пропорционально объему шара, т. е. если $\rho_{\text{H}1}$, $\rho_{\text{возд}1}$ и

V_1 — начальные значения, а ρ_{H1} , $\rho_{возд1}$ и V_n — значения на некотором n -м уровне, то

$$\frac{\rho_{H1}}{\rho_{Hn}} = \frac{\rho_{возд1}}{\rho_{воздn}} = \frac{V_n}{V_1}. \quad (2.11)$$

Отсюда

$$\left. \begin{aligned} \rho_{возд1} V_1 &= \rho_{воздn} V_n \\ \rho_{H1} V_1 &= \rho_{Hn} V_n \end{aligned} \right\} \text{const.} \quad (2.12)$$

Равенства (2.12) определяют постоянство членов, входящих в уравнение (2.8). Следовательно, $A = \text{const}$, т. е. подъемная сила с высотой не меняется.

2.4.2. Вертикальная скорость шара-пилота

Свободная подъемная сила A придает шару ускорение, благодаря которому выпущенный в свободный полет шар стремится вверх. Но, как только шар начинает подъем, на него начинает действовать другая сила — сопротивление воздуха F , — направ-

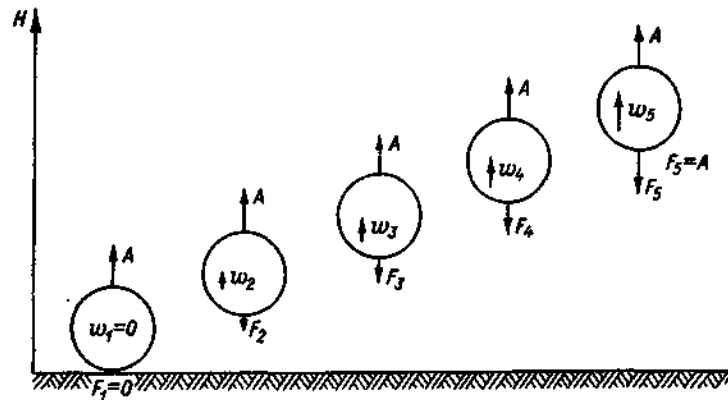


Рис. 2.5. Изменение силы сопротивления F по мере подъема шара-пилота.

ленная вниз. Сопротивление воздуха F возрастает до тех пор, пока не станет равным A . На рис. 2.5 показано изменение соотношения F и A по мере движения шара вверх. Пока A больше F , шар будет подниматься с ускорением. Когда F становится равным A , движение шара вверх продолжается с постоянной вертикальной скоростью $w = \text{const}$. *Постоянство вертикальной скорости — основное допущение метода шаропилотных наблюдений, о котором будет рассказано в следующей главе.*

Сопротивление воздуха зависит от размеров шара, состояния атмосферы, плотности воздуха и вертикальной скорости:

$$F = k \rho_{возд} c^2 w^2. \quad (2.13)$$

Здесь k — коэффициент сопротивления воздуха, зависящий от турбулентности атмосферы, c — длина окружности шара.

Так как $F = A = \text{const}$, то

$$A = k \rho_{возд} c^2 w^2, \quad (2.14)$$

откуда

$$w = \sqrt{\frac{A}{k \rho_{возд} c^2}} = \sqrt{\frac{1}{k}} \cdot \frac{\sqrt{A}}{c \sqrt{\rho_{возд}}}. \quad (2.15)$$

Для удобства пользования этой формулой умножим числитель и знаменатель на $\sqrt{\rho_{воздо}}$ ($\rho_{воздо}$ — плотность воздуха при некоторых стандартных условиях $p = 760$ мм, $t = 20^\circ\text{C}$), тогда

$$w = \sqrt{\frac{1}{k}} \cdot \frac{\sqrt{A}}{c \sqrt{\rho_{возд}}} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{воздо}}}{\sqrt{\rho_{воздо}}}. \quad (2.16)$$

Эту формулу можно упростить, если обозначить через $a = \sqrt{1/k \rho_{воздо}}$. Тогда

$$w = a \frac{\sqrt{A}}{c} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{воздо}}{\rho_{возд}}}. \quad (2.17)$$

С помощью этой формулы, зная длину окружности шара и подъемную силу A , можно определить w , а коэффициент a и отношение $\sqrt{\rho_{воздо}/\rho_{возд}}$ можно вычислить заранее для среднего распределения плотности воздуха с высотой.

Для тех случаев, когда длина окружности шара c неизвестна, полезно вывести уравнение для вычисления w по свободной подъемной силе и весу оболочки. Обозначим объем шара V , радиус r . Известно, что $V = \frac{4}{3}\pi r^3$, а $c = 2\pi r$ или $r = c/2\pi$, тогда $c = \sqrt[3]{V 6\pi^2}$. Так как, согласно (2.8), $A = V(\rho_{возд} - \rho_H) - B$, то $V = (A + B)/\rho_{возд} - \rho_H$. Так как изменение плотности водорода пропорционально изменению плотности воздуха, член $(\rho_{возд} - \rho_H)$ можно заменить на $n\rho_{возд}$, т. е. $V = (A + B)/n\rho_{возд}$. Тогда

$$c = \sqrt[3]{\frac{6\pi^2 (A + B)}{n\rho_{возд}}}. \quad (2.18)$$

и, согласно (2.16),

$$\begin{aligned} w &= \sqrt{\frac{1}{k}} \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{\frac{6\pi^2}{n}}} \cdot \frac{\sqrt{A}}{\sqrt[3]{A+B} \sqrt[3]{\frac{1}{\rho_{возд}}} \sqrt{\rho_{возд}}} = \\ &= \frac{\sqrt{A}}{\sqrt[3]{A+B} \sqrt[3]{\rho_{возд}}} \cdot \frac{\sqrt[6]{\rho_{воздо}}}{\sqrt[6]{\rho_{возд}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{k} \sqrt[3]{\frac{6\pi^2}{n}}}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

В этом выражении постоянные множители можно объединить в коэффициент $b = 1/\sqrt{k} \sqrt[3]{\frac{\pi^2}{n}} \sqrt[6]{\frac{V}{\rho_{\text{возд}0}}}$, получим формулу (2.19) в более удобном виде

$$w = b \frac{\sqrt{A}}{\sqrt[3]{A+B}} \sqrt[6]{\frac{\rho_{\text{возд}0}}{\rho_{\text{возд}}}}. \quad (2.20)$$

Эта формула проще для расчета w , так как вес оболочки B и коэффициент b можно определить заранее. Следовательно, для вычисления w достаточно только найти A , что делается при наполнении шара.

2.4.3. Действительные условия движения шара-пилота

Выше мы приняли в качестве основного допущения, что вертикальная скорость шара постоянна. Однако в реальной атмосфере существует целый ряд факторов, влияющих на условия движения шара и отклоняющих фактическую вертикальную скорость от рассчитанной. Рассмотрим некоторые из них.

Уменьшение плотности воздуха с высотой. Рассмотрим согласно (2.16) отношение вертикальной скорости на некоторой высоте w_n к начальной w_1 :

$$\frac{w_n}{w_1} = \frac{c_1 \sqrt{\rho_{\text{возд}1}}}{c_n \sqrt{\rho_{\text{возд}n}}} = \frac{\sqrt[3]{V_1} \sqrt{\rho_{\text{возд}1}}}{\sqrt[3]{V_n} \sqrt{\rho_{\text{возд}n}}}.$$

Учитывая, что объем оболочки обратно пропорционален плотности воздуха, получим

$$\frac{w_n}{w_1} = \frac{\sqrt[3]{\rho_{\text{возд}1}} \sqrt{\rho_{\text{возд}1}}}{\sqrt[3]{\rho_{\text{возд}n}} \sqrt{\rho_{\text{возд}n}}} = \frac{\sqrt[6]{\rho_{\text{возд}1}}}{\sqrt[6]{\rho_{\text{возд}n}}}. \quad (2.21)$$

Из (2.21) видим, что с уменьшением плотности вертикальная скорость шара возрастает. Это возрастание можно рассчитать для среднего распределения плотности воздуха с высотой:

H км	0	4	8	10	20
w_n/w_1	1,00	1,08	1,15	1,19	1,52

Однако рассчитанная скорость в реальной атмосфере далеко не всегда будет совпадать с истинной скоростью шара из-за других причин. Полезно помнить, что средняя скорость подъема шаро-пилотных оболочек равна 200—250 м/мин, а радиозондовых оболочек № 150 и 200 в тропосфере составляет 250—350 м/мин, а в стратосфере — около 400 м/мин.

Диффузия водорода через оболочку. Вследствие диффузии водорода через оболочку количество газа в ней уменьшается,

что приводит к уменьшению подъемной силы и соответственно вертикальной скорости. Как правило, диффузия водорода ничтожна и ею можно пренебречь. Ощутимая потеря водорода наблюдается в тех случаях, когда в оболочке образовался свищ. Это приводит к резкому снижению скорости подъема. Обычно такие наблюдения бракуются.

Разность давления водорода и давления воздуха (сверхдавление газа в шаре). Сверхдавление газа в оболочке становится ощутимым только на высотах более 10 км, вблизи потолка подъема шаров-пилотов. Как показывают расчеты, сверхдавление несколько увеличивает w .

Разность температур водорода и воздуха. Если температура водорода выше температуры воздуха, подъемная сила возрастает, если водород холоднее воздуха — убывает. Как показали эксперименты и расчеты, эта разность сравнительно мала и ею можно пренебречь почти во всех случаях, за исключением мощных инверсий воздуха в атмосфере.

Отклонение формы шара от сферической приводит к уменьшению вертикальной скорости, так как неправильная форма шара увеличивает сопротивление воздуха. Теоретически влияние этого фактора учесть невозможно.

Турбулентность и вертикальные потоки в атмосфере. Это одна из основных причин, приводящих к значительным отклонениям действительной вертикальной скорости w_d от рассчитанной w_p . При значительной турбулентности атмосферы коэффициент k , входящий в формулу (2.15), сильно уменьшается. При наличии больших восходящих или нисходящих потоков воздуха в атмосфере за счет конвекции или горнодолинной, циркуляции разность $\Delta w = w_d - w_p$ велика и в некоторых случаях совершенно искажает расчеты. В таких случаях надо искать возможность измерить реальную скорость подъема шара.

2.4.4. Высота равновесия и высота разрыва оболочек

Выше мы рассмотрели факторы, влияющие на свободную подъемную силу шара и его вертикальную скорость. В данном разделе разберем факторы, определяющие высоту подъема шара. Разрыв оболочки происходит в том случае, когда сверхдавление водорода превышает упругие силы оболочки.

Теоретически шар должен достигать высоты равновесия, которое должно происходить на уровне, где внешнее атмосферное давление примерно равно сверхдавлению. Однако на самом деле разрыв шаров-пилотов и радиозондов происходит раньше, практически они никогда не достигают высоты равновесия.

Высота разрыва оболочек определяется по специальной формуле

$$P = \frac{p_1 T_B}{T_1 (\rho_{\text{возд}} - \rho_H) V_1 \lambda_T^3 M^3} - \frac{l_1 \sigma_T}{D_1 \lambda_T^3 M^3}. \quad (2.22)$$

Здесь p_1 и p — давление на старте и на высоте разрыва; T_1 и T — температура воздуха на старте и на высоте разрыва; $\rho_{\text{возд}}$ и ρ_H — удельные веса или плотность воздуха и водорода на старте; B — вес оболочки и груза; l_1 — начальная толщина пленки; λ_T и σ_T — разрывное удлинение материала и прочность оболочки при температуре T ; M — фактор качества; V_1 и D_1 — объем и диаметр оболочки на старте.

Анализ уравнения (2.22) показывает, что основными параметрами оболочки, влияющими на высоту разрыва, являются начальный размер оболочки, разрывное удлинение материала оболочки при низкой температуре, а также фактор качества — показатель, характеризующий степень совершенства технологического процесса изготовления оболочек.

Минимальный диаметр оболочки, способный достичь высоты разрыва 35 км, равен 150 см при $M=1$, т. е. в случае идеальной бездефектной оболочки. Чем больше фактор качества, тем ближе реальная высота подъема к расчетной высоте, при $M=0,6$ потеря высоты составляет около 10 км.

Представляет интерес, каким образом изменение температуры атмосферы влияет на разрывное удлинение материала и соответственно на высоту разрыва шара. Испытания показали, что начиная с температуры -50°C и ниже разрывное удлинение обработанного в керосине латекса начинает уменьшаться и при температуре -70°C оболочка более не растягивается. Для достижения высоты 30 км нужно, чтобы фактор качества был не меньше 0,8. О большом влиянии фактора качества на высоту подъема шара говорит тот факт, что оболочка № 200, рассчитанная на высоту 35–40 км, редко достигает этих высот вследствие того, что фактор качества этой оболочки обычно равен всего 0,5.

Кроме факторов, которые мы рассмотрели, на высоту разрыва оболочки значительно влияют стартовые условия. Оболочки не выносят больших динамических нагрузок, значительных деформаций и растяжений при сильном ветре, поэтому на аэрологических станциях для наполнения оболочек строятся специальные павильоны, а на судах погоды применяются ветрозащиты. Очень чувствительна к деформациям оболочка № 200, для повышения высоты подъема этой оболочки (на 3–6 км) внутрь ее помещают оболочку № 100.

Высота подъема оболочек зависит от географической широты места выпуска, климатических факторов и в первую очередь от температуры. Замечено, что в тропических широтах, где существуют очень низкие температуры в стратосфере, оболочки часто не пробивают слой тропопавзы. Значительные сдвиги ветра в атмосфере увеличивают динамическую нагрузку и соответственно снижают высоту. Влияние оказывают также озон, облачность, радиация. Солнечная радиация разрушает латекс, поэтому оболочку при наполнении ее газом прячут от солнца. Однако главными факторами, влияющими на высоту разрыва, являются материал, из которого изготавливаются оболочки, а также технологический процесс изготовления. Совершенствование технологического процесса, например, за период с 1955 по 1966 г. позволило повысить высоту подъема в среднем на 11 км.

2.5. Основные положения оптических и радиолокационных методов измерения ветра

Наиболее простым и широко распространенным методом измерения скорости и направления воздушных течений на разных высотах в атмосфере является метод шаров-пилотов. Сущность метода заключается в определении траектории шара-пилота, который под влиянием заданной ему подъемной силы поднимается вверх и одновременно смещается по горизонтали, увлекаемый воздушными течениями. Горизонтальная проекция траектории шара дает возможность получить представление

о скорости и направлении движения воздуха в разных слоях атмосферы. Следовательно, для определения скорости и направления ветра в разных слоях необходимо следить за перемещением шара. Наблюдения ведутся с помощью приборов визуальным путем (оптические методы) или с помощью радиолокационных станций (радиолокационные методы).

Для построения проекции шара в заданный момент времени нужно знать его координаты — азимут и горизонтальное удаление. Чтобы судить о высоте слоя, в котором определяются скорость и направление ветра, необходимо знать высоту шара в заданные моменты времени. Для определения положения шара удобна система координат, содержащая две угловые координаты шара (горизонтальный угол, или азимут α , и вертикальный угол δ) и одну линейную координату, которой может быть или высота шара H или расстояние от пункта наблюдений до шара — наклонная дальность r .

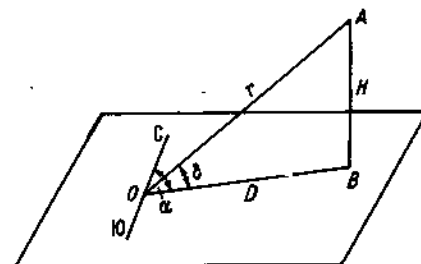


Рис. 2.6. Шаропилотный треугольник.

На рис. 2.6 изображен так называемый шаропилотный треугольник OAB . Точка O — пункт наблюдения или место выпуска шара; точка A — местоположение шара; точка B — проекция шара на плоскость, проходящую через точку O ; $ЮС$ — меридиан, проходящий через точку O . В этом случае $AB=H$ — высота шара, $OB=D$ — горизонтальное удаление шара, $OA=r$ — наклонная дальность, угол α — азимут, т. е. угол, образуемый линией OB с меридианом, угол δ — вертикальный угол, образуемый линией OA с горизонтальной плоскостью, проходящей через точку O . Таким образом, положение шара-пилота в любой момент времени можно определить координатами α , δ и r или координатами α , δ и H .

Если в результате наблюдений получается ряд последовательно определенных координат шара, то скорость и направление ветра могут быть вычислены по следующим формулам.

Направим (рис. 2.7) ось OX по меридиану на север, а ось OY по параллели на восток. Пусть направленный отрезок AB изображает вектор скорости ветра $\vec{c}$ в рассматриваемом слое. Разложим этот вектор на две составляющие: одну u по оси OX , а другую v по оси OY . Тогда значение скорости можно определить по формуле

$$\vec{c} = \sqrt{u^2 + v^2}.$$

Направление, куда дует ветер, определяемое углом θ , найдем следующим образом.

Очевидно, что

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{v}{u},$$

откуда

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{v}{u}.$$

Направление, откуда дует ветер, можно получить добавлением 180° к углу θ .

Применение быстродействующих электронных вычислительных машин дает возможность производить вычисление скорости и направления ветра в процессе наблюдения за шарами-пилотами по формулам, вывод которых приводится ниже.

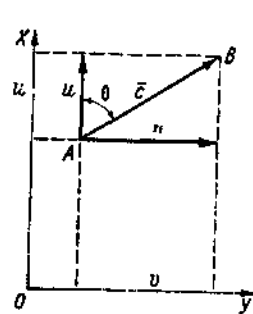


Рис. 2.7. Меридиональная и зональная составляющие скорости ветра.

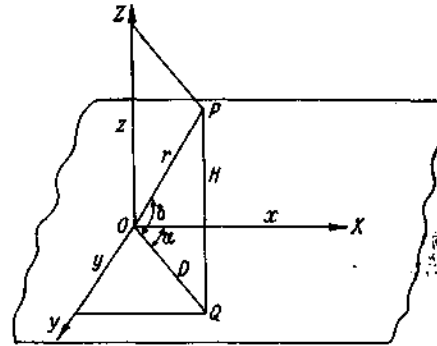


Рис. 2.8. Связь барических и прямоугольных координат.

Как видно на рис. 2.8, прямоугольные координаты x, y, z шаро-пилота связаны с координатами r, α, δ (называемыми сферическими) следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} x &= D \cos \alpha = r \cos \delta \cos \alpha; \\ y &= D \sin \alpha = r \cos \delta \sin \alpha; \\ z &= r \sin \delta. \end{aligned}$$

Известно, что составляющие u, v мгновенной скорости точки представляют собой производные соответствующих горизонтальных координат шара, т. е.

$$u = \frac{dx}{dt}, \quad v = \frac{dy}{dt}.$$

Средние значения компонентов скорости за промежутки времени Δt выразятся как отношения конечных приращений Δx и Δy к Δt , так что

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad v = \frac{\Delta y}{\Delta t}.$$

Таким образом, дифференцируя x и y по t и переходя к конечным приращениям, найдем:

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta r}{\Delta t} \cos \delta \cos \alpha - r \sin \delta \cos \alpha \frac{\Delta \delta}{\Delta t} - \\ &\quad - r \cos \delta \sin \alpha \frac{\Delta \alpha}{\Delta t}; \\ v &= \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{\Delta r}{\Delta t} \cos \delta \sin \alpha - r \sin \delta \sin \alpha \frac{\Delta \delta}{\Delta t} + \\ &\quad + r \cos \delta \cos \alpha \frac{\Delta \alpha}{\Delta t}. \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

Точно так же находим, что прямоугольные координаты x, y, z связаны с координатами H, α, δ следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} x &= D \cos \alpha = H \operatorname{ctg} \delta \cos \alpha; \\ y &= D \sin \alpha = H \operatorname{ctg} \delta \sin \alpha. \end{aligned}$$

Дифференцируя эти формулы по времени и переходя к конечным приращениям, получим компоненты средней скорости ветра в рассматриваемом слое:

$$\begin{aligned} u &= \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta H}{\Delta t} \operatorname{ctg} \delta \cos \alpha - \frac{H}{\sin^2 \delta} \cos \alpha \frac{\Delta \delta}{\Delta t} - \\ &\quad - H \operatorname{ctg} \delta \sin \alpha \frac{\Delta \alpha}{\Delta t}; \\ v &= \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{\Delta H}{\Delta t} \operatorname{ctg} \delta \sin \alpha - \frac{H}{\sin^2 \delta} \sin \alpha \frac{\Delta \delta}{\Delta t} + H \operatorname{ctg} \delta \cos \alpha \frac{\Delta \alpha}{\Delta t}. \end{aligned}$$

Вводя вертикальную скорость $w = \Delta H / \Delta t$, получим:

$$\left. \begin{aligned} u &= w \operatorname{ctg} \delta \cos \alpha - \frac{H}{\sin^2 \delta} \cos \alpha \frac{\Delta \delta}{\Delta t} - H \operatorname{ctg} \delta \sin \alpha \frac{\Delta \alpha}{\Delta t}; \\ v &= w \operatorname{ctg} \delta \sin \alpha - \frac{H}{\sin^2 \delta} \sin \alpha \frac{\Delta \delta}{\Delta t} + H \operatorname{ctg} \delta \cos \alpha \frac{\Delta \alpha}{\Delta t}. \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

В настоящее время разработаны алгоритмы программ для определения вертикальных профилей ветра в атмосфере на вычислительных машинах.

Вычисления значительно упрощаются, если обратиться к графическим построениям. Для этого достаточно нанести проекции шара на горизонтальную плоскость и затем рассмотреть отрезки, соединяющие эти проекции. Тогда отрезок в соответствующем масштабе даст значение скорости ветра, а направление отрезка — направление ветра. Найденные скорости будут средними для соответствующего слоя, расположенного между высотами H_i и H_{i+1} . Эти скорости условно относят к середине слоя, т. е. к высоте

$$H = \frac{H_i + H_{i+1}}{2}.$$

2.6. Метод шаров-пилотов

В общей системе методов измерений ветра в атмосфере визуальные наблюдения за шарами-пилотами с помощью оптических теодолитов играют в настоящее время весьма ограниченную роль. Эти наблюдения ведутся только на небольшой сети станций, в экспедициях, а также на аэродромах.

2.6.1. Однопунктные шаропилотные наблюдения

Метод шаров-пилотов, наблюдаемых с одного пункта, является наиболее простым методом измерения скорости и направления воздушных течений в разных слоях в свободной атмосфере. Методика и порядок производства шаропилотных наблюдений с одного пункта изложены в Наставлении гидрометеорологическим станциям и постам, вып. 4, ч. 1.

При однопунктных шаропилотных наблюдениях слежение за полетом шара в пространстве производится с помощью специальных аэрологических теодолитов. При этом измеряются вертикальный и горизонтальный углы, под которыми виден шар в определенные моменты времени.

Вертикальная скорость шара при обработке однопунктных шаропилотных наблюдений принимается постоянной. Это допущение позволяет вычислять высоту шара-пилота для каждого момента времени. По высоте шара и вертикальному и горизонтальному углам находятся проекции шара на горизонтальную плоскость. По горизонтальным проекциям шара, отнесенным к определенным моментам времени, определяется скорость и направление ветра в том или ином слое атмосферы.

Для производства шаропилотных однопунктных наблюдений необходимо иметь оболочки, газ для их наполнения, специальные аэрологические теодолиты для измерения угловых координат и планшет для графической обработки данных ветра.

2.6.2. Оболочки для шаропилотных наблюдений

Для однопунктных шаропилотных наблюдений применяются латексные оболочки № 10, 20, 30. Выбор размера оболочек для наблюдений должен производиться в каждом отдельном случае в зависимости от ветра и облачности. Учитывая, что шар с малой вертикальной скоростью при сильном ветре может очень быстро скрыться из поля зрения наблюдателя, оболочки № 10 употребляются только при слабом ветре и низкой облачности.

Оболочки № 20 выпускаются при облаках среднего яруса и ветре меньше 10 м/с. Оболочки № 30 применяются для достижения больших высот при ясной погоде, при облаках верхнего или среднего яруса и сильном ветре. Наполняются оболочки обычно водородом.

2.6.3. Аэрологические теодолиты

Теодолит представляет собой оптический прибор для измерения горизонтального и вертикального углов.

Аэрологические теодолиты, применяемые для шаропилотных наблюдений, в принципе являются такими же приборами, как и геодезические теодолиты, но они обладают рядом особенностей. Оптическая система аэрологических теодолитов устроена так, чтобы обеспечить возможность наблюдения за шаром, находящимся в зените или вблизи его. Для этой цели аэрологические теодолиты имеют зрительную трубу (телескоп) с изломанной под прямым углом оптической осью. Такое устройство зрительной трубы (главной части теодолита) обеспечивает горизонтальное положение окулярной части трубы при любом положении шара. Поэтому глаз наблюдателя всегда находится в одной и той же горизонтальной плоскости.

В месте излома трубы закреплена трехгранная стеклянная призма полного внутреннего отражения (рис. 2.9) или зеркало. Лучи света от предмета AB проходят через объектив L_1 и, испытывая полное внутреннее отражение в призме, образуют уменьшенное действительное и обратное изображение предмета A_1B_1 . Это изображение рассматривается через окуляр L_2 .

Для точной фиксации изображения предмета A_2B_2 необходимо, чтобы это изображение совместилось с плоскостью креста нитей (сетки или шкалы). Крест нитей (сетка или шкала) нанесен на плоской стеклянной пластинке KK , помещенной между призмой и окуляром. Совмещение изображения предмета с плоскостью креста нитей и получение четких изображений осуществляется с помощью кремальер.

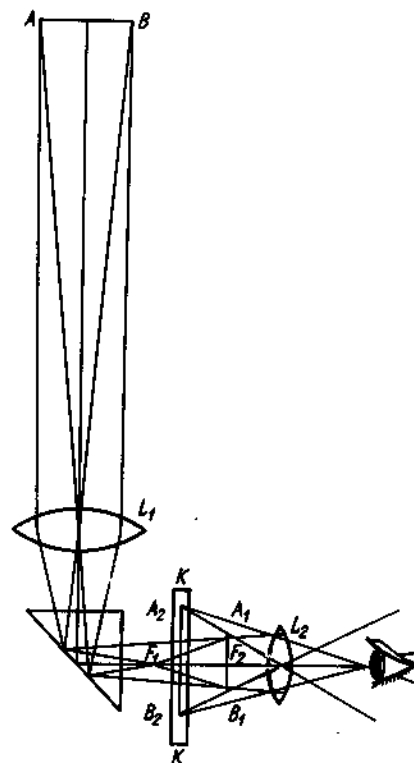


Рис. 2.9. Ход лучей в зрительной трубе теодолита.

AB — предмет; L_1 — линза объектива; A_2B_2 — мнимое изображение, получаемое при помощи окуляра; F_1 — фокус объектива; KK — крест нитей; F_2 — фокус окуляра; A_1B_1 — действительное изображение; L_2 — окуляр.

Совмещение изображения предмета с плоскостью креста нитей называется фокусировкой. Эта операция не зависит от глаза наблюдателя, а определяется параметрами оптической системы и удалением от теодолита наблюдаемого предмета. Так как шары-пилоты обычно наблюдаются на очень больших расстояниях, то во многих теодолитах осуществляется постоянная фокусировка на бесконечность.

Таким образом, изображение предмета всегда совпадает с плоскостью креста нитей. Поэтому в таких теодолитах имеется только одна кремальера, служащая для получения четкого изображения предмета и креста нитей в зависимости от глаза наблюдателя.

Для обеспечения наблюдений за шаром-пилотом как в первые минуты после выпуска, так и при больших удалениях оптическая система аэрологического теодолита должна обладать достаточно большим полем зрения, увеличением и светосилой.

При наблюдениях за шаром оптическая ось (визирная линия) перемещается в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Остальные части теодолита представляют собой устройство для вращения зрительной трубы вокруг вертикальной и горизонтальной осей и для отсчета угловых координат шара.

В теодолитах предусматривается возможность быстрых отсчетов углов. Отсчеты вертикальных углов производятся с помощью неподвижного индекса (места нуля) и подвижного вертикального лимба с точностью до $0,1^\circ$. Отсчеты горизонтальных углов производятся с помощью подвижного индекса и неподвижного горизонтального лимба, также с точностью до $0,1^\circ$.

В первые минуты после выпуска шара-пилота его угловые координаты изменяются очень быстро; затем их изменение становится более медленным. Поэтому в аэрологических теодолитах предусмотрена возможность вращения трубы как быстро от руки, так и медленно с помощью микрометрических винтов. Переход от одного способа вращения к другому может происходить немедленно.

Возможность перехода осуществляется включением в конструкцию микрометрического винта так называемого фрикционного кольца (фрикциона). При грубом вращении трубы теодолита от руки трение, развивающееся между кольцом и неподвижными частями теодолита, преодолевается, и фрикционное кольцо поворачивается вокруг оси теодолита вместе с шестерней и винтом относительно неподвижных частей теодолита. При вращении микрометрического винта усилие для преодоления трения между фрикционом и шестерней оказывается недостаточным, поэтому шестерня вместе с фрикционом остается неподвижной, и микрометрический винт обегает шестерню, вращаясь вместе с подвижной частью теодолита.

Теодолит используется также и для наблюдений за шарами-пилотами ночью. Поэтому он снабжен приспособлениями для

освещения как поля зрения трубы, так и отсчетных индексов. Аэрологические теодолиты просты в обращении и прочны.

Со времени изобретения первых моделей аэрологических теодолитов было предложено несколько десятков различных конструкций. Некоторые из них являются регистрирующими теодолитами, приспособленными для записи наблюдаемых угловых координат шара. Однако регистрирующие теодолиты не нашли широкого применения в аэрологической службе СССР и других стран.

Нет необходимости заниматься описанием различных конструкций аэрологических теодолитов и даже всех имеющихся типов, так как они отличаются друг от друга лишь характеристиками оптической системы и конструктивными деталями. Опишем лишь некоторые.

Теодолит ШТ (рис. 2.10) имеет в основании треугольную станину с установочными винтами, регулировочными головками и стопорным винтом. Как все аэрологические теодолиты, он имеет ломаную зрительную трубу, состоящую из объектива, окуляра и коробки с призмой полного внутреннего отражения. Горизонтальный лимб и алидада закрыты кожухом, в кожухе имеются два окошка для проведения отсчетов. Рабочим является окошко под окуляром. Вертикальный лимб, в центре которого установлен окуляр, имеет два индекса, рабочим считается левый. Кроме этого теодолит снабжен круглым уровнем и съемной буссолью для установки теодолита, мушкой и целиком для наводки на шар.

В настоящее время более распространен усовершенствованный вариант теодолита ШТ — теодолит АШТ, который отличается от теодолита ШТ — следующим:

— в станине нет регулировочных головок, стопорный винт помимо горизонтального лимба закрепляет еще и весь теодолит в станине;

— в зрительную трубу вмонтирован дополнительный объек-

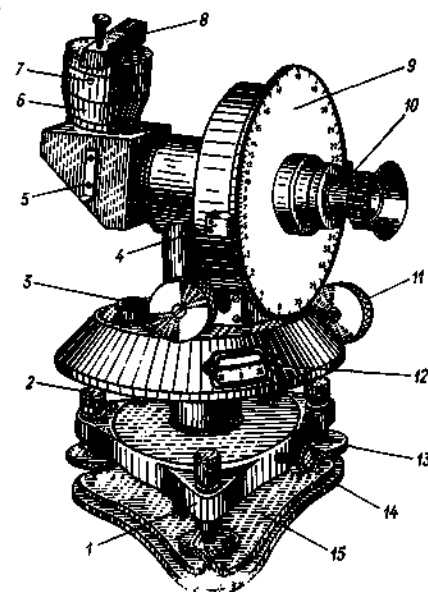


Рис. 2.10. Теодолит ШТ.

1 — треножник; 2 — верхние втулки; 3 — уровень; 4 — индекс; 5 — целик; 6 — объективная часть зрительной трубы; 7 — мушка; 8 — буссоль; 9 — вертикальный круг; 10 — окуляр; 11 — головка микрометрических винтов; 12 — окошечко и индекс для отсчета горизонтальных углов; 13 — подъемные винты; 14 — стопорный винт; 15 — треножник.

тив-искатель, или видоискатель-визир. Он предназначен для наблюдений за шаром-пилотом в течение первых минут после выпуска. Угол поля зрения видоискателя $11,5^\circ$, он включается с помощью специального тумблера, расположенного справа от объектива. Кроме того, объектив снабжен двумя светофильтрами — оранжевым и зеленым, которые включаются также с помощью тумблера, но расположенного слева;

— горизонтальный и вертикальный лимбы в этом теодолите закрыты кожухом и отсчеты углов производятся с помощью двух индексов, вынесенных на сетку окуляра;

— в теодолите АШТ установлены два цилиндрических уровня. Буссоль закрыта в вертикальной стойке теодолита,

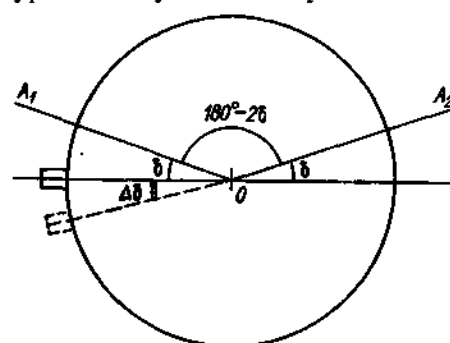


Рис. 2.11. Ошибка в определении вертикального угла за счет неверной установки индекса вертикального лимба.

в специальное окошечко виден южный конец магнитной стрелки.

При измерении угловых координат шара возможны погрешности, в частности из-за инструментальных ошибок теодолитов. Основными являются следующие:

1. **Ошибка, вызванная неверной установкой индекса вертикального лимба.** При сбите индексе отсчет вертикального угла будет производиться с ошибкой $\Delta\delta$ (рис. 2.11). Для определения ошибки вертикального угла трубу теодолита необходимо навести на удаленный предмет A_1 (сделать наводку) и произвести отсчет вертикального угла δ с точностью до 0,1. Перевести трубу теодолита через зенит (т. е. сделать перекидку) и поставить ее в положение, симметричное относительно OA_1 (т. е. в положение OA_2). Затем, повернув трубу в горизонтальной плоскости на 180° , снова навести на тот же предмет (A_1) и сделать отсчет вертикального угла. В положении трубы «наводка» (круг право) $\delta_{\text{нав}} = \delta + \Delta\delta$, в положении «перекидка» (круг лево) $\delta_{\text{пер}} = \delta_{\text{нав}} + 180 - 2\delta$, т. е. $\delta_{\text{пер}} = \delta + \Delta\delta + 180 - 2\delta = \Delta\delta + 180 - \delta$. Отсюда $\Delta\delta = (\delta_{\text{нав}} + \delta_{\text{пер}} - 180)/2$. Полученная ошибка $\Delta\delta$ завышает результат, если она положительна, и занижает, если она отрицательна. Для получения правильного результата она должна вводиться в отсчеты с противоположным знаком. Таким образом, формула поправки на смещение места нуля имеет следующий вид:

$$\Delta\delta = \frac{180 - (\delta_{\text{нав}} + \delta_{\text{пер}})}{2}. \quad (2.25)$$

Поправка вводится, если $\Delta\delta > 0,2^\circ$.

2. **Ошибка, вызванная наличием угла коллимации.** При правильном положении призмы полного внутреннего отражения горизонтальная x и вертикальная y составляющие оптической оси теодолита перпендикулярны (рис. 2.12 а). Если призма установлена неверно (рис. 2.12 б), то вертикальная составляющая оптической оси за счет неправильного отражения отклоняется от правильного положения на угол k , называемый углом коллимации. Таким образом, угол коллимации — угол, образованный вертикальной составляющей и перпендикуляром к горизонтальной оси. Чтобы определить угол k , следует произвести отсчеты углов также в положении трубы «наводка» и «перекидка».

В положении «наводка» при отсутствии угла коллимации положение трубы будет OA (рис. 2.12 а), при наличии угла коллимации труба будет направлена по OA_1 , при этом отсчитывается некоторый угол $\alpha_{\text{нав}}$. В положении «перекидка» трубу следует перевести через зенит, поставить в положение, симметричное относительно первого (OA_2), а затем повернуть в горизонтальной плоскости и навести на тот же предмет. При наличии угла коллимации угол поворота будет равен $180 + 2k$, т. е. $\alpha_{\text{пер}} = \alpha_{\text{нав}} + 180 + 2k$, откуда

$$k = \frac{\alpha_{\text{пер}} - \alpha_{\text{нав}} - 180}{2}. \quad (2.26)$$

Формула (2.26) используется для определения угла коллимации. Поправки на коллимацию на станциях не вводятся. Если коллимация превышает $0,5^\circ$, теодолиты бракуются.

3. **Ошибка, связанная с неправильной установкой уровня.** Она вносит искажения в отсчеты обоих углов — горизонтального и вертикального. К сожалению учесть эту ошибку очень трудно, поэтому очень важно регулярно проводить проверку теодолита.

Для того чтобы измерения углов с помощью теодолита были точными, очень важно правильно установить теодолит. При стационарных наблюдениях теодолит устанавливается на столбе. В экспедиционных условиях теодолит крепится с помощью станкового винта к треноге, для этого в станине теодолита имеется соответствующая резьба. Правила установки теодолита на

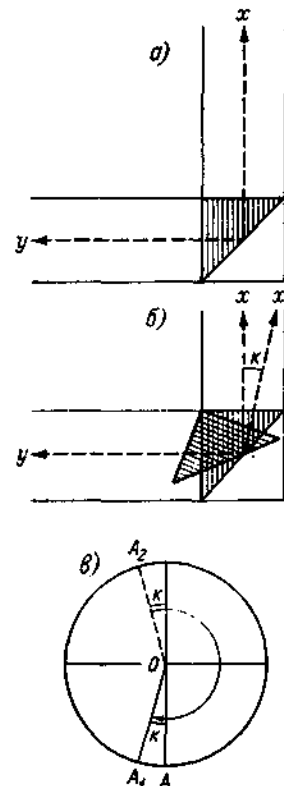


Рис. 2.12. Ошибка из-за неправильно установленной линзы и наличия угла коллимации.

столбе и треноге практически одинаковы, они подробно изложены в Наставлении. Основные операции установки следующие:

Горизонтирование теодолита. Для того чтобы вертикальная ось теодолита была строго перпендикулярна поверхности земли, основание теодолита должно быть горизонтальным. Для горизонтирования теодолита служат уровни. При работе с теодолитом ШТ, имеющем круглый уровень, поворотом горизонтального круга (лимба) располагают уровень посередине между двумя установочными винтами. Поворотом винтов приводят уровень к середине, а затем третьим винтом смещают его в центр, показанный на поверхности уровня. Правильность установки уровня проверяется поворотом трубы на 180° вокруг вертикальной оси. Правильно установленный уровень должен остаться в центре.

Фокусировка окуляра и определение наличия параллакса. Трубу теодолита наводят на хорошо видимый предмет, удаленный на 200—250 м. Вращая кремальеры, добиваются четкого изображения этого предмета и сетки.

Параллакс является следствием неправильной установки креста нитей относительно главной фокальной плоскости объектива, проходящей через фокус объектива. Для определения наличия параллакса, глядя в окуляр на предмет, смещают глаз вправо и влево, вверх и вниз. Если при этом точка, на которую сделана наводка, останется в центре нитей, параллакса нет. Если параллакс (смещение креста) превышает 1 мм, теодолитом пользоваться нельзя.

Ориентирование теодолита. Для того чтобы отсчеты азимута были точными относительно стран света, теодолит должен быть правильно ориентирован—ноль горизонтального лимба должен быть направлен строго на север. Существует несколько приемов ориентирования теодолита.

1. *По буссоли.* Магнитная стрелка буссоли служит для определения направления на север. Теодолит ШТ имеет съемную буссоль. При ориентировании его объектив теодолита следует направить в зенит, чтобы вертикальный угол был равен 90°. На поднятый объектив надевается буссоль. Поворотом трубы вокруг вертикальной оси индекс горизонтального круга нужно подвести к нулевому делению (с учетом магнитного склонения). Затем освободить горизонтальный круг поворотом стопорного винта и, осторожно поворачивая его вокруг вертикальной оси, поставить в такое положение, чтобы конец магнитной стрелки совпал с красной меткой на стенке коробки. После этого с помощью стопорного винта следует закрепить горизонтальный круг.

При ориентировании теодолита АШТ с встроенной буссолью вначале индекс подводят под отсчет $0^\circ \pm$ магнитное склонение, затем открывают стопорный винт и поворачивают теодолит так,

чтобы южный конец стрелки показывал на красную риску в окошке буссоли, и закрепляют стопорный винт.

2. *По миру.* Мирой называется хорошо видимый с места наблюдения предмет (труба, шпиль, башня и пр.) на местности, азимут которого хорошо известен. В этом случае теодолит ориентируют по буссоли и затем наводят на мир, делают отсчет по горизонтальному кругу, он должен быть равен азимуту мира. При ориентировании ШТ или АШТ по миру индекс алидады рабочего окошка подводят под деление горизонтального лимба, равное азимуту мира. Освобождают стопорный винт и с помощью мушки и целика трубу наводят на мир, затем уточняют наводку с помощью винтов так, чтобы мира была в центре нитей, и закрепляют теодолит. Ориентирование по миру проводят только при стационарной установке теодолита.

3. *По Полярной звезде.* В ясные звездные ночи мирой может служить Полярная звезда, азимут которой равен 0° .

4. *По Солнцу.* В истинный полдень тень от теодолита располагается по меридиану, проходящему через точку установки теодолита. При этом тень показывает строго на север и может быть использована в качестве мира.

Помимо правильной установки теодолита большое значение для точного отсчета углов имеет его регулярная проверка. Назначение проверки—определение поправки на смещение нуля вертикального лимба и выявление угла коллимации. Проверка состоит в определении вертикального и горизонтального углов в двух положениях трубы теодолита: «наводка» и «перекидка». Затем по формулам (2.25) и (2.26) определяют инструментальные ошибки теодолита и поправки к вертикальному и горизонтальному углам. При однопунктных наблюдениях проверку делают каждую декаду, 1, 10 и 20-го числа каждого месяца.

2.6.4. Практические методы определения подъемной силы и вертикальной скорости шара-пилота

Метод однопунктных наблюдений основан на допущении постоянства вертикальной скорости шара-пилота. С этой целью выбраны две стандартные вертикальные скорости; 200 и 240 м/мин, для которых с помощью формул, приведенных в разделе 2.4, рассчитаны нормы наполнения оболочки в зависимости от ее веса или диаметра при стандартных условиях, т. е. при температуре 20°C и давлении 760 мм. Эти нормы даны в Наставлении в виде таблиц, в которых для конкретного веса оболочки приведено значение свободной подъемной силы. Отклонение реальных наземных условий от стандартных учитывается в этих таблицах с помощью специального коэффициента $\sqrt{\rho_0/\rho}$, где ρ_0 —плотность воздуха при стандартных условиях, а ρ —плотность воздуха в реальных условиях выпуска шара-

пилота. Определив с помощью таблиц свободную подъемную силу, следует соответственно ей наполнить данную оболочку. Наполнение осуществляется через шланг, подключенный к баллону. Норма наполнения определяется с помощью разновеса, входящего в комплект ШК-50.

В некоторых случаях невозможно определить свободную подъемную силу для получения стандартной вертикальной скорости. Для таких случаев в Наставлении приведены таблицы, с помощью которых можно определить нестандартную вертикальную скорость шара по весу оболочки и приданной ей свободной подъемной силе шара. Свободная подъемная сила определяется после наполнения шара также с помощью разновеса.

2.6.5. Производство шаропилотных наблюдений

Шаропилотные наблюдения обычно производит один наблюдатель, удобнее, однако, делать эту работу вдвоем. Перед выпуском шара следует подготовить теодолит — установить его на треноге, выровнять по уровням, ориентировать по странам света. Для записи отсчетов подготавливается книжка для записи шаропилотных наблюдений КАЭ-1. Затем производится наполнение оболочки и определяется вертикальная скорость шара.

Перед выпуском оболочки наблюдатель направляет зрительную трубу теодолита в ту сторону, куда будет уноситься шар. Непосредственно перед выпуском (за 5 мин) производятся метеорологические наблюдения: измеряется давление, температура и влажность воздуха; по флюгеру определяется скорость и направление ветра у земли, записывается количество и форма облаков, время выпуска. Все данные заносятся в книжку КАЭ-1.

Выпуск шара производится по команде наблюдателя, который в момент выпуска включает секундомер. Сразу после выпуска наблюдатель от руки наводит трубу теодолита на шар с помощью мушки и целика, расположенных на ней. После того как шар-пилот попадет в поле зрения трубы теодолита, наблюдатель с помощью микрометрических винтов производит точную наводку — передвигает зрительную трубу таким образом, чтобы шар находился на перекрестье нитей в поле зрения трубы. Второй наблюдатель в это время следит за секундомером.

В первые 3 мин после выпуска шара отсчеты углов производятся через 0,5 мин, далее через 1 мин. Делается это для того, чтобы получить более детальные сведения о ветре в самом нижнем пограничном слое атмосферы. Отсчеты углов производятся по команде «отсчет», которую подает второй наблюдатель. Если наблюдения проводит один человек, рекомендуется за 5 с до отсчета вести обратный счет: пять, четыре, три, два, один — отсчет. После слова «отсчет» наблюдатель прекращает вращать микрометрические винты и производит отсчет вертикального, за-

тем горизонтального угла с точностью до $0,1^\circ$. Отсчеты углов записывает в книжку в строки, соответствующие времени, прошедшему от момента выпуска.

Наблюдения ведутся до тех пор, пока шар-пилот виден в теодолит, и прекращаются только тогда, когда шар-пилот а) вошел в облако, б) лопнул, в) закрыт нижележащим облаком или стал невидим из-за тумана, мглы, осадков или вследствие слияния с фоном. При вхождении в облако шар начинает туманиться, этот момент отмечается с точностью до 1 с, по нему определяют нижнюю границу облаков.

Для наблюдений в темное время суток к шару-пилоту подвешивается фонарик, который изготавливается из бумаги, в фонарик вставляется свеча или вкладывается небольшая электролампочка с батареей. Вес фонарика учитывается при определении вертикальной скорости шара-пилота.

2.6.6. Обработка шаропилотных наблюдений

Обработка шаропилотных наблюдений заключается в определении скорости и направления ветра на различных высотах по горизонтальным проекциям шара-пилота. Для нанесения каждой проекции шара в данный момент времени нужно знать его азимут (горизонтальный угол) и горизонтальное удаление.

Азимут шара отсчитывается непосредственно по горизонтальному кругу теодолита при наведении на шар. Горизонтальное удаление шара D вычисляется по формуле

$$D = H \operatorname{ctg} \delta,$$

где H — высота шара и δ — вертикальный угол.

Горизонтальное удаление определяется для каждого момента отсчета углов. По значениям го-

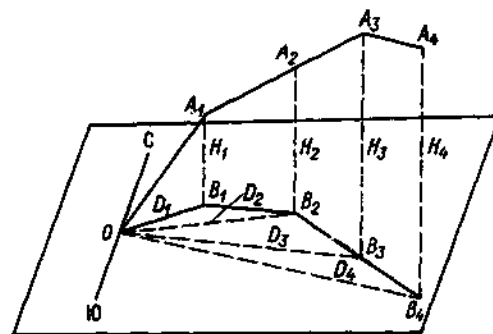


Рис. 2.13. Проекция шара-пилота.

ризонтального удаления и азимута строится траектория шара (рис. 2.13). Высота шара $H = wt$, где w — вертикальная скорость, а t — время. По отрезкам, соединяющим каждую пару соседних (по времени) проекций шара, можно судить о направлении и скорости ветра в слое воздуха, пройденном шаром за время между двумя последовательными отсчетами.

На рис. 2.13 точки A_1, A_2, A_3, A_4 представляют положение шара-пилота в пространстве для тех моментов наблюдений, по которым производится обработка (предположим для 1, 2, 3, 4-й минуты наблюдений); точки B_1, B_2, B_3, B_4 — проекции шара-

пилота на горизонтальную плоскость для тех же моментов; H_1, H_2, H_3, H_4 — высоты шара; D_1, D_2, D_3, D_4 — горизонтальные удаления шара. По отрезкам $OB_1, B_1B_2, B_2B_3, B_3B_4$ можно судить о направлениях и средних скоростях ветра в слоях, проходимых шаром в промежутках времени между последовательными моментами, по которым производится обработка. Полученные данные о ветре относятся условно к уровню, расположенному на середине соответствующего слоя.

Обработка данных наблюдений за шаром-пилотом производится в следующем порядке:

- определяют вертикальную скорость шара-пилота;
- вычисляют высоты шара-пилота для моментов отсчетов и высоты середин слоев над поверхностью земли и над уровнем моря;
- вычисляют высоту облаков;
- наносит проекции шара на круг планшета А-30;
- определяют скорости и направления ветра между проекциями шара-пилота;
- вычисляют скорости и направления ветра для стандартных уровней.

Графическая обработка шаропилотных наблюдений производится с помощью аэрологического планшета А-30, имеющего форму круга. Впервые его предложил П. А. Молчанов, поэтому он также называется кругом Молчанова.

На планшете А-30 выполняют несколько операций: графически вычисляют горизонтальное удаление шара-пилота; в некотором масштабе строят горизонтальную проекцию его пути; определяют скорость и направление ветра в различных слоях атмосферы.

Планшет (рис. 2.14) состоит из трех частей: самого планшета с наклеенной на него номограммой, подвижного целлулоидного круга со шкалой, подвижной целлулоидной линейки.

Целлулоидный круг представляет собой как бы план местности, над которой перемещается шар-пилот, причем центр круга является местом наблюдения. На целлулоидном круге нанесены деления от 0 до 360°. Направление на север соответствует нулевому делению на круге, на восток — 90°, на юг — 180° и на запад — 270°. Целлулоидный круг служит для нанесения на нем проекций шара-пилота с помощью целлулоидной линейки и угловых делений круга, которые соответствуют делениям горизонтального круга теодолита (азимуту).

Для графического определения горизонтального удаления шара-пилота служит номограмма, расположенная в правом верхнем углу планшета. Эта номограмма представляет собой семейство кривых, построенных по уравнению

$$D = H \operatorname{ctg} \delta.$$

Значения вертикального угла изменяются от 0 до 90°. Угловые деления нанесены на номограмме в удвоенном масштабе, так что 90° растянуто по полуокружности; поэтому против 90° обычных делений стоит число 45, а против 180° — число 90. Это сделано для удобства построения номограммы и большей точности обработки.

Каждая кривая номограммы соответствует (в принятом масштабе) горизонтальному удалению шара-пилота для определенной высоты при различных значениях вертикальных углов.

Номограмму можно рассчитать и построить следующим образом (рис. 2.15). Проведем из центра планшета радиусы через 10°. Затем рассчитаем по формуле $D = H \operatorname{ctg} \delta$ горизонтальное удаление шара и отложим в определенном масштабе (1:30 000) на этих радиусах отрезки, соответствующие стандартным значениям высот (100, 200 и т. д.); соединим концы отрезков,

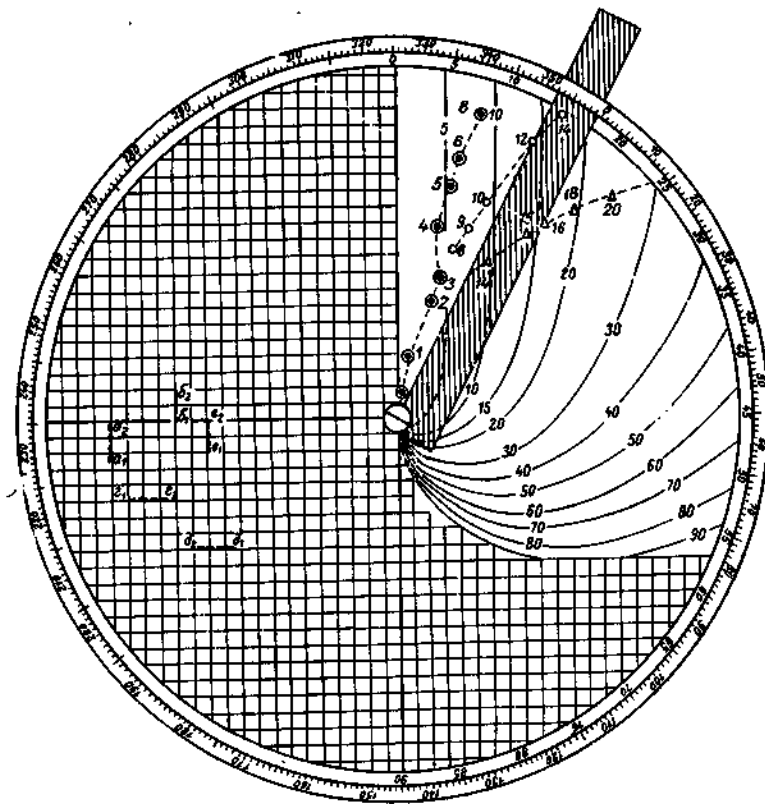


Рис. 2.14. Аэрологический планшет А-30.

относящиеся к одной и той же высоте, плавными кривыми, после чего уберем вспомогательные радиусы с нанесенными на них шкалами. Таким образом мы и получим нужную номограмму.

Кривые на рис. 2.14 нанесены до 2000 м через 100 м, от 2000 до 6000 м через 200 м и от 6000 до 9000 м через 500 м. Цифры, стоящие на кривых, означают высоту, выраженную в сотнях метров.

Для графического определения горизонтального удаления шара-пилота достаточно установить подвижную линейку так, чтобы ее край проходил через центр диаграммы и угловое деление, равное отсчету вертикального угла. Тогда расстояние от центра до точки пересечения края линейки с кривой, соответствующей высоте шара, дает горизонтальное удаление шара.

Остальная часть планшета заполнена сеткой квадратов со стороной, равной 2 мм. Сетка служит для определения скорости ветра. Как кривые, так

и сетка квадратов вычерчена в масштабе 1:30 000, т. е. одно деление сетки соответствует 60 м. Таким образом, если этот отрезок есть проекция пути за 1 мин, то он изображает скорость ветра, равную 1 м/с.

Обработка шаропилотных наблюдений с помощью планшета А-30 сводится: 1) к нанесению на целлулоидный круг проекций

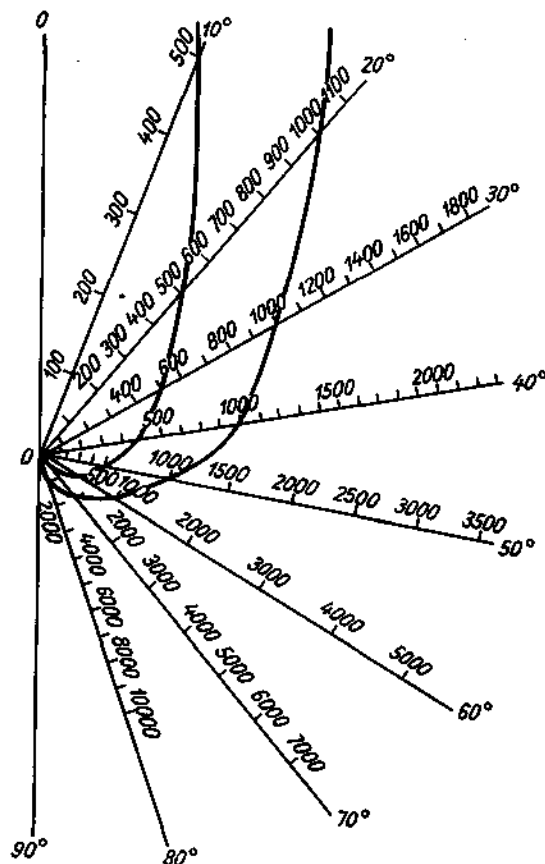


Рис. 2.15. Схема построения кривых на планшете А-30.

шара-пилота и 2) к определению по этим проекциям скорости и направления ветра.

Построение проекции шара-пилота производится так. Край линейки, проходящий через центр круга, устанавливают на деление, соответствующее отсчету вертикального круга. Затем, сохраняя линейку в этом положении, подводят к краю, установленному на вертикальный угол, деление вращающегося целлулоидного круга, соответствующее отсчету горизонтального угла.

В месте пересечения края линейки с кривой высоты, соответствующей обрабатываемой минуте, ставится точка; она нумеруется числом, равным обрабатываемой минуте.

При обработке наблюдений, полученных в первые минуты, точки могут располагаться весьма близко одна от другой. В этом случае масштаб увеличивают в несколько раз (от 2 до 10). Во столько же раз следует увеличить и значения высот. Если точки не укладываются на круге в выбранном масштабе, то масштаб уменьшают. Всякий раз при переходе к новому масштабу последнюю точку наносят дважды — в старом и новом масштабах. Для определения скорости и направления ветра круг поворачивают так, чтобы отрезок, соединяющий две соседние точки, был параллельным линиям сетки. Тогда направление ветра отсчитывают по тому концу диаметра круга, откуда дует ветер.

Значение скорости ветра определяется числом делений сетки, уместившихся между последовательными точками. Если масштаб построения был нормальный, то скорость ветра равна этому числу делений, разделенному на число минут между этими точками. Если масштаб был увеличен в n раз, то для получения скорости число делений следует уменьшить в такое же число раз, и наоборот. Найденные скорость и направление ветра относятся к середине каждого слоя, высота которого определяется как полусумма высот шара в начале и в конце рассматриваемого промежутка времени.

После определения скорости и направления ветра в каждом слое интерполируют их значения для стандартных высот. На станциях, ведущих регулярные шаропилотные наблюдения, заполняют также месячные таблицы результатов шаропилотных наблюдений.

2.6.7. Базисные шаропилотные наблюдения

Одним из самых грубых допущений при производстве шаропилотных наблюдений является допущение о постоянстве вертикальной скорости шара-пилота. Из приведенных выше формул для расчета вертикальной скорости шара следует, что эта скорость обязательно должна меняться с высотой вследствие изменения плотности воздуха. В отдельных случаях (сильно развитая турбулентность и большие вертикальные движения) фактическая вертикальная скорость существенно отличается от табличной, и это приводит к очень грубым ошибкам в определении высоты шара.

Для получения более точных данных о ветре разработан метод базисных шаропилотных наблюдений.

Порядок выполнения базисных шаропилотных наблюдений описан в Наставлении гидрометеорологическим станциям и постам, вып. 4, ч. 2.

Метод базисных шаропилотных наблюдений заключается в том, что за движением летящего шара наблюдения производятся одновременно двумя аэрологическими теодолитами, установленными на концах базы, т. е. на определенном и точно измеренном расстоянии один от другого. Отсчеты углов по обоим теодолитам обязательно следует производить строго синхронно в определенные моменты времени. Зная длину базы, ее азимут и относительную высоту пунктов установки теодолитов (превышение одного из них над другим), по отсчитанным углам тригонометрическим путем (с помощью решения треугольника) вычисляют высоты шара для каждого момента времени. Скорость и направление ветра определяются (как и методом однопунктных шаропилотных наблюдений) с помощью отсчетов по любому из теодолитов.

Место для разбивки базы, на концах которой должны быть установлены теодолиты, выбирается с учетом следующих условий:

1. Первый теодолит (первый пункт) должен быть установлен на территории станции вблизи помещения для наполнения шаров водородом. При этом должен быть обеспечен кратчайший подход ко второму теодолиту (второй пункт).

2. Место для установки каждого теодолита должно быть открытое, вертикальный угол закрытости горизонта не должен превышать 5° во всех направлениях. При этом в направлении от одного теодолита к другому в пределах 30° по горизонту закрытость должна быть меньше 1° , это нужно для избежания потери шара в первые моменты после выпуска.

3. Теодолиты, установленные на концах базы, должны быть взаимно видимы.

4. База должна иметь направление, по возможности перпендикулярное к господствующим ветрам, это условие повышает точность вычисления высоты.

Обычно разбиваются две базы по одному направлению: длинная (1200—2000 м) и короткая (400—600 м). Длинная база предназначается для наблюдений в ясную погоду и при облаках верхнего и среднего ярусов, короткая — для наблюдений при сплошной низкой облачности.

Длина базы определяется после того, как намечены направление и конечные пункты базы. При достаточно ровной поверхности земли расстояние между конечными пунктами короткой базы измеряется стальной мерной лентой. В тех случаях, когда расстояние нельзя измерить лентой, его измеряют тригонометрическим способом, т. е. способом прямоугольных и косоугольных треугольников. Для этого по обе стороны от одного из намеченных пунктов основной базы разбиваются две небольшие вспомогательные базы. Значительно удобнее располагать эти базы под прямым углом к основной (рис. 2.16). Если такой возможности нет, вспомогательные базы разбиваются под лю-

быми углами к основной (рис. 2.17), соблюдая условие, чтобы углы при другом пункте основной базы (углы 1 и 2 на рис. 2.16 и 2.17) были не менее 6° . Вспомогательная база должна быть разбита таким образом, чтобы длина между ее пунктами могла быть измерена мерной лентой.

Для измерения углов 1—6, показанных на рис. 2.16 и 2.17, на концах основной базы и на концах вспомогательных баз, т. е. в точках А, С, В₁ и В₂, устанавливаются веши, углы измеряются геодезическим теодолитом.

В случае прямоугольных треугольников (рис. 2.16) длина базы b вычисляется по формулам:

$$b = a_1 \operatorname{ctg} (\angle 1);$$

$$b = a_2 \operatorname{ctg} (\angle 2).$$

При косоугольных треугольниках (допускается разбивка косоугольных треугольников по одну сторону от основной базы) вычисления производятся по формулам:

$$b = a_1 \frac{\sin (\angle 3)}{\sin (\angle 1)};$$

$$b = a_2 \frac{\sin (\angle 4)}{\sin (\angle 2)}.$$

За истинную длину базы принимается среднее арифметическое из полученных значений с точностью до 1 м.

Если местность повышается или понижается в направлении от первого пункта ко второму, то для уточнения длины базы следует определить превышение одного базисного пункта над другим. Определение превышения производится путем обычного нивелирования.

За азимут базы принимается угол, составленный географическим меридианом и направлением с первого пункта базы на второй. Угол отсчитывается от 0 до 360° с точностью до 1° , за нуль принимается направление на север.

Установка теодолитов на базисных пунктах заключается в следующем: а) закрепление теодолитов, б) установка по

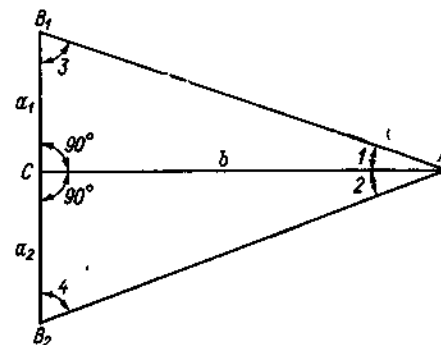


Рис. 2.16. Разбивка вспомогательных баз под прямым углом к основной.

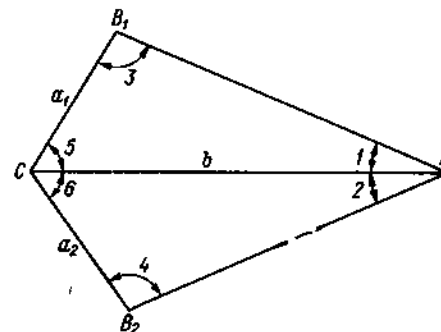


Рис. 2.17. Разбивка вспомогательных баз под любыми углами к основной.

уровню, в) фокусировка и г) ориентировка по базе. Установка и фокусировка теодолитов производятся так же, как при однопунктных наблюдениях. Ориентировка теодолитов производится таким образом, чтобы при направлении труб в одну сторону — от первого пункта вдоль базисной линии и ее продолжения — отсчеты горизонтальных углов по обоим теодолитам были одинаковы и равнялись 0° .

Для обеспечения синхронности отсчетов углов теодолитов на обоих пунктах базы между пунктами организуется телефонная или радиосвязь.

Подготовка к наблюдениям производится аналогично подготовке при наблюдениях с одного пункта: а) проверка связи и сигнализации между пунктами базы; б) установка теодолитов; в) подготовка и наполнение оболочек; г) метеорологические наблюдения; д) выпуск шара и наблюдения за движущимся шаром в теодолиты и е) обработка наблюдений и получение информации о ветре.

2.6.8. Обработка базисных шаропилотных наблюдений

Обработка базисных наблюдений заключается в вычислении истинных высот шара-пилота и средних скоростей и направлений ветра на различных высотах. Высоты шара определяются путем решения треугольников с применением логарифмических таблиц, логарифмической линейки или вычислительных машин. Расчет скоростей и направлений ветра производится графическим методом, путем нанесения на планшет А-30 проекций шара на горизонтальную плоскость.

Обработку наблюдений начинают с установления синхронности отсчетов углов по теодолитам путем сличения секундомеров. Допустимое расхождение секундомеров не более 2 с в 1 ч. После вычисления высот шара обработка ведется так же, как при наблюдениях с одного пункта.

Для расчета высот шара-пилота при базисных наблюдениях осуществляется проектирование шара на горизонтальную или вертикальную плоскость. Применение той или иной формулы обуславливается значениями полученных при наблюдениях углов. Поэтому, приступая к обработке, необходимо предварительно проанализировать эти углы. Обычно обработку ведут проектированием на горизонтальную плоскость. При этом для вычисления высот шара применяют две формулы:

$$H_\delta = b \frac{\sin \beta}{\sin (\alpha - \beta)} \operatorname{tg} \delta; \quad H_\gamma = b \frac{\sin \alpha}{\sin (\alpha - \beta)} \operatorname{tg} \gamma. \quad (2.27)$$

В этих формулах H_δ и H_γ — высоты шара над первым и вторым теодолитом соответственно, b — длина базы в метрах, α и δ — горизонтальный и вертикальный углы по первому тео-

долиту, β и γ — горизонтальный и вертикальный углы по второму теодолиту, $(\alpha - \beta)$ — абсолютная разность горизонтальных углов обоих теодолитов.

При проектировании шара на вертикальную плоскость вычисление его высоты ведется по формуле

$$H = b \frac{\sin \delta' \sin (\gamma \pm \epsilon)}{\sin (\delta' \pm \gamma')}, \quad (2.28)$$

где H — высота шара над первым теодолитом в метрах, b — длина базы в метрах, δ' — проекция вертикального угла с первого пункта на вертикальную плоскость, γ' — проекция вертикального угла со второго пункта на вертикальную плоскость, ϵ — вертикальный угол, под которым виден теодолит второго пункта с первого пункта.

Выбор плоскости проектирования следует проводить с помощью демаркационного графика Зайчикова (рис. 2.18), учитывающего наиболее выгодные условия для применения формулы 2.27 или 2.28 в зависимости от соотношения углов α или β и δ или γ .

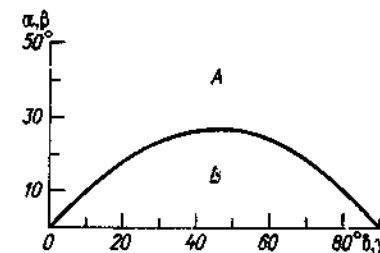


Рис. 2.18. Демаркационный график П. Ф. Зайчикова.

Если точки пересечения значений углов δ и α попадают в область A, то следует применить проектирование на горизонтальную плоскость, а если в область B, то на вертикальную плоскость.

При значениях углов δ или γ меньше 2° , а также при значениях $(\alpha - \beta)$ и одновременно $(\delta' \pm \gamma')$ меньше 4° высота шара не рассчитывается вследствие неопределенности.

В Наставлении, ч. 2 по базисным шаропилотным наблюдениям подробно разбираются ситуации различных положений проекции шара относительно первого и второго пунктов базы и даются рекомендации по выбору способа вычисления высоты шара.

Нанесение проекций шара-пилота на планшет А-30 производится точно так же, как при обработке наблюдений с одного пункта. Также аналогичным образом определяются скорость и направление ветра в слоях между соседними проекциями шара. Различие заключается лишь в том, что к полученным на круге направлениям отрезков между соседними проекциями нужно прибавить азимут базы.

2.7. Радиоветровые наблюдения

Метод шаров-пилотов при всей простоте и доступности обладает рядом недостатков, главным из которых является невозможность применения его при плохой погоде, когда наблюдения

за ветром становятся особенно необходимыми. С развитием радиотехники появилась возможность создания новых методов ветровых измерений путем сопровождения летящей цели с помощью радиолокаторов.

Весной 1943 г., во время Великой Отечественной войны, впервые было осуществлено применение радиолокационных средств для измерения ветра на высотах, а несколько позже была создана первая в мире сеть радиоветровых наблюдений. Измерения производились радиолокатором СОН-2, мишенью служили два отрезка проволоки — полуволновые диполи.

Наблюдения проводились в любую погоду до высот 10—12 км, на длине волны 4 м. Однако в процессе радиоветрового зондирования было обнаружено, что радиолокаторы метрового диапазона имеют малую точность измерений координат, а высота подъема пассивных мишеней радиопилотов недостаточна. Работы над устранением этих недостатков завершились созданием радиотеодолитного метода ветровых наблюдений.

При радиотеодолитном методе наблюдений вместо пассивного отражателя использовалась активная мишень — пеленгуемый радиопередатчик, работающий в импульсном режиме и снабженный бароузлом для измерения давления. Высоты ветрового зондирования значительно возросли. Дальнейшее усовершенствование системы состояло в совмещении функций ветрового и температурного зондирования. Сигналы для пеленга передавались на ультразвуковой частоте прерываний, а кодовые значения метеозлементов передавались на низкой частоте с помощью знаков азбуки Морзе.

В 1953 г. в эксплуатацию был введен специализированный радиотеодолит «Малахит» (рис. 2.19), постепенно заменивший уже изношенную радиолокационную аппаратуру.

Использование радиотеодолита, однако, не привело к заметному уменьшению ошибок определения скорости и направления ветра. Ошибки сильно возрастали при малых вертикальных углах (менее 16°). Поэтому в дальнейшем в радиотеодолит был введен передатчик, а схема передатчика радиозонда была дополнена устройством для ответа на запросный импульс. Это позволило осуществить измерение наклонной дальности.

Следующим этапом усовершенствования системы температурно-ветрового зондирования был переход в дециметровый диапазон. Новая система температурно-ветрового зондирования состояла из радиолокатора «Метеор» (рис. 2.20) и радиозонда РКЗ-1. В ней использован принцип вторичной радиолокации на волне 17 см. Благодаря этому была достигнута более высокая точность сопровождения радиозонда и в значительной мере автоматизирована процедура приема сигналов и обработки результатов зондирования.

Дальнейшим развитием принципов, заложенных в систему «Метеор» — РКЗ-1, является созданная в 1968 г. система

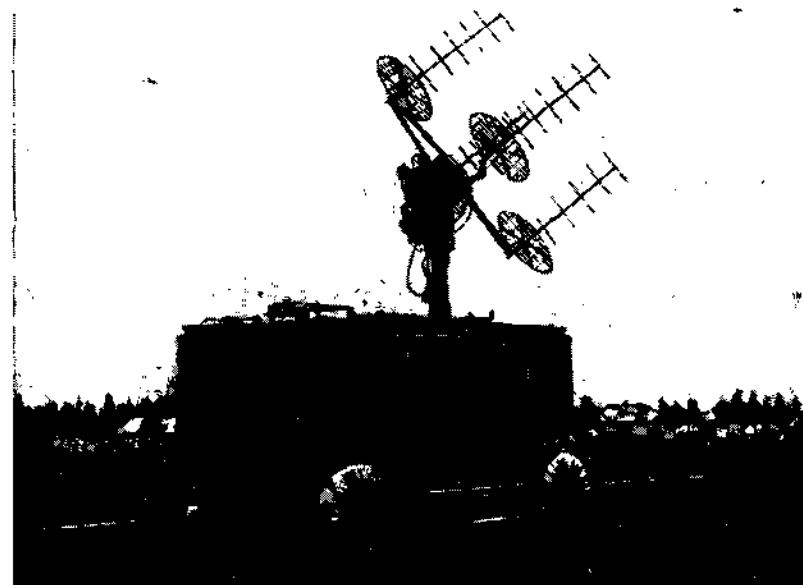


Рис. 2.19. Радиотеодолит «Малахит».



Рис. 2.20. Радиолокационная станция «Метеор».

«Метеорит-2» — РКЗ-5. В сочетании с устройствами для автоматической обработки и представления результатов зондирования эта аппаратура соответствует современному научно-техническому уровню, который требуется от температурно-ветрового зондирования.

Вероятно, в будущем требования к устройствам температурно-ветрового зондирования повысятся. Для удовлетворения возрастающих требований к информации о ветре целесообразно перейти к новому принципу измерения, основанному на эффекте Доплера и на замене одиночного радиопилота трассами хорошо увлекаемых потоками воздуха малых элементарных рассеивателей. Конечно, такая замена потребует значительного усложнения методики и аппаратуры, но теоретические и экспериментальные основы нового метода ветровых измерений уже подготовлены при разработке способов наблюдения за движениями облачных частиц в Центральной аэрологической обсерватории.

Сущность метода радиоветровых наблюдений точно такая же, как и метода шаропилотных наблюдений. Горизонтальная проекция полета шара дает возможность определить средние скорости и направления ветра в различных слоях атмосферы, через которые пролетает шар. Принципиальное различие этих методов заключается в возможности определения при радиоветровых наблюдениях третьей координаты — наклонной дальности, что снимает все ограничения и допущения относительно постоянства вертикальной скорости шара. Кроме того, радиоветровые наблюдения возможны в любую погоду.

В качестве мишеней при радиоветровых наблюдениях используются подвешиваемый к шару передатчик-ответчик, представляющий собой активную мишень, или различного вида уголки отражатели — пассивные мишени, форма и размер которых способны создавать достаточно мощный отраженный сигнал. В качестве передатчиков-ответчиков используются либо радиопередатчики радиозондов, если производится температурно-ветровое зондирование, либо специальные передатчики-ответчики. В системе «Метеорит-2» — РКЗ-5 в настоящее время при ветровых наблюдениях используется передатчик-ответчик А-28.

Таблица 2.4 показывает, какие координаты измеряются (знак плюс) и какие не измеряются (знак минус) при том или ином указанном методе ветровых наблюдений. В тех случаях, когда радиотеодолит не оснащен дальномерной приставкой, высота подъема вычисляется с помощью барометрической формулы по данным радиозонда (давление, температура, влажность).

Подготовка радиолокатора или радиотеодолита к работе заключается в его установке, подведении электропитания и ориентировании. Обычно это стационарные установки, реже передвижные. В стационарных условиях радиолокатор устанавли-

ТАБЛИЦА 2.4

Метод наблюдений	Измеряемые координаты			
	угловые		линейные	
	азимут	вертикальный угол	высота	наклонная дальность
Шаропилотные методы				
1. Одноточечные	+	+	—	—
2. Базисные	+	+	—	—
Радиоветровые методы				
1. Радиотеодолит:				
а) с передатчиком	+	+	—	—
б) с радиозондом	+	+	+	—
в) с дальномерной приставкой	+	+	—	+
г) с дальномерной приставкой и радиозондом	+	+	+	+
2. Радиолокатор:				
а) с уголкового отражателем	+	+	—	+
б) с передатчиком-ответчиком	+	+	—	+
в) с радиозондом	+	+	—	+

вают на втором этаже типового здания аэрологической станции, передвижной радиолокатор размещается в специальном фургоне (рис. 2.19 и 2.20). После монтажа производят горизонтирование антенной колонки с помощью уровней, смонтированных в ее основание. Затем ориентируют антенную систему радиолокатора.

Антенны радиолокаторов и радиотеодолитов имеют геометрическую, электрическую и оптическую оси. Геометрической осью называют ось симметрии антенны. Электрическая ось должна совпадать с геометрической, что достигается соответствующей регулировкой рефлектора в станциях типа «Метеорит» или юстираторов в радиотеодолите «Малахит». Оптической осью антенны является оптическая ось установленного на ней визира. Визир всегда смещен относительно центра антенны. Оптическая ось должна быть параллельна геометрической и электрической осям. Согласование осей обеспечивается заводом-изготовителем. На аэрологической станции регулировка визира не производится.

Прежде чем ориентировать радиолокационную станцию по меридиану, проверяют согласование визира с электрической осью антенной системы.

При правильной установке геометрическая ось антенны в горизонтальной плоскости должна совпадать с истинной верти-

калью, а геометрическая ось вращения в вертикальной плоскости должна быть строго горизонтальной. Первое требование обеспечивается строгой установкой антенной колонки по уровням, а второе — конструкцией привода станции.

Ориентирование радиолокатора по меридиану производится так, чтобы при направлении антенны на север отсчет по шкале азимута был равен 0° . Для ориентирования радиолокатора выбирают мир, удаленную от него на расстояние не менее 500 м и имеющую характерную точку для наводки визира антенны или трубы теодолита. Азимут мира определяется любым астрономическим способом, позволяющим получить точность не хуже 1° . В исключительных случаях в качестве временной меры для определения азимута мира можно использовать буссоль. При определении азимута мира теодолит устанавливается в створе между радиолокатором и миром или рядом с антенной радиолокатора, в последнем случае теодолит может быть смещен вправо или влево от линии створа не более чем на 1 м.

В ясную ночь радиолокатор может быть ориентирован по меридиану с помощью Полярной звезды. Для этого антенну наводят на Полярную звезду. Ее изображение должно находиться в перекрестье нитей оптического визира. В этом положении шкалу азимута станции устанавливают на 0° , затем наводят антенну на мир и определяют азимут мира.

Угол места характерной точки мира определяют с помощью теодолита, установленного рядом с антенной. Труба теодолита должна находиться примерно на той же высоте, что и визир антенны. Требуемая точность определения вертикального угла мира зависит от типа радиолокатора. Для станций «Метеорит» и «Метеорит-2» эта точность должна быть не хуже 1 мин.

После определения координат мира на ее характерную точку наводят антенну радиолокатора с помощью установленного на ней визира. Антенну закрепляют в этом положении. На шкалах угловых координат выставляют значения угловых координат мира. В дальнейшем миром пользуются для проверки сохранности выставления шкал угловых координат радиолокатора. Периодичность проверки определяется наставлениями.

Точность сопровождения цели по угловым координатам проверяется посредством наблюдения ее в визир антенны. При этом определяется величина ее отклонения от перекрестья нитей в делениях угломера. Это называется контрольными наблюдениями. Если антенна имеет радиопрозрачное укрытие, точность сопровождения цели осуществляется посредством синхронных сравнительных наблюдений с помощью радиолокатора и оптического аэрологического теодолита за свободно летящим шаром, несущим радиопередатчик или уголкового отражатель.

Теодолит и радиолокатор должны располагаться в непосредственной близости с возможно меньшим превышением одного

над другим. Отсчеты угловых координат можно начинать лишь после удаления цели на расстояние, достаточное для того, чтобы ошибка за счет базы между радиолокатором и теодолитом не превышала одного деления угломера (0—01 д.у.).

Место выпуска шара при радиоветровых наблюдениях обычно выбирают на расстоянии 100—200 м от радиолокатора по направлению господствующих ветров. При таком выборе места шар с первых же минут будет удаляться от станции. Этим обеспечивается возможность сопровождения радиозонда с момента выпуска. При ином расположении места выпуска по отношению к радиолокатору возможны пропуски наблюдений за радиозондом в первые минуты. Газогенераторное помещение или водородохранилище должно находиться рядом с местом выпуска; место выпуска, газогенераторное помещение и радиолокатор должны быть взаимно видимыми.

Имея измеренные значения наклонной дальности D и вертикального угла δ , по формуле $H = D \sin \delta$ нетрудно определить высоту подъема шара H . Обычно высоту подъема шара вычис-

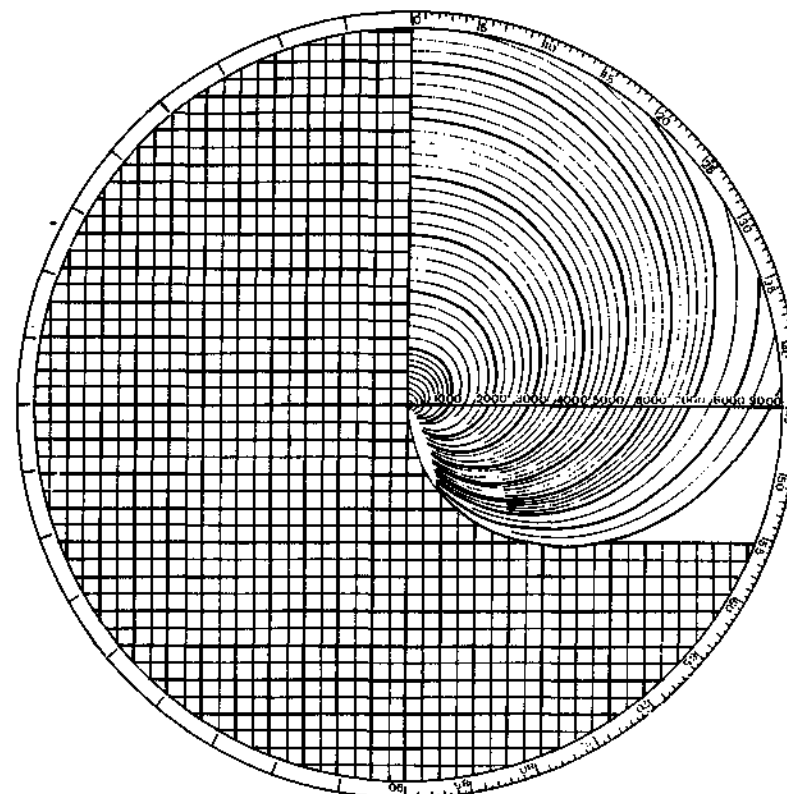


Рис. 2.21. Аэрологический планшет А-30Д.

ляют с помощью логарифмической линейки или вспомогательных кругов. К вычисленным таким образом высотам шара прибавляют высоту антенны над уровнем моря. Начиная с наклонной дальности 20 км вводят поправку на кривизну Земли и рефракцию радиоволн.

Горизонтальное удаление шара L вычисляют по формуле $L = D \cos \delta$. Практически его не вычисляют, горизонтальная проекция полета шара при радиоветровых наблюдениях строится на планшете А-30Д (рис. 2.21), аналогичном планшету А-30. Разница заключается только в том, что вместо семейства кривых $L = H \operatorname{ctg} \delta$ в этом случае построено семейство кривых $L = D \cos \delta$ и шкала вертикальных углов оцифрована в делениях угломера радиолокатора. Одно деление угломера равно 6° . Дальнейшая обработка ветровых наблюдений аналогична обработке однопунктных наблюдений.

Если на аэрологической станции проводятся только радиоветровые наблюдения, то полученная информация о ветре передается в виде телеграммы, составленной по коду КН-03. Телеграмма передается в адреса, установленные ГУГМС и местными УГМС.

2.8. Измерение ветра с помощью сигналов навигационных станций

Обычно в литературе результаты измерений ветра именуют по способу измерения, т. е. различают «шаропилотный» ветер и «радиолокационный» ветер, который в иностранной литературе именуется радарным ветром (radar wind). В последние годы появилось новое определение — «навигационный» ветер. Это означает, что измерение координат радиозонда производилось с помощью системы навигационных станций. Этот метод разработан в США и предназначен в основном для судов погоды, так как использование радиолокаторов на судах требует дополнительных затрат на стабилизирующие устройства, чтобы устранить влияние качки на работу антенны радиолокатора.

Сущность метода при этом остается прежней, т. е. по последовательно определенным координатам летящего шара строится горизонтальная проекция траектории шара, отдельные отрезки которой характеризуют направление и скорость ветра в различных слоях атмосферы. Принципиальное отличие состоит в способе определения координат, которые в данном случае измеряются с помощью системы навигационных станций, излучающих радиоволны на сверхнизких частотах (Very Low Frequencies — очень низкие частоты). В США создана система навигационного радиозондирования «НЭВЭИД» (NAVAID), использующая системы навигационных станций «Омега» или VLF. Принцип действия в обоих случаях одинаков.

Передающие навигационной системы «Омега» работают на очень низких частотах в трех диапазонах: 10,2; 11,3 и 13,6 кГц. Вследствие того что радиоволны на низких частотах распространяются на очень большие расстояния, восемь станций достаточно для того, чтобы полностью охватить территорию земного шара и в любом месте иметь возможность принимать сигналы от двух пар станций.

Навигация осуществляется с помощью приема и фазового сравнения сигналов от двух пар станций. Каждая станция излучает радиоволну, которая распространяется свободно во всех направлениях. На рис. 2.22 а показано

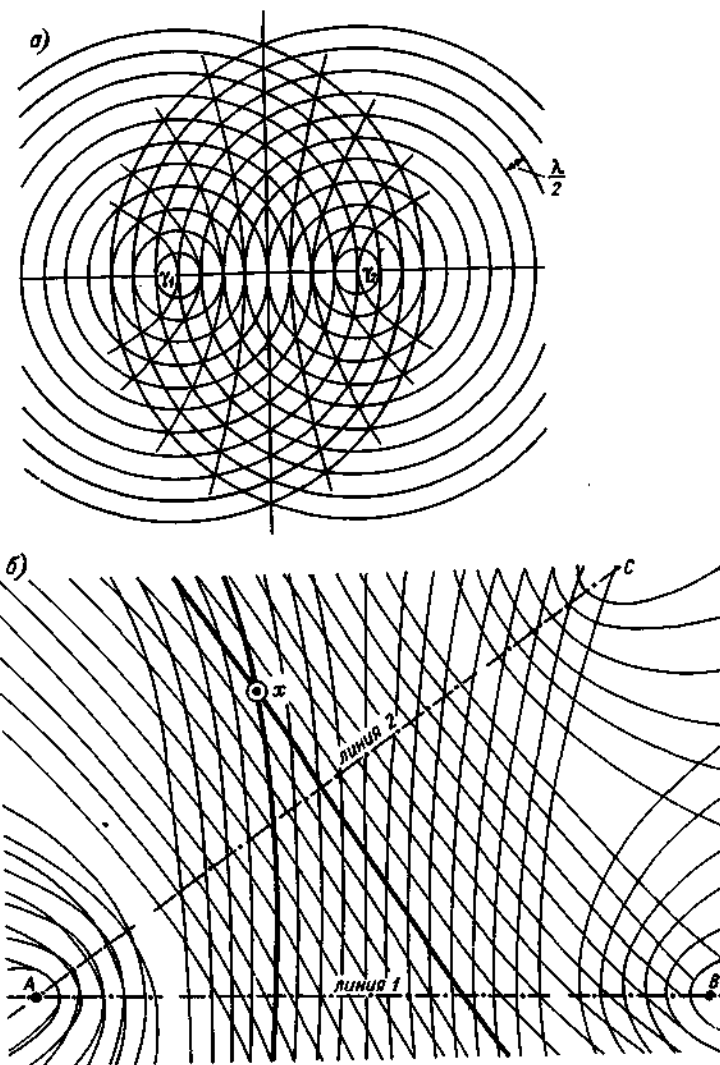


Рис. 2.22. Определение координат радиозонда с помощью системы навигационных станций.

а — построение одной линии положения по радиосигналам двух станций;
б — построение результирующей координатной сетки по радиосигналам трех станций.

результатирующее поле для двух станций в какой-то момент времени. Концентрические кольца соединяют точки нулевого электрического поля радиоволны для двух станций. Гиперболы на рисунке показывают геометрическое место (местоположение) всех точек, разность фаз которых является одинаковой и не меняется с расстоянием от станций. Сеть гиперболических линий, полученная соединением точек с нулевым полем, общая для двух полей. Разность фаз на гиперболических кривых равна нулю. Эти линии называются линиями положения радиозонда (LOP — Line of Position).

Так как сеть гипербол остается географически постоянной, она может быть принята за новую систему координат для определения географического местоположения. Однако совершенно ясно, что одна линия положения не дает возможности определить координаты радиозонда, для этого нужна вторая

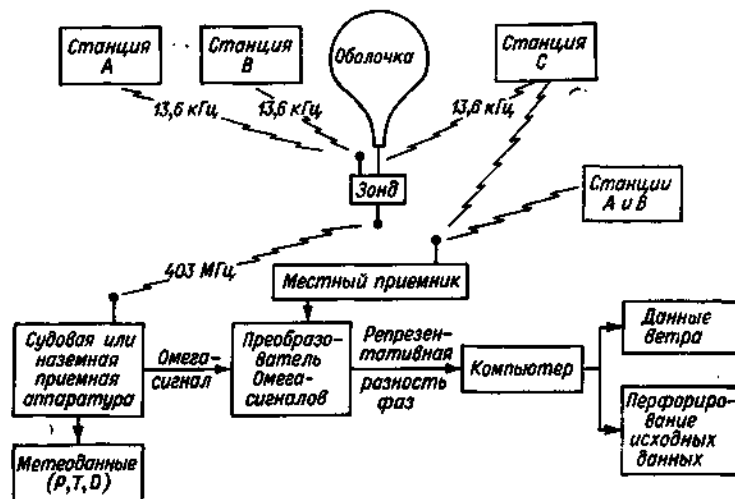


Рис. 2.23. Принципиальная схема навигационной системы радиозондирования «Омега».

пара станций и вторая система линий положения. Это достигается привлечением третьей радиостанции. Схема расположения станций показана на рис. 2.22 б. Пара передатчиков А и В формирует одну систему гиперболических координат, пара А и С — другую систему. Результирующая координатная сетка показана в центре рис. 2.22 б. Измерение разностей фаз дает возможность определить две гиперболические линии, пересечение которых теперь определяет точное положение точки х в горизонтальной плоскости. Последовательное определение координат дает возможность построить горизонтальную проекцию траектории зонда и определить скорость и направление ветра. Линейная координата в данном случае не определяется, высота шара вычисляется с помощью барометрической формулы по измеренному радиозондом давлению.

Сигналы, излучаемые станциями системы «Омега», передаются в определенной последовательности, которая повторяется каждые 10 с. Каждая станция посылает каждую секунду радиосигналы на выбранной частоте (например, 13,6 кГц). Принципиальная блок-схема системы радиозондирования «Омега» показана на рис. 2.23. Радиозонд на частоте станций системы «Омега» воспринимает сигналы трех станций (А, В и С) и ретранслирует эти сигналы на наземный приемник с несущей частотой 403 МГц и модулирующей частотой от 10 до 200 Гц. Приемная аппаратура на судне принимает телеметрические сигналы и разделяет их на сигналы метеоданных и навигационные

сигналы. Изменение положения судна не вносит искажений в фазу системы «Омега». Приемник направляет сигналы метеоданных в регистратор радиозонда или вычислитель информации. Вычислитель использует фиксированную омега-частоту для получения разности фаз между сигналами от выбранной пары станций. После преобразования разности фаз специализированный компьютер производит вычисление скорости и направления ветра и выдает их на печать.

Местный приемник, установленный на борту судна, используется для предварительной настройки и выбора двух пар станций. Точность определения координат радиозонда в большой степени зависит от взаимного расположения радиозонда и всех трех станций. Наилучшая точность получается при пересечении гиперболических линий в положении, близком к перпендикулярному. Если же эти линии пересекаются под очень острым углом, возникает значительная зона неопределенности, вызывающая ошибку в определении координат и соответственно в обработке ветровых данных.

Описанная система навигационного зондирования в настоящее время широко внедряется в практику работы на иностранных научно-исследовательских судах. Однако следует заметить, что, хотя этот метод измерения ветра новый и, безусловно, перспективный, в настоящее время он еще недостаточно отработан и часто дает сбой в работе.

Кроме упомянутых выше систем VLF и «Омега» известна еще одна система зондирования «Кора» (Cora), которая представляет собой модификацию омега-зонда и приемной аппаратуры, выполненную фирмой Финляндии «Вайсала».

3 МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ, ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

Температура, влажность, давление и плотность воздуха являются важнейшими параметрами, характеризующими состояние атмосферы — ее строение, или структуру. Поэтому иногда их называют *структурными параметрами* атмосферы. Вместе с данными о ветре их называют *термодинамическими параметрами*, так как они характеризуют термодинамику атмосферы.

3.1. Особенности аэрологических измерений

Во введении было показано, что аэрологические измерения постоянно расширяются и совершенствуются вместе с развитием науки и техники. Главная особенность аэрологических измерений заключается в том, что условия работы приборов в верхних слоях очень сильно отличаются от наземных условий. В аэрологии в первую очередь измеряется распределение параметров по высоте — вертикальные профили.

Диапазон изменения значений различных параметров в вертикальном направлении намного больше, чем у земной поверхности. Так, суточные колебания температуры воздуха у поверхности земли в наших широтах в среднем составляют 5—10°C, в пустыне они достигают 30°C, тогда как за время подъема зонда (1,5—2 ч) температура окружающей среды изменяется на 90—100°C (например, от +30°C у земли до —70°C в стратосфере). Влажность воздуха за это же время может измениться от 100 до нескольких процентов и при этом не один, а несколько раз. О давлении воздуха и говорить нечего. Если у земли между суточными изменениями давления составляют несколько миллибар, а абсолютная разность между самым высоким и самым низким давлением на уровне моря, наблюдаемая за всю историю метеорологических измерений, равна 196 мбар, то в свободной атмосфере диапазон изменения давления по вертикали достигает 1000 мбар и более. Эти условия определяют одно из основных требований к аэрологическим приборам — их малую инерцию,

т. е. чувствительные элементы приборов должны моментально реагировать на быстрые изменения метеорологических элементов.

При полете прибора в свободной атмосфере могут возникать разнообразные ошибки, определяемые как условиями измерений, так и подъемными средствами. Устанавливая различные датчики на ракете или на современных самолетах, необходимо учитывать очень большие скорости подъема и спуска, которые приводят к перегреву чувствительных элементов, а следовательно, к завышению температуры воздуха и занижению относительной влажности. Огромные скорости ракет вообще требуют создания особых методов измерений. С другой стороны, при более медленном подъеме на воздушных шарах на приборы влияет солнечная радиация, искажая их показания. В результате значения температуры, влажности и давления тоже могут оказаться ошибочными. Таким образом, для измерения метеорологических элементов в свободной атмосфере нужны приборы особой конструкции и для каждого из них вполне определенные условия подъема и эксплуатации.

Эти ограничивающие обстоятельства приводят к тому, что в настоящее время точность аэрологических измерений ниже, чем метеорологических. В табл. 3.1 приведены значения точности, которых должны добиваться аэрологи всех стран при разработке новых видов аэрологической аппаратуры. Эти требования установлены синоптической и аэрологической комис-

ТАБЛИЦА 3.1

Измеряемый параметр	Требуемая точность
Температура на всех уровнях	0,5°C
Давление на всех уровнях	1 мбар до 20 км, от 0,5 до 0,2 мбар выше 20 км
Относительная влажность	
в тропосфере	5%
в стратосфере	10%
Скорость ветра	1 м/с
Направление ветра	
в тропосфере	5°
в стратосфере	10°
Высота изобарической поверхности	
до 1500 м	1,5 дам
от 1500 до 20 000 м	0,2%
выше 20 км	0,1%

сией ВМО в соответствии с нуждами современной науки. К сожалению, современная точность многих видов аэрологических измерений еще не отвечает этим требованиям.

Аэрологические приборы обычно измеряют физические параметры датчика (деформацию механических датчиков, сопротивление и емкость электрических чувствительных элементов). Физическое состояние датчика является результатом воздействия на него окружающей среды. Поэтому, для того чтобы получить значение параметров атмосферы в общепринятых единицах (температуру в градусах, давление в миллибарах или миллиметрах, относительную влажность в процентах и т. д.), следует обработать показания прибора. Для этого создается методика их обработки, описываемая обычно в соответствующих инструкциях, методических указаниях и наставлениях. Эта методика обеспечивает правильность и тождественность обработки результатов измерений на разных станциях различными наблюдателями.

Для службы погоды очень важно, чтобы результаты измерений разными методами, произведенных одновременно на разных станциях, были сравнимы между собой. Поэтому желательно, чтобы все станции были оснащены однотипной измерительной аппаратурой. Однако в настоящее время в мировой аэрологии применяются разнотипные приборы, поэтому ВМО регулярно организует сравнения различных радиозондов, самолетных и ракетных приборов. Сравнения позволяют определить, допустимы или недопустимы реально существующие расхождения в результатах измерений разными методами. В наши дни потребность в точных измерениях параметров атмосферы на больших расстояниях и высотах приводит к стремлению все более совершенствовать методы измерений, используя для этого достижения современной науки и техники. Уровень создания аэрологических приборов определяется общим техническим прогрессом в той стране, где они создаются. Поэтому в разных странах они развиваются неравномерно, отсюда и большая разнотипность аэрологических методов. Только сравнения этих методов, а также обмен опытом и идеями ученых разных стран могут способствовать улучшению этого положения.

3.2. Некоторые понятия измерительной техники

Измерение есть нахождение физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Измерения могут быть *прямыми*, когда искомое значение параметра находят непосредственно в процессе измерения, и *косвенными*, когда искомое значение рассчитывают на основании известной зависимости между измеряемым параметром и величинами, которые определяют путем прямых измерений.

Для более четкого понимания процесса измерения различных параметров рассмотрим некоторые понятия, принятые в измерительной технике, характеризующие возможности прибора.

Измерение того или иного физического элемента основано на том, что прибор или измерительный элемент изменяют свое состояние в зависимости от изменения измеряемого параметра. Например, вспомним всем известный ртутный термометр. Ртуть изменяет свой объем под влиянием изменения температуры: сжимается при понижении температуры и расширяется при ее повышении. Следовательно, измерять тот или иной параметр может только такой прибор, который реагирует на изменение данного параметра, т. е. обладает необходимой чувствительностью.

Чувствительностью прибора называется отношение наблюдаемого по прибору эффекта к вызывающему этот эффект изменению измеряемой величины. Например, чувствительностью термометра сопротивления будет называться отношение $\Delta R/\Delta T$, т. е. изменение сопротивления R , вызываемое изменением температуры на 1°C .

У приборов с равномерной шкалой чувствительность одинакова для любой точки шкалы, т. е. для любого участка диапазона изменений измеряемой величины. Вспомним шкалу ртутного термометра. Там все деления шкалы одинаковы во всем диапазоне температур. Однако чаще встречаются приборы с неравномерной шкалой; в таких приборах чувствительность определяется для отдельных участков диапазона изменения измеряемой величины.

Чувствительность прибора определяется обычно в лабораторных условиях при его градуировке. *Градуировкой* прибора называется определение зависимости свойств чувствительного элемента от изменения измеряемой величины. Обычно градуировку производят в специальных камерах, в которых можно искусственно изменять параметры среды (давление в барокамере, температуру в термокамере и т. д.), а также с помощью образцовых приборов измерять эти параметры. Результаты градуировки в виде графиков или таблиц называются градуировочными характеристиками и являются неотъемлемой частью прибора.

При использовании различных приборов кроме их чувствительности обязательно нужно знать погрешности измерений, которые, вообще говоря, в той или иной мере присущи любому виду измерений. Погрешностью, или ошибкой, измерения называется отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

В измерительной технике *абсолютной* погрешностью Δx результата измерений называется разность между измеренным x и истинным x значениями измеряемой величины, $\Delta x = x - x$.

Истинное значение $\bar{x}$ может быть определено как среднее арифметическое результатов большого числа измерений, тщательно произведенных в неизменных условиях.

Однако в аэрологии такой способ определения абсолютной погрешности неприменим, так как невозможно произвести большое число измерений при неизменных условиях. В связи с этим абсолютную погрешность измерений определяют на основании результатов лабораторных экспериментов, обработанных методами математической статистики.

Относительной погрешностью называется отношение абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины. Так, если абсолютная погрешность измерения давления равна ± 1 мбар, то относительная погрешность составит $\pm 0,001$ при давлении 1000 мбар и $\pm 0,1$ при давлении 10 мбар.

Измеренные значения всегда искажены вследствие несовершенства прибора, влияния на него окружающей среды и индивидуальных ошибок наблюдателя. Эти источники погрешностей бывают постоянными или меняются со временем. По своей природе погрешности могут быть случайными и систематическими. Случайные погрешности устранить нельзя. Результаты нескольких измерений с помощью того же прибора и в тех же условиях вследствие случайных погрешностей будут отклоняться друг от друга (рассеиваться).

Случайные различия измеренных значений, которые можно определить, например, при сравнительных подъемах двух радиозондов одинакового типа на одном подвесе, не будут повторяться для следующей серии подъемов. Указанные различия могут быть вызваны ошибками при проверке приборов, их повреждениями, возникшими при перевозке, различиями во влиянии окружающей среды, недостатками подготовки и регулировки приборов.

Систематическими называют погрешности, остающиеся постоянными или изменяющиеся по определенному закону при повторных измерениях одной и той же величины. Они могут быть изучены, и результаты измерения могут быть уточнены путем введения поправок. Систематической погрешностью является, например, радиационная ошибка радиозондов, которую можно до некоторой степени оценить путем сравнительных подъемов разных приборов. Однако для точных определений систематических погрешностей необходимо иметь при сравнительных подъемах образцовые приборы (радиозонды, метеорографы), свободные от погрешностей, либо такие, для которых погрешность измерения весьма мала, либо хорошо известна.

Следует различать также *инструментальную* погрешность, являющуюся частью погрешности измерений, зависящей от применяемых средств измерений. Для конструирования приборов важна инструментальная погрешность. Но для использования данных важны погрешности результатов измерений. Они вклю-

чают в себя инструментальную погрешность и ошибки, связанные с обработкой наблюдений.

Точность измерения физических величин обеспечивается специальной метрологической службой. *Метрология* — особая наука об измерениях, о методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Для определения погрешностей различных измерений используются эталонные и образцовые средства измерений.

Чувствительные элементы, используемые для измерений различных физических величин, называются *первичными измерительными преобразователями*, менее правильно — датчиками. Измерительный преобразователь есть средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем. Рассмотрим измерительные преобразователи, применяющиеся в аэрологии в различных измерительных системах.

3.3. Измерение давления

Атмосферное давление является важнейшей характеристикой состояния атмосферы, так как с его пространственными и временными изменениями связано развитие многих атмосферных процессов, в особенности возникновение воздушных течений и изменение их характера.

Атмосферным давлением называется вес столба воздуха, приходящийся на единицу поверхности. Ранее в метеорологии было принято измерять давление в *миллиметрах ртутного столба* (мм рт. ст.), что связано с устройством основного прибора для измерения атмосферного давления — *ртутного барометра*. В этом приборе атмосферное давление уравновешивается давлением столба ртути; изменение высоты ртутного столба определяется изменением атмосферного давления.

В настоящее время в физике атмосферы давление чаще выражают в абсолютных единицах — *миллибарах* (мбар). Один миллибар — это давление, которое сила в 1000 дин производит на площадь в 1 см². Среднее атмосферное давление на уровне моря равно 760 мм рт. ст., что составляет 1013,2 мбар. Для перехода от величины давления в миллиметрах ртутного столба к величине в миллибарах надо давление в миллиметрах ртутного столба умножить на $\frac{4}{3}$, для обратного перехода используется множитель $\frac{3}{4}$. В системе единиц СИ давление выражают в ньютонах на 1 м² (Н/м²) или паскалях (Па), 1000 мбар = 10⁵ Па.

Измерение давления необходимо прежде всего для определения высоты, на которой находится метеорограф или радиозонд.

Полезно запомнить следующие приближенные соотношения между высотой и давлением воздуха:

Давление, мбар	700	500	300	200	100	50	25	10	5	2	1
Высота, км	3	5	9	12	16	20	25	30	36	45	50

Образцовым прибором для измерения давления служит ртутный барометр, с помощью которого измеряется давление на станциях, а также при проверке аэрологических приборов перед выпуском.

В аэрологии для измерения давления до высоты 40 км применяются металлические барометры — анероиды. Датчиком давления в аэрологических приборах служит металлическая мембранная коробка (коробка Види) или изогнутая манометрическая трубка (трубка Бурдона).

Кроме барокоробок в аэрологии для измерения давления применяют гипсотермометры. Для измерения давления на ракетах на высотах более 30 км применяют принципиально иные методы.

3.3.1. Барометры-анероиды

Анероидная мембранная коробка (рис. 3.1) представляет собой невысокую герметическую коробку кругового сечения. Основаниями ее служат гофрированные мембранные пружины, а боковые стенки жесткие. Мембранные коробки изготавливаются из бериллиевых сплавов, фосфористой бронзы или специальных сталей. Коробки, подвергнутые термической обработке, почти свободны от гистерезиса и упругого последействия.

Мембранные пружины спаиваются или свариваются по краям, образуя таким образом анероидную коробку. Воздух из коробки выкачивается, так что давление газа в ней составляет несколько миллибар. Иногда для температурной компенсации коробка заполняется химически инертным газом (чаще всего азотом) до давления 40—50 мбар.

Под действием внешнего давления мембранная коробка сжимается (или расширяется) до тех пор, пока упругие силы мембран коробки и заключенного в ней газа не уравновесят внешнее давление.

Центр одной мембраны коробки крепится неподвижно к станине прибора, а вторая мембрана свободно прогибается. Про-

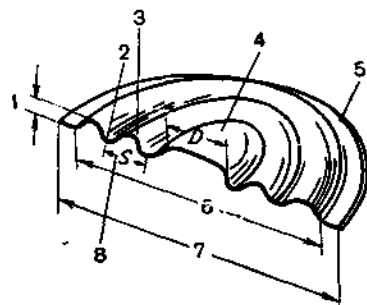


Рис. 3.1. Мембрана анероидной коробки.

1 — высота гофра; 2 — впадина гофра; 3 — вершина гофра; 4 — плоский центр; 5 — борт мембраны; 6 — радиус коробки; 7 — радиус гофра; 8 — шаг гофра.

гибом коробки называется нормальная составляющая перемещения центра свободной мембраны коробки. Величина прогиба является функцией давления воздуха. Для плоской мембраны эта величина пропорциональна корню кубическому из давления $\sqrt[3]{p}$. С помощью нанесения на мембрану круговых гофр добиваются прогиба, пропорционального давлению p . Обычно в аэрологических приборах применяются такие «линеаризованные» анероидные коробки, прогиб которых прямо пропорционален давлению. Величина прогиба коробки ΔS выражается следующей приближенной формулой:

$$\Delta S = C \frac{R^4}{h^3 E} \Delta p, \quad (3.1)$$

где R — радиус анероидной коробки, h — толщина мембраны, Δp — изменение внешнего давления, E — модуль упругости материала коробки, C — коэффициент.

Эти малые смещения с помощью механической передачи увеличиваются во много раз и передаются указателю или регистрирующему устройству.

Таким образом, для увеличения чувствительности коробки $\Delta S/\Delta p$ можно или увеличивать диаметр коробки $2R$, или уменьшать толщину мембраны h . Однако увеличение размеров коробки и уменьшение толщины мембраны сопровождаются уменьшением прочности коробки и ее мощности, необходимой для преодоления трения. Кроме того, величина прогиба не может превышать 5% диаметра коробки. Обычно диаметр коробки составляет 4—6 см, а высота 4—6 мм. Следовательно, наибольший прогиб мембранной коробки не может превышать 2—3 мм.

Для получения большей величины прогиба применяют не одну коробку, а блок из 2—4 мембранных коробок, соединенных друг с другом. Центр нижнего основания блока жестко прикрепляется к станине метеорографа (радиозонда), а верхняя мембрана соединяется с помощью рычагов и тяг с пером (указателем). Перо производит запись хода изменения давления на ленте, надетой на барабан, вращаемый часовым механизмом, или манипулирует передатчиком радиозонда. В результате применения системы рычагов и тяг смещение пера (указателя) превосходит прогиб мембранных коробок в несколько десятков раз.

Применение коробок с линейной характеристикой позволяет с достаточной точностью определять не очень малые значения давления. Для точного измерения малого давления на больших высотах применяют мембраны с очень плоскими гофрами. Чувствительность таких коробок при низком давлении может быть в несколько раз больше чувствительности при наземном давлении.

Для увеличения точности измерения давления во всем диапазоне измеряемого давления применяют также коробки

с запаздываемым включением. Такие коробки включаются только при достижении определенной высоты.

Другим видом приемника давления является анероидная манометрическая трубка (трубка Бурдона). Она представляет собой полую изогнутую металлическую трубку. Поперечное сечение ее эллиптическое. Из трубки выкачан воздух. Один конец ее жестко прикрепляется к станине прибора, а другой конец свободно перемещается. Смещение свободного конца трубки, увеличенное системой рычагов и тяг, служит мерой изменения давления. Однако манометрическая трубка обладает меньшей чувствительностью, чем мембранная коробка.

Мембранные барометры-анероиды отличаются простотой устройства и изготовления, небольшим весом, и поэтому они дешевы. Однако их показания искажаются под влиянием температуры и инерции.

С изменением температуры изменяется модуль упругости материала коробки и упругость заключенного в ней газа. Поэтому при одном и том же давлении воздуха, но разной температуре показания анероида различны. Имеется несколько способов для уменьшения влияния температуры или его устранения. Наиболее известным является установление точки компенсации. Этот способ состоит в том, что при изготовлении коробки в ней оставляют некоторое количество газа, упругость которого при некотором значении внешнего давления p_k (компенсационном давлении) вполне компенсирует влияние температуры. При этом давлении показания анероида остаются одинаковыми при любой температуре.

При других значениях давления ошибка, обусловленная влиянием температуры, все же сохраняется.

Эта ошибка будет тем меньше, чем ближе измеренное давление к компенсационному.

Компенсационное давление для коробок подбирается в соответствии с высотой подъемов, для которых предназначены приборы. Так, в самолетных метеорографах, поднимаемых до высот 5—7 км, $p_k = 550 \pm 450$ мбар, в радиозондах, поднимаемых до 20—25 км, $p_k = 100$ мбар. Для других значений давления следует вносить соответствующие поправки, определяемые при поверке приборов на давление при двух различных температурах — положительной и очень низкой отрицательной.

Для устранения влияния температуры на величину прогиба коробки с большим успехом применяют так называемые биметаллические компенсаторы. Биметалл, включенный в рычажную передачу или связанный с коробкой, изгибается при изменении температуры так, что влияние температуры на показания барокоробки почти полностью компенсируется. Исключить влияние температуры можно путем помещения всего узла давления в термостат, создав в нем температуру, равную той, которая была при поверке радиозонда. Однако применение термостата

приводит к значительному увеличению веса и стоимости радиозондов и поэтому в оперативной аэрологической службе нерационально.

В настоящее время в аэрологических приборах применяются анероидные коробки, изготовленные из специальных сортов стали, имеющих температурный коэффициент в 10—30 раз меньший, чем температурный коэффициент фосфористой бронзы. Такие коробки не требуют каких-либо мер для устранения зависимости их показаний от температуры.

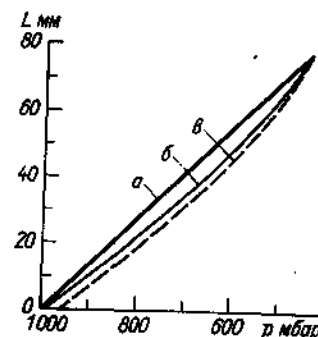
Инерция может возникнуть или вследствие внешнего трения, развивающегося в передаточном механизме, или вследствие молекулярного трения внутри металла коробки.

Механическая инерция возникает в результате трения в осях, передачах или вследствие мертвого хода, вызываемого люфтами. Практически ее можно исключить путем тщательной подгонки частей прибора и их регулировки.

Гораздо большего внимания заслуживает ошибка, возникающая вследствие внутреннего трения молекул — гистерезиса и упругого после-

Рис. 3.2. Гистерезис и упругое последствие.

а — кривая подъема; б — кривая спуска; в — кривая спуска при наличии упругого последствия.



действия. Явление гистерезиса показано на рис. 3.2. Если мы будем изменять давление в барокамере, сначала понижая, а затем повышая его (что соответствует подъему и спуску прибора), и отсчитываем показания барокоробки (отклонение пера или указателя L), соответствующие некоторым значениям давления p в барокамере, а затем нанесем на график результаты измерений, мы увидим, что кривые понижения и повышения давления не совпадут друг с другом (рис. 3.2): они имеют только две общие точки, соответствующие начальному и конечному значениям давления. При всех других значениях давления кривые расходятся, образуя вытянутую петлю (петля гистерезиса). Наибольшая ширина петли соответствует середине интервала изменения давления. При многократном повторении (6—8 раз) изменений давления, соответствующих подъему и спуску аэрологического прибора, петля гистерезиса достигает минимума и далее остается неизменной. Таким образом, одному и тому же положению пера или указателя давления соответствуют различные значения давления при подъеме и спуске прибора. Явление гистерезиса неустранимо.

Кроме гистерезиса, имеет место еще упругое последствие. Это явление состоит в том, что стрелка прибора, подвергнутого сначала уменьшающемуся, а затем увеличивающемуся давлению, возвращается в исходное положение с опозданием.

Расхождение между значениями давления в начальной и конечной точках на кривой может быть особенно значительным, если коробка долгое время не подвергалась таким изменениям давления. При повторении циклов изменения давления эти расхождения становятся все меньше. Таким образом, упругое последствие может быть устранено посредством «массирования» коробки, т. е. последовательного многократного (4—5 раз) подъема и спуска коробки в барокамере.

Для уменьшения явления гистерезиса прибор поверяют как при падении давления, так и при его росте. При обработке данных подъема аэрологического прибора желательно пользоваться градуировочной характеристикой, полученной при уменьшении давления, а при обработке данных спуска — кривой роста давления. Гистерезис и упругое последствие увеличиваются с течением времени и с возрастанием температуры.

Причиной гистерезиса и упругого последствия является наличие в материале коробки остаточных напряжений, связанных с предшествующей его историей (вальцовкой и термической обработкой листов), а также перенапряжений, возникающих в процессе изготовления барокоробки (штамповки, выдавливания гофр, термической обработки и сварки или пайки закраин). Для коробок, сделанных из нейзильбера или фосфористой бронзы, ширина петли гистерезиса равна 1—2 мбар. Величина упругого последствия может достигать 3—7 мбар.

3.3.2. Гипсотермометры

Гипсотермометр — прибор, предназначенный для измерения давления. Он основан на том явлении, что температура кипения жидкости зависит не только от природы жидкости, но и от внешнего давления воздуха. Она повышается при возрастании внешнего давления и понижается при его уменьшении. Кипение жидкости начинается в тот момент, когда упругость насыщения паров жидкости становится равной внешнему давлению.

Этим обстоятельством пользуются для измерения давления воздуха по температуре паров кипящей жидкости. Такой метод измерения давления известен давно, в настоящее время он используется и в аэрологии.

Гипсотермометры, измеряющие давление воздуха по температуре паров кипящей дистиллированной воды, успешно применяются в экспедиционных условиях в горах. Делались также попытки определения давления гипсотермометром на самолете во время полетов для разведки погоды. Кроме воды, в качестве

кипящей жидкости в гипсотермометрах применяется еще фреон-13 и сероуглерод.

Фреон представляет собой фторпроизводную жирных углеводородов (главным образом, метана). Он широко применяется в качестве охладителя в холодильных установках и, в частности, в термобарокамерах. Фреон отличается химической инертностью, особенно при отсутствии влаги; он не действует на большинство металлов, стоек к окислителям, кислотам и т. п. Кроме того, фреон не ядовит. Он имеет очень низкую точку кипения. При нормальном давлении точка кипения разновидностей фреона имеет следующие значения:

Фреон-14	—128°C
Фреон-13	—82°C
Фреон-22	—40,8°C
Фреон-12	—29,8°C

В гипсотермометрах, используемых в аэрологии, применяется фреон-13, точка кипения которого во время всего подъема остается ниже температуры окружающего воздуха.

Сероуглерод CS_2 представляет собой продукт соединения серы с углеродом. Это жидкость с температурой кипения (при нормальном давлении) +46°C. Точка кипения сероуглерода во время всего подъема остается выше температуры окружающего воздуха. Он тяжелее воды, очень ядовит. Пары сероуглерода легко воспламеняются, а в смеси с воздухом взрываются.

Зависимость между точкой кипения T и внешним давлением выражается так:

$$\lg p = A - \frac{B}{T}, \quad (3.2)$$

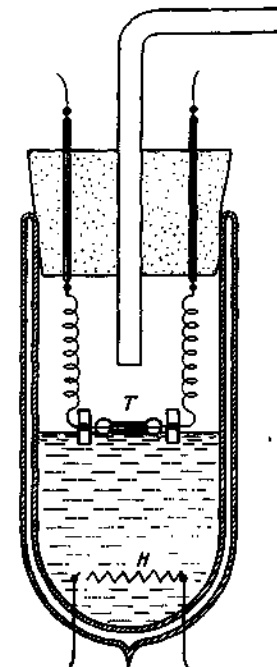


Рис. 3.3. Схема гипсотермометра.

T — термометр сопротивления; H — нагреватель.

где A и B — постоянные для данной жидкости величины. Поэтому чувствительность гипсотермометра с уменьшением давления сильно возрастает.

В то время как у земной поверхности для изменения температуры кипения сероводорода на 1°C требуется изменение давления на 30 мбар, на высоте 20 км, где давление составляет 50 мбар, для достижения того же эффекта достаточно изменения давления на 3 мбар. Измерение температуры кипения должно производиться очень тщательно и обязательно в парах кипящей жидкости, по возможности непосредственно над поверхностью жидкости (рис. 3.3).

Гипсотермометр имеет ряд преимуществ по сравнению с аневроидом. Он свободен от ошибок, обусловленных упругими свойствами металлов (упругого последствия и гистерезиса), и от

влияния температуры. В нем нет механических передач. Подготовка и поверка гипсотермометра просты. Гипсотермометры находят применение на самолетах, аэростатах и в некоторых конструкциях зарубежных радиозондов.

3.3.3. Вычисление давления с помощью барометрической формулы

Одновременно с развитием аэрологических исследований возрастала необходимость более точных измерений давления воздуха в свободной атмосфере, ошибки анероидных барометров уже не удовлетворяли исследователей. Положение с определением давления существенно улучшилось после того, как аэрологи научились более точно определять высоту подъема прибора не с помощью барометра, а путем вычисления ее геометрическим способом по координатам радиозонда. Оказалось, что при достаточно точных и надежных измерениях высоты шара, температуры и влажности воздуха давление можно вычислить с помощью барометрической формулы. Расчет позволяет получить более точные данные о вертикальном изменении давления, чем измерения с помощью описанных выше датчиков.

Барометрическая формула представляет собой интеграл основного уравнения статики атмосферы, она выводится в курсе метеорологии и имеет следующий вид:

$$p_2 = p_1 e^{-\frac{g}{RT_m}(z_2 - z_1)} \quad (3.3)$$

Здесь p_1 и p_2 — давление на нижнем z_1 и верхнем z_2 уровнях слоя, g — ускорение свободного падения, R — газовая постоянная и T_m — среднее значение температуры между уровнями z_1 и z_2 . Основное уравнение статики выводится в предположении равновесия воздуха по вертикали. В действительности могут появиться горизонтальные составляющие силы тяжести и барического градиента, но, как правило, эти составляющие очень малы, и поэтому в обычных условиях барометрическая формула достаточно точна.

Анализируя эту формулу, мы видим, что с ее помощью можно решить три задачи:

- 1) зная давление на одном уровне (p_1 или p_2) и среднюю температуру столба воздуха T_m , найти давление на другом уровне;
- 2) зная давление на обоих уровнях и среднюю температуру слоя, найти геометрическую разность между уровнями Δz ;
- 3) зная уровни и значения давления на них, найти среднюю температуру столба воздуха (среднюю температуру слоя).

В настоящее время при радиозондировании решаются обычно две первые задачи. В отечественной системе зондирования «Метеорит» — РКЗ используется методика вычисления давления по известному наземному давлению и измеренным параметрам — высоте подъема и температуре воздуха.

Для практического использования барометрическая формула приводится к рабочему виду: от натуральных логарифмов переходят к десятичным, от абсолютной температуры TK — к температуре по Цельсию $t^\circ C$ и подставляют числовые значения для R и g . По этим константам строятся вспомогательные круги для вычисления давления, о которых мы расскажем дальше.

Плотность влажного воздуха меньше плотности сухого воздуха, так как плотность водяного пара меньше плотности сухого воздуха. Поэтому использование газовой постоянной для сухого воздуха приводит к небольшой постоянной ошибке. Чтобы ее избежать, в случае влажного воздуха берется значение R для сухого воздуха, умноженное на $(1 + 0,377 e/p)$, где e — упругость водяного пара. Обычно при расчете вспомогательных кругов берется R для сухого воздуха, а в рабочих расчетах давления температура воздуха заменяется виртуальной температурой T_v .

$$T_v = T \left(1 + 0,377 \frac{e}{p} \right) \quad (3.4)$$

Виртуальная температура влажного воздуха T_v — это такая температура, которую должен был бы иметь сухой воздух, чтобы его плотность равнялась плотности данного влажного воздуха с температурой T , давлением p и упругостью водяного пара e . Виртуальная температура всегда несколько выше истинной температуры влажного воздуха.

Кроме того, и ускорение свободного падения g есть величина не строго постоянная — она немного меняется в зависимости от географической широты и высоты над уровнем моря. Поэтому барометрическая формула справедлива только до высот 35—40 км, выше g изменяется с высотой:

z км	0	100	280	475	700
g см/с ²	980	950	900	850	800

Следовательно, выше 35—40 км необходимо учитывать зависимость g от z .

Для высоких слоев атмосферы, где длина свободного пробега молекул l становится очень большой, уравнение статики, из которого получается барометрическая формула, непригодно. Для этих слоев барометрическая формула выводится из уравнений движений Максвелла для разреженных газов.

3.4. Измерение температуры

Воздух, как и всякое тело, всегда имеет температуру, отличную от абсолютного нуля. Температура воздуха в каждой точке атмосферы непрерывно меняется вследствие сложного взаимодействия различных факторов. Совершенно ясно, что для анализа состояния атмосферы на всех ее уровнях необходимо иметь непрерывные и точные измерения температуры воздуха.

Температура воздуха измеряется по международной практической температурной шкале в градусах Цельсия ($t^{\circ}\text{C}$) или в Кельвинах ($T\text{ K}$). Нуль шкалы Цельсия соответствует температуре таяния льда, а $+100^{\circ}$ — температуре кипения воды (при давлении 760 мм рт. ст.). Нуль шкалы Кельвина означает полное прекращение теплового движения молекул, т. е. это самая низкая возможная температура. По шкале Цельсия это температура $-273,18 \pm 0,03^{\circ}\text{C}$, практически -273°C .

В США, Англии и некоторых других странах иногда еще используется шкала Фаренгейта ($t^{\circ}\text{F}$). Интервал этой шкалы между точками таяния льда и кипения воды разделен на 180°, причем температура таяния льда равна $+32^{\circ}\text{F}$; $1^{\circ}\text{F} = (5/9)^{\circ}\text{C}$. Следовательно, между абсолютной температурой ($T\text{ K}$), температурой по Цельсию ($t^{\circ}\text{C}$) и температурой по Фаренгейту ($t^{\circ}\text{F}$) существуют следующие соотношения:

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} (t^{\circ}\text{F} - 32); \quad (3.5)$$

$$T\text{ K} = t^{\circ}\text{C} + 273. \quad (3.6)$$

Температурой называют величину, характеризующую тепловое состояние тела. Так как при нагревании почти все тела расширяются, то температуру тела можно определить по его объему или длине. Электрическое сопротивление металлов и полупроводников также зависит от температуры. От температуры зависит и термоэлектродвижущая сила, возникающая в точках спая двух различных металлов, электрическая емкость конденсаторов, скорость распространения звука в среде и др.

Для измерения температуры в аэрологии применяют разнообразные термометры: жидкостные, биметаллические, сопротивления, емкостные (термоконденсаторы), термоэлементы (термопары), акустические. Термометры сопротивления в свою очередь бывают металлические и полупроводниковые (терморезисторы).

В метеорографах для измерения температуры используют чаще всего биметаллические термометры. В радиозондах наряду с биметаллическими широко применяют металлические термометры сопротивления, терморезисторы, термоконденсаторы и жидкостные термометры.

Для точного измерения температуры среды необходимо, чтобы термометр находился в термодинамическом (тепловом)

равновесии со средой, температура которой измеряется. В реальных условиях в атмосфере термодинамическое равновесие термометра со средой не достигается вследствие движения воздуха или термометра, а также из-за влияния дополнительных факторов.

В каждой термически замкнутой системе со временем устанавливается температурное равновесие. Оно достигается, например, при градуировке термометров в термокамере.

Измерение температуры воздуха в атмосфере связано с рядом трудностей, обусловленных влиянием на термометр прямой и рассеянной радиации, которое определяется коэффициентом поглощения радиации и другими особенностями поверхностей термометров. Наиболее близка к температуре окружающей среды температура, которую показывает защищенный от радиации термометр, поэтому термометр необходимо защищать от радиации.

Чаще всего защита термометра выполняется в виде хорошо отражающей тонкостенной металлической оболочки, излучение которой в инфракрасной области спектра мало. Однако в действительности нет идеально отражающих поверхностей. Поэтому всегда имеет место некоторое искажение показаний температуры, обусловленное влиянием радиации. Чтобы уменьшить это искажение, защищенный от радиации термометр должен быть помещен в воздушный поток.

В последние годы успешно применяются антирадиационные покрытия, обладающие хорошей отражательной способностью и препятствующие перегреву датчика от Солнца. Использование таких покрытий исключает дополнительную защиту от солнечной радиации.

3.4.1. Биметаллические термометры

Биметалл (рис. 3.4) — это две спаянные или сваренные тонкие пластинки из различных металлов или металлических сплавов с существенно различными коэффициентами теплового расширения. Биметалл при изменении температуры изгибается и принимает форму цилиндра, при этом в случае нагревания пластинка с меньшим коэффициентом теплового расширения оказывается внутри цилиндра. Изменение кривизны биметалла служит мерой изменения температуры.

Для изготовления биметаллов применяются различные сплавы никеля и железа, так как коэффициенты линейного расширения таких сплавов могут меняться в весьма широких пределах — от $1 \cdot 10^{-6}$ до $20 \cdot 10^{-6}$. Кроме того, никельжелезные сплавы обладают хорошими упругими свойствами и прочностью и легко свариваются друг с другом.

Наиболее употребительными формами биметаллов являются круговые и спиралеобразные.

Принцип измерения температуры с помощью биметалла состоит в том, что один конец биметаллической полоски жестко закрепляется, в то время как другой, свободный конец при изменении температуры перемещается; это перемещение с помощью рычажных передач передается указателю, положение которого и отмечает температуру.

При вальцевании сваренных друг с другом металлических полос в них, т. е. в биметалле, всегда возникают внутренние напряжения, которые устраняются тщательным старением в стационарных условиях прежде, чем биметалл применяют в ка-

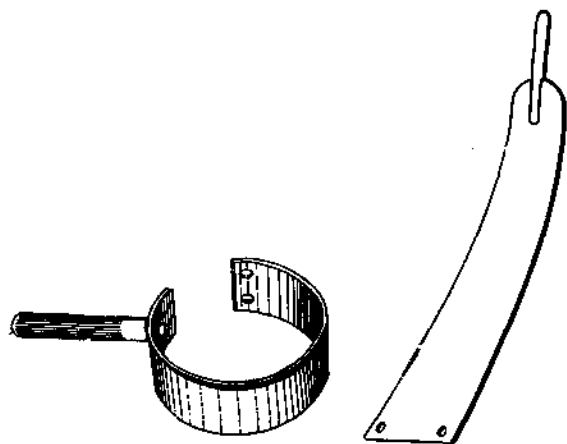


Рис. 3.4. Биметаллические термометры.

честве термометра. Диапазон температуры при старении должен превышать диапазон изменений температуры, для измерения которой будет применен биметалл. Но и после старения биметалл всегда имеет внутренние напряжения. Напряжение изгиба, вызванное внешними причинами, приводит к остаточным деформациям.

Теория биметаллических термометров показывает, что отклонение ΔS свободного конца биметалла при изменении температуры на ΔT определяется следующей формулой:

$$\Delta S = M \frac{L^2}{d_1 + d_2} (k_1 - k_2) \Delta T, \quad (3.7)$$

где L — длина биметалла, k_1 и k_2 — линейные коэффициенты расширения, d_1 и d_2 — толщина металлических полосок, образующих биметалл, M — числовой коэффициент, зависящий от формы биметалла: для прямой пластинки $M=1$; при увеличении изгиба пластинки M уменьшается, что вызывает уменьшение чувствительности биметалла.

Из формулы (3.7) следует, что отклонение свободного конца биметалла тем больше, чем тоньше и длиннее биметалл и чем больше разность коэффициентов расширения металлов, образующих биметаллическую полоску. Вследствие необходимой жесткости биметалла толщина его не может быть меньше некоторой предельной величины. Биметаллы в радиозондах и метеорографах должны обладать достаточной силой для преодоления трения пера о бумагу или стрелки по контактной поверхности, а также трения, развивающегося в передаточной системе. Обычно толщина биметаллов составляет 0,1—0,5 мм.

В применяемых в аэрологии биметаллах в виде широкой полосы прямоугольной формы развиваются различные явления, которые затрудняют расчет зависимости деформации биметаллов от температуры. Поэтому эта зависимость определяется опытным путем.

В некоторых случаях (при определенных отношениях никелевого легирования) биметаллы при температуре от -30 до -50°C обнаруживают явления молекулярного превращения, что может привести к изменению изгиба биметалла в обратном направлении. Во избежание этого явления биметалл подвергают искусственному старению путем многократного нагрева и охлаждения от -80 до $+30^\circ\text{C}$.

3.4.2. Термометры сопротивления

Удельное сопротивление почти всех металлов, полупроводников и электролитов изменяется с изменением температуры. Это свойство используется для измерения температуры.

Металлические термометры сопротивления. Для измерения температуры лучшим металлом является платина. При небольшом диапазоне изменения температуры удельное сопротивление R платины возрастает почти строго линейно вместе с ростом температуры. Температурный коэффициент удельного сопротивления платины близок к 0,004. При изменении температуры в диапазоне, наблюдаемом в атмосфере, удельное сопротивление R связано с температурой следующим соотношением:

$$R = R_0 (1 + at + bt^2), \quad (3.8)$$

где R_0 , a , b — постоянные, определяемые при градуировке термометров сопротивления, например, при 0, 100°C и при точке сублимации углекислоты ($-78,5^\circ\text{C}$).

Обычно диаметр применяемой в термометрах сопротивления платиновой нити составляет 20 мкм, а в отдельных случаях даже до 5 мкм. При изготовлении термометров сопротивления платиновая нить крепится на каркасе.

Платиновую нить можно жестко связывать с каркасом только в том случае, если он имеет такой же термический

коэффициент, что и платина. Поэтому можно, например, спаивать платиновый термометр в стеклянную оправу.

Электрический ток, пропускаемый через термометр сопротивления для измерения температуры, должен быть по возможности малым, чтобы выделяющееся при этом тепло не искажало результатов измерений. Чем меньше вентиляция термометра, тем меньше должна быть допустимая сила тока.

Тщательно изготовленный платиновый термометр является точным прибором для измерения температуры. Такой термометр обладает малыми погрешностями измерения температуры воздуха даже при сильном излучении и слабой вентиляции. Поэтому термометр сопротивления весьма удобен для точных радиозондовых измерений температуры. Для самолетных измерений может применяться платиновый термометр, спаянный в стекло.

В термометрах сопротивления применяется также вольфрам; например, его используют на советских метеорологических ракетах и в электрометеорографах.

Недостатком термометров сопротивления является то, что для получения достаточно высоких сопротивлений, которые требуются для телеметрической системы, используемой при радиозондировании, в них должна применяться очень тонкая нить.

Полупроводниковые термометры сопротивления. Для измерения температуры можно применять полупроводники. Полупроводниками называются вещества, обладающие электронной электропроводностью и по ее величине занимающие промежуточное место между проводниками и изоляторами. При понижении температуры сопротивление полупроводников возрастает, так что при очень низких температурах полупроводники превращаются в изоляторы. Напротив, с повышением температуры сопротивление полупроводников уменьшается, так что при высокой температуре полупроводник становится проводником. Таким образом, в отличие от проводников, обладающих положительными температурными коэффициентами сопротивления, полупроводники имеют большие отрицательные температурные коэффициенты, примерно в десять раз превосходящие коэффициент сопротивления металлов.

Свойствами полупроводников обладают многие вещества, в частности смеси двух или более различных окислов металлов (урана, магния, титана, никеля, кобальта и др.). Изменяя соотношения различных составляющих в смеси, можно получить желаемую кривую зависимости сопротивления полупроводника от температуры. В процессе изготовления окислы металлов примешивают в виде порошка к связывающим веществам; затем им придают форму столбиков, бусинок или пластинок и обжигают (рис. 3.5). Таким образом изготавливаются датчики температуры — терморезисторы, обладающие заданными термометрическими свойствами.

На рис. 3.6 изображен график изменения сопротивления платины и терморезистора в зависимости от температуры. Как видно на графике, удельное сопротивление терморезистора резко возрастает с уменьшением температуры, изменяясь по экспоненциальному закону

$$R = R_0 e^{b \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}. \quad (3.9)$$

Здесь R — удельное сопротивление при абсолютной температуре T ; R_0 — сопротивление при температуре T_0 . Постоянная b в основном зависит только от материала терморезистора.

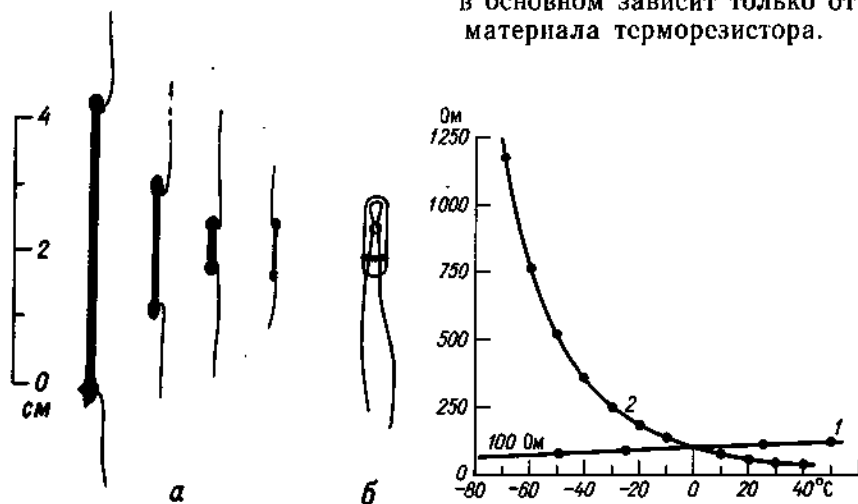


Рис. 3.5. Терморезисторы.

a — цилиндрические; b — бусинка в стеклянной колбочке.

Рис. 3.6. Изменение сопротивления платины (1) и терморезистора (2).

Температурный коэффициент удельного сопротивления определяется по формуле

$$\beta = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = - \frac{b}{T^2}. \quad (3.10)$$

Следовательно, он отрицателен и очень быстро возрастает с уменьшением температуры. Так, у терморезисторов, применяемых в радиозондах, β составляет $-0,02 \dots -0,05$, т. е. гораздо больше, чем у металлов. Поэтому терморезисторы особенно удобны для измерения температуры при радиозондировании.

Приведем значения сопротивления при разных температурах одного из терморезисторов, используемых в радиозондах типа РКЗ:

$t^\circ\text{C}$	...	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	+10	+20	+30	+40
R Ом	...	320	190	120	78	51	35	28	17	12,3	8,9	6,7	5,1

Одним из недостатков терморезисторов, затрудняющих их более широкое использование, является большой разброс номинальных сопротивлений. Каждый терморезистор имеет индивидуальную градуировочную характеристику. Тем не менее терморезисторы применяются в качестве датчиков температуры во многих радиозондах, в частности в советских радиозондах типа РКЗ, американских радиозондах и др.

3.4.3. Термоконденсаторы

Диэлектрическая проницаемость, подобно сопротивлению, изменяется в зависимости от температуры. Это изменение особенно велико у керамических веществ (достигает 0,2% на 1°C). Емкостные керамические термометры изготавливаются в виде тонких пластинок, имеющих с обеих сторон металличе-

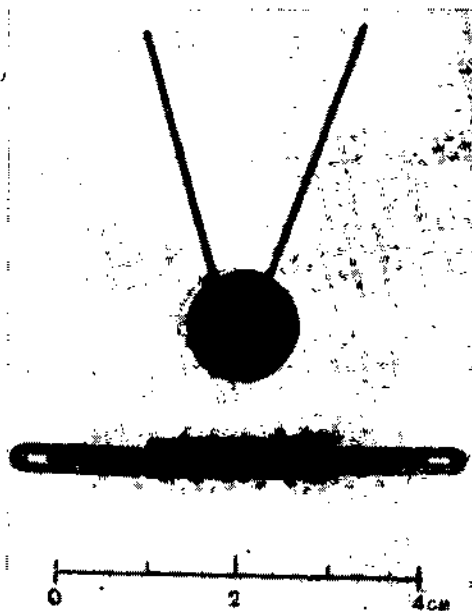


Рис. 3.7. Керамический конденсатор.

Керамические термоконденсаторы имеют ряд преимуществ по сравнению с биметаллами. Они обладают большей стабильностью, легко могут быть защищены от внешних влияний, в частности от коррозии. Малые размеры и относительно большая поверхность термоконденсаторов позволяют создать малоинерционные датчики температуры.

В керамических конденсаторах (рис. 3.7) применяются главным образом титан, барий и стронций. Для устранения влияния влажности на емкость конденсатора он покрывается тонким слоем лака.

Термоконденсаторы в принципе могут использоваться для радиозондовых измерений. Если термоконденсатор включен в контур радиопередатчика, устойчивого в отношении изменения температуры, то частота передатчика будет изменяться только в зависимости от изменения температуры термоконденсатора. Так, например, если термоконденсатор емкостью 40 мкФ включен в колебательный контур передатчика, работающего на частоте 30 МГц, то изменение температуры на 1°C вызывает изменение частоты примерно на 0,1%, т. е. на 30 кГц. Абсолютная точность измерения зависит от того, в какой мере можно исключить колебания частоты, связанные с влиянием на нее температуры окружающей среды и падением напряжения батарей, питающих радиопередатчик.

3.4.4. Термоэлементы

Термоэлементом (термопарой) называется замкнутая цепь, состоящая из двух разнородных спаянных концами проводников. Если места спаев поддерживаются при разных температурах, то в цепи возникает термоэлектродвижущая сила и термоэлектрический ток.

Электродвижущая сила E зависит от разности температур спаев ($T_1 - T_2$) и от рода металлов

$$E = a(T_1 - T_2), \quad (3.11)$$

где a — удельная термоэлектродвижущая сила для данной пары металлов.

Число комбинаций металлов в практически применяемых термоэлементах велико. Наиболее часто используются термопары из меди и константана, для которых $a = 42$ мкВ/°C и сохраняет постоянное значение от очень низких температур до 600°C. Термоэлементы приспособлены для измерения разности температур. Однако если температура одного спая известна, то без труда определяется температура другого спая.

В аэрологии термопары применяются главным образом в приборах для измерения радиационного баланса, а также в приборах, которые применяются в самолетах — летающих лабораториях. В обычных радиозондах они не нашли пока применения.

Для передачи на расстояние возникшей термоэлектродвижущей силы необходимо применять усилители (ламповые, магнитные или фотоэлектрические). Кроме того, для поддержания постоянной температуры одного спая требуется специальное приспособление, которое утяжеляет радиозонд. Термопары применяются в специальных исследовательских радиозондах для измерения температуры воздуха, температуры точки росы в конденсационных гигрометрах, а также температуры кипения жидкости в гипсотермометрах.

3.4.5. Акустический термометр

Скорость звука c при постоянном составе воздуха является функцией только температуры воздуха T

$$c = \sqrt{\kappa RT}, \quad (3.12)$$

где $\kappa = c_p/c_v$ — отношение теплоемкостей, R — газовая постоянная.

Следовательно, измеряя скорость звука, можно определить температуру воздуха. Этот метод имеет большое преимущество, состоящее в том, что он в принципе свободен как от радиационной, так и от инерционной ошибки.

В качестве одного из способов измерения температуры путем определения скорости звука можно назвать импульсный.

Кварцевый вибратор излучает звуковой импульс, который поступает на второй вибрирующий кварц, удаленный от источника импульса на 40 см. Принятый импульс усиливается и снова подводится к передающему кварцу. Таким образом возникает последовательность импульсов. Частота импульсов служит мерой скорости звука, а следовательно, и температуры.

Акустический метод измерения температуры был испытан при экспериментальных подъемах радиозондов. Однако он требует больших затрат, так как интенсивность звука при давлении 10 мбар должна быть примерно в 200 раз больше, чем при давлении 1000 мбар.

Акустический метод применяется при ракетном зондировании атмосферы. В этом случае источником звука являются взрывы гранат. Для расчета средней температуры слоя между последовательными точками взрывов используются время взрывов, их координаты, моменты прихода звуковых волн к регистрирующим микрофонам, установленным на земле.

3.4.6. Ошибки, возникающие при измерении температуры

Как уже указывалось выше, температура воздуха в свободной атмосфере измеряется в весьма разнообразных и быстро меняющихся условиях. Поэтому измеренная температура всегда несколько отличается от истинной температуры воздуха, т. е. имеет некоторую ошибку Δt . Источники ошибок могут быть различными. Наиболее существенно показания термометров искажаются под действием солнечной радиации, инерции и перегрева в результате больших скоростей обтекания их воздухом, а также вследствие смачивания их при прохождении плотных облаков или зон осадков.

Если термометр поместить в среду с температурой воздуха T , изменение его собственной температуры T' будет происходить согласно уравнению теплового баланса приемника:

$$mc \frac{dT'}{dt} = Q + N + L. \quad (3.13)$$

Левая часть уравнения выражает изменение теплосодержания термометра в единицу времени t , которое зависит от массы термометра m и удельной теплоемкости материала c . В правой части уравнения даны различные виды теплообмена термометра с окружающей средой, определяющие изменение его температуры: Q — радиационный баланс поверхности термометра; N — количество тепла, притекающее к термометру вследствие теплообмена с обтекающим его воздухом; L — количество тепла, притекающее к термометру от соседних частей прибора (креплений, корпуса прибора и пр.) за счет процессов теплопроводности.

При очень малом сечении рамок, в которых укрепляются датчики температуры в радиозондах и метеорографах, и хорошей теплоизоляции всего узла температуры от корпуса прибора величина L , как правило, мала и ею можно пренебречь.

Величина N выражается следующим образом:

$$N = kS(T - T'), \quad (3.14)$$

где k — коэффициент теплопередачи, S — поверхность термометра, омываемая воздухом.

Для того чтобы рассмотреть процессы, влияющие на изменение температуры термометра, выделим разность температур датчика и воздуха, подставив выражение N из (3.14) в уравнение (3.13)

$$T' - T = \frac{Q}{kS} - \frac{mc}{kS} \frac{dT'}{dt}. \quad (3.15)$$

Из этого уравнения мы видим, что отклонение температуры датчика от температуры воздуха ($T' - T$) происходит за счет влияния радиации Q/kS и термической инерции термометра (mc/kS) (dT'/dt).

Радиационная ошибка. Ошибка, возникающая вследствие перегрева корпуса термометра солнечной радиацией, называется радиационной ошибкой.

Уравнение радиационного баланса поверхности термометра имеет вид

$$Q = (I_1 + I_2)(1 - a) + R - E, \quad (3.16)$$

где I_1 — прямая солнечная радиация, падающая на термометр, I_2 — рассеянная коротковолновая солнечная радиация, падающая на термометр, a — отражающая способность (альбедо) поверхности термометра, R — длинноволновое излучение земли, атмосферы, облаков, а также частей самого прибора (шахты, кожуха), поступающее на поверхность термометра, E — собственное излучение термометра.

Показания термометра будут свободны от влияния радиации только в том случае, когда $Q = 0$. В свободной атмосфере это условие практически не выполняется. Влияние радиации может быть несколько уменьшено за счет экранирования потоков коротковолновой радиации или улучшения отражающих свойств поверхности датчика. Защитный экран обычно выполняется в виде цилиндрической шахты. Последняя должна быть достаточно высокой, чтобы при любом положении солнца его лучи не могли падать на датчик. Такая шахта защищает термометр как от прямой солнечной радиации, так и в значительной степени от коротковолновой рассеянной радиации. Но она не защищает его от излучения, идущего от самой шахты и других частей прибора, нагретых солнечными лучами. Для защиты

от излучения самой шахты и других частей прибора применяется двойная шахта. Высокая внешняя шахта снаружи ополитована и окрашена в белый цвет для увеличения альбедо, а внутренняя шахта делается короткой и внутри красится в черный цвет для уменьшения альбедо. Однако двойная шахта резко ухудшает условия вентиляции термометра, что приводит к уменьшению коэффициента теплообмена k и, следовательно, к увеличению радиационной ошибки. Радиационная ошибка растет с увеличением высоты солнца и высоты радиозонда и уменьшением вертикальной скорости радиозонда.

Однако даже лучшая защита не может совершенно исключить радиационную ошибку. Как видно из формулы (3.15), уменьшить радиационную ошибку можно путем увеличения коэффициента k , т. е. за счет повышения условий вентиляции датчика. Необходимо отметить, что коэффициент теплообмена пропорционален плотности воздуха и скорости обдува. В самолётном зондировании, например, вентиляция вполне достаточна для устранения радиационной ошибки. Вертикальная же скорость шара, на котором поднимается радиозонд в стратосфере, не превышает 7—8 м/с, в то же время плотность воздуха на больших высотах мала. Таким образом, скорость вентиляции термометра оказывается в стратосфере недостаточной. Поэтому измерения температуры с помощью радиозондов сопровождаются в стратосфере значительными радиационными ошибками.

Более совершенным средством устранения радиационных ошибок является применение практически безрадиационных датчиков температуры. Такими датчиками, например, могут быть металлические и полупроводниковые термометры сопротивления. В современных радиозондах в качестве датчика температуры используется небольшой терморезистор, окрашенный для увеличения альбедо белой водостойкой краской. Сравнения подъемов радиозондов, произведенных друг за другом днем и ночью, показали, что такой датчик температуры обладает очень небольшой радиационной ошибкой. Следует, однако, заметить, что не всякая белая краска обеспечивает безрадиационность датчика температуры.

В настоящее время в аэрологии широко применяется специальная краска — эмаль белая ВЛ-548. Эта краска хорошо ложится на терморезистор, обладает хорошей теплопроводностью и, что самое главное, имеет высокое альбедо.

К сожалению, антирадиационное покрытие полностью не устраняет перегрев датчика, поэтому при обработке радиозондовых данных о температуре для устранения влияния солнечной радиации вводятся так называемые радиационные поправки, которые для радиозондов типа РКЗ определяются по разностям показаний температуры днем и ночью. Строго говоря, радиационные поправки следовало бы рассчитывать с помощью уравнения теплового состояния терморезистора, учитывающего не только нагрев датчика солнечной радиацией, но и его охлаждение за счет собственного теплового излучения.

Такие расчеты пока не произведены, и поэтому в ближайшем будущем радиационные поправки должны быть уточнены. При больших высотах солнца на высоте больше 15—20 км может происходить затенение датчика температуры оболочкой, которое вызовет колебания температуры. Для устранения явления затенения рекомендуется увеличивать подвес радиозонда таким образом, чтобы он постоянно облучался солнцем. Кроме радиационной ошибки, показания датчика могут искажаться за счет «теплового следа» оболочки, температура которой выше температуры окружающих слоев днем и холоднее ночью, но это явление также устраняется регулированием длины подвеса радиозонда.

Ошибка инерции. Если термометр защищен от радиации, то выравнивание температур термометра и среды происходит в результате теплопроводности. Внешняя теплопроводность, т. е. обмен теплом с поверхностью термометра, зависит от ряда факторов, а именно: массы термометра, его формы, поверхности, материала. Внешняя теплопроводность зависит также от теплоемкости, внутренней теплопроводности термометра и вентиляции. Термометр показывает истинную температуру воздуха только при термодинамическом (тепловом) равновесии. Однако это условие может быть выполнено лишь при стационарном состоянии среды. При изменении температуры воздуха всегда имеет место некоторое отставание в показаниях термометра. Это явление называется инерцией термометра.

Если термометр, имеющий температуру T' , помещается в среду с температурой T , то он не принимает немедленно температуру этой среды, а его температура будет постепенно приближаться к ней со скоростью, зависящей от материала, формы и размеров термометра, а также от свойств самой среды.

Согласно уравнению (3.15) скорость изменения температуры термометра dT'/dt выражается следующим образом:

$$\frac{dT'}{dt} = \frac{kS}{mc} (T - T'). \quad (3.17)$$

Обозначив kS/mc через α , мы можем разделить переменные

$$\frac{dT'}{T - T'} = \frac{dt}{\alpha}. \quad (3.18)$$

Проинтегрируем это выражение в предположении, что температура среды постоянна

$$-\ln(T - T') + \ln(T - T_0) = \frac{t}{\alpha} \quad (3.19)$$

или

$$T - T' = (T - T_0) e^{-\frac{t}{\alpha}}, \quad (3.20)$$

где e — основание натуральных логарифмов, а T_0' — начальная температура термометра. Из (3.19) и (3.20) получим значение α :

$$\alpha = \frac{t}{\ln \frac{T - T_0'}{T - T'}} \quad (3.21)$$

Величина α называется коэффициентом инерции термометра, она имеет размерность времени и выражается в секундах. Из формулы (3.21) можно вывести следующее определение коэффициента инерции:

$$\alpha = t, \text{ если } \frac{T - T_0'}{T - T'} = e.$$

Коэффициентом инерции термометра называется время, в течение которого первоначальная разность температур термометра и среды уменьшается в $e=2,72$ раза (т. е. достигает 37% первоначального значения).

Малый коэффициент инерции термометра играет исключительно важную роль для точного определения температуры. При большой инерции термометры не могут зафиксировать кратковременные колебания температуры. Вследствие инерции показания термометра колеблются между наибольшим и наименьшим значениями температуры, не достигая их.

В идеальном случае, при отсутствии инерции ($\alpha=0$), в любой момент T было бы равно T' . Таким условиям отвечают термоэлементы и термометры сопротивления малых размеров.

Поэтому только такие термометры могут применяться для изучения пульсаций температуры.

На рис. 3.8 изображены кривые стратификации, полученные при помощи термометров, обладающих различными коэффициентами инерции. Как видно из этого примера, при большом коэффициенте инерции ($\alpha=60$ с) характер кривой стратификации может быть совершенно искажен. Так, при наличии мощной приземной инверсии толщина инверсионного слоя увеличивается вдвое: верхняя граница инверсии отмечается на высоте 1200 м вместо 600 м. Температура на верхней границе инверсии занижена на 3°C за счет инерции, ошибка в значении температуры на высоте 600 м достигает более 7°C . При наличии значи-

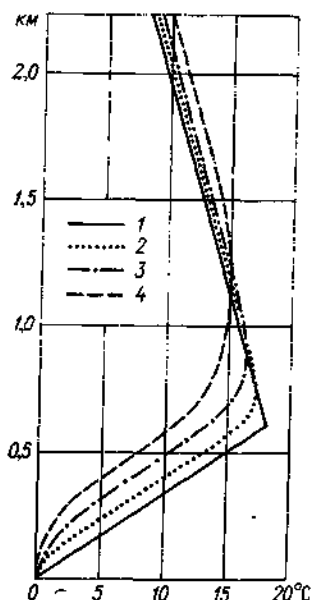


Рис. 3.8. Влияние инерции термометра на результаты измерения температуры.

1) $\alpha=0$; 2) $\alpha=15$ с; 3) $\alpha=30$ с; 4) $\alpha=60$ с.

тельного градиента ($7^\circ\text{C}/\text{км}$) термометр завышает температуру примерно на 2°C . Ошибку можно было бы уменьшить путем замедления подъема прибора. Но это можно делать лишь при подъеме метеорографа на самолете, так как только там обеспечивается достаточная защита датчиков от радиации и достаточная вентиляция. Поэтому вертикальную скорость подъема самолета при зондировании необходимо уменьшить до 2—3 м/с. Уменьшать вертикальную скорость подъема радиозонда нельзя, так как при этом резко возрастает радиационная ошибка. Следовательно, в радиозондах надо применять возможно менее инерционные датчики температуры. В современных радиозондах применяются небольшие полупроводниковые терморезисторы, имеющие малую инерцию.

Ошибка смачивания. Если термометр проходит через слои, которые содержат воду в виде облачных или дождевых капель, то его показания будут искажаться, так как некоторая часть тепла будет расходоваться на испарение этой воды, что приведет к понижению его температуры.

Учесть влияние смачивания очень трудно, к тому же, если термометр становится влажным в увлажняющем слое, он остается влажным еще некоторое время после выхода из него. Когда термометр полностью смочен, то он действует как смоченный термометр. Когда же термометр смочен лишь частично, то он дает значение, не представляющее ни температуру воздуха, ни температуру смоченного термометра.

Простым, но лишь частичным решением проблемы измерения температуры при наличии капель воды является применение двух термометров: покрытого гидрофобным веществом (не поглощающим воду) и покрытого гидрофильным веществом (сильно поглощающим капли воды). Оба термометра нужно помещать в один и тот же поток воздуха. При малом содержании жидкой воды гидрофобный элемент будет всегда показывать температуру сухого термометра; при большом содержании жидкой воды гидрофильный элемент будет давать температуру смоченного термометра. Наибольшее занижение температуры в результате смачивания наблюдается при высокой температуре и малой относительной влажности, оно может достигать $3-5^\circ\text{C}$ и более. Такие условия могут быть в зоне сильных осадков при температуре $20-25^\circ\text{C}$ и относительной влажности 50–70%. В облаках, где относительная влажность близка к 100%, искажение температуры гораздо меньше. При температуре, близкой к 0°C , это искажение не превышает 1°C . Однако общая проблема измерения температуры при наличии капель воды до конца не решена.

Если же измерения производятся при отрицательной температуре, то возникает новый ряд трудностей, связанных с замерзанием капель (обледенением). Однако занижение температуры при этом становится сравнительно небольшим и не превышает $0,5-0,7^\circ\text{C}$.

Ошибки, возникающие при больших скоростях. Эти ошибки свойственны только датчикам, устанавливаемым на самолетах и ракетах. Измерение температуры на самолете, летящем с большой скоростью (более 25 м/с), осложняется вследствие нагревания датчика температуры. Нагревание обусловлено адиабатическим сжатием воздуха и трением. Оно зависит от места,

выбранного для установки датчика температуры на самолете, наличия или отсутствия защиты датчика температуры и воздушной скорости самолета.

Давление набегающего потока воздуха неодинаково в различных точках поверхности движущегося тела. Оно имеет наибольшее значение в точках, где происходит наиболее интенсивное торможение потока. Например, вблизи носа (передней части) самолета имеется избыток давления, в то время как в точках, расположенных далее, этот избыток уменьшается и в некоторых точках может возникнуть даже дефицит давления. Это изменение давления приводит к соответствующим адиабатическим изменениям температуры воздуха — нагреванию и охлаждению.

В пограничном слое у поверхности тела, омываемого потоком, возникает сильный перепад скорости. Это приводит к нагреванию воздуха вследствие трения, которое тем больше, чем быстрее омывает поток воздуха обтекаемое им тело.

Рассчитаны теоретические и эмпирические формулы для введения поправок в функции от скорости для датчиков температуры, применяемых при зондировании атмосферы.

Некоторые конструкции самолетных метеорографов имели компенсаторы, автоматически компенсирующие влияние воздушной скорости на показание термометра. Наиболее простое приспособление для компенсации этого влияния основано на том, что воздушный поток при входе в шахту метеорографа расширяется и адиабатически охлаждается. Другое приспособление основано на том, что термометр помещается вблизи оси шахты, в которой воздух циркулирует по спиральным линиям, вследствие чего в центре давление понижается и происходит адиабатическое охлаждение воздуха. При соответствующей конструкции шахты и контроле воздушной скорости можно добиться того, что термометр будет показывать температуру, близкую к температуре воздуха, в большом диапазоне значений воздушной скорости.

3.5. Измерение влажности

Влажность воздуха играет значительную роль в целом ряде метеорологических явлений и процессов в свободной атмосфере. Наличие водяного пара в атмосфере существенно сказывается на тепловых условиях атмосферы и земной поверхности. Водяной пар сильно поглощает длинноволновую инфракрасную радиацию, которую излучает земная поверхность. В свою очередь и сам он излучает инфракрасную радиацию, большая часть которой идет к земной поверхности. Это уменьшает ночное охлаждение земной поверхности и нижних слоев воздуха. Благодаря наличию водяного пара в атмосфере образуются облака, они отражают и поглощают солнечную радиацию на ее пути к земле. Осадки, выпадающие из облаков, являются важнейшим элементом погоды и климата. Изменение влагосодержания воздуха — это возникновение и разрушение туманов, ухудшение или улучшение дальности видимости. Водяной пар влияет на

распространение радиоволн, вызывает обледенение предметов, находящихся в воздухе и, наконец, имеет решающее значение для физиологических процессов.

Для удобства дальнейшего изложения напомним основные характеристики влагосодержания:

1. **Упругость водяного пара (e)**. Водяной пар, как всякий газ, обладает упругостью (давлением), которая пропорциональна его плотности (содержанию в единице объема) и его абсолютной температуре. Упругость водяного пара измеряется в тех же единицах, что и давление воздуха — миллиметрах ртутного столба и миллибарах.

2. **Упругость насыщения (E)** — максимальная упругость водяного пара, возможная при данной температуре, измеряется также в миллиметрах ртутного столба и миллибарах.

3. **Относительная влажность (u)** — отношение фактической упругости водяного пара e к упругости насыщения E при той же температуре, выраженное в процентах

$$u = \frac{e}{E} \cdot 100. \quad (3.22)$$

4. **Плотность водяного пара (ρ)** — масса водяного пара, находящаяся в единице объема, измеряется в г/см³ и г/м³.

5. **Абсолютная влажность (a)** — количество водяного пара в граммах, содержащееся в 1 м³ воздуха. Абсолютная влажность и упругость связаны соотношением $a = 217 \frac{e}{T}$ г/см³ при e в миллибарах и $a = 2,89 \frac{e}{T}$ при e в миллиметрах ртутного столба.

6. **Отношение смеси (r)** — отношение массы водяного пара (m_n) к массе сухого воздуха (m_a), заключенного в том же объеме в г/г (или г/кг)

$$r = \frac{m_n}{m_a} \quad (3.23)$$

или

$$r = \frac{\rho_n}{\rho_a} = 623 \frac{e}{p - e}. \quad (3.24)$$

7. **Удельная влажность (q)** — отношение массы водяного пара к массе влажного воздуха при том же объеме в г/г (или г/кг)

$$q = \frac{m_n}{m_n + m_a}. \quad (3.25)$$

8. **Температура точки росы (τ)** — та температура, которую примет влажный воздух, если его изобарически охладить до полного насыщения.

9. **Дефицит влажности (d)** — недостаток насыщения или разность между упругостью насыщения при данной температуре и давлении и фактической упругостью

$$d = E - e. \quad (3.26)$$

В аэрологии обычно употребляется дефицит точки росы $D = (t - \tau)^\circ\text{C}$, где t — температура воздуха и τ — точка росы.

В настоящее время считается, что, если метод позволяет измерять относительную влажность с погрешностью до 5%, его можно считать достаточно точным. Большинство приборов градуируется в значениях относительной влажности, но иногда

более удобно пользоваться точкой росы t . Относительная влажность меняется при малейшем колебании температуры, а t более устойчиво по отношению к неадиабатическому нагреванию и охлаждению воздуха и сравнительно устойчиво по отношению к небольшим изменениям давления. Для большинства метеорологических задач достаточно знать t с точностью до 1°C .

Измерение влажности в свободной атмосфере является одной из важнейших проблем нашего времени, так как точность современных методов совершенно неудовлетворительна, а создание новых датчиков влажности наталкивается на очень большие трудности, связанные с тем, что при низкой температуре содержание водяного пара ничтожно. Эти трудности хорошо видны из требований, которым должен удовлетворять хороший датчик влажности для радиозондов. Сформулируем эти требования:

1. Датчик влажности должен быть работоспособен при u , равном от 3 до 98%, и изменении температуры среды от $+40$ до -90°C .
2. Показания прибора должны быть функцией u или t .
3. Точность измерения u должна быть не хуже 5%, t — не более 1°C .
Дополнительное условие — в камере насыщения датчик влажности должен показывать влажность не менее 96%.
4. Постоянная времени (инерция) датчика не должна превышать 10 с.
5. Датчик должен:
обеспечивать проведение измерений при изменении температуры окружающей среды в пределах $-90 \dots +40^\circ\text{C}$ и давлении — в пределах $1000-0,1$ мбар,
давать на выходе электрический сигнал,
быть легким (30—50 г),
быть дешевым и доступным для массового производства,
иметь эффективную защиту от попадания капель.
6. Градуировочные характеристики датчика влажности должны сохраняться при хранении прибора в складских помещениях и при транспортировке не менее 1 года.

В настоящее время существует довольно большое количество приборов и методов для измерения влажности. Однако, вследствие указанных выше трудностей измерения влажности в свободной атмосфере (уменьшение концентрации водяного пара в 10^4-10^5 раз, резкое падение влагосодержания при одновременном понижении температуры воздуха и др.) до настоящего времени еще не предложен универсальный метод или прибор, одинаково пригодный для измерения влажности при положительных и отрицательных температурах. Кратко охарактеризуем наиболее распространенные методы.

3.5.1. Психометрический метод

Психометрическим методом влажность воздуха определяется на основании показаний двух совершенно одинаковых термометров, из которых один — сухой, он измеряет температуру воздуха, другой термометр обернут непрерывно смачиваемой водой материей. С поверхности материи происходит испарение воды, интенсивность которого зависит от дефицита влажности в окружающем воздухе. Так как на испарение рас-

ходуется тепло, поступающее частично от резервуара термометра, то смоченный термометр будет иметь более низкую температуру ($T_{\text{смоч}}$), чем сухой термометр ($T_{\text{сух}}$). Зная температуру и давление воздуха, можно очень точно рассчитать зависимость разности температур $T_{\text{сух}} - T_{\text{смоч}}$ от фактической упругости водяного пара.

В психометрическом методе могут быть использованы различные термометры, например жидкостные, термометры сопротивления, термозлементы и др.

Психометрический метод дает вполне хорошие результаты при наземных измерениях влажности и положительной температуре. Однако при низкой температуре даже в наземных условиях при определении влажности психометрическим методом возникают значительные ошибки.

Использование психометрического метода в аэрологии вызывает ряд дополнительных трудностей, связанных с особенностями аэрологических подъемов. Психометрический метод применим лишь в том случае, когда установится стационарный режим у смоченного термометра. Аэрологический прибор при подъеме обычно очень быстро проходит слои с различной влажностью. Условия, которые при этом создаются, не соответствуют стационарному режиму. Психометрический метод очень редко используется при самолетном зондировании и в радиозондах, например в индийском.

3.5.2. Сорбционные методы

Свойство тел поглощать водяной пар называется гигроскопичностью. Процесс поглощения называется сорбцией. Очень многие предметы и вещества органического и неорганического происхождения в природе являются гигроскопичными. При поглощении водяного пара изменяется вес, объем вещества или его электрические свойства.

Деформационные датчики. Известны два типа деформационных датчиков — гигрометры волосной и пленочный. Они основаны на зависимости линейных размеров гигроскопического вещества от относительной влажности.

Нормальный волос. Соссюр в 1783 г. впервые использовал свойство обезжиренного человеческого волоса изменять свою длину вследствие поглощения водяного пара для измерения относительной влажности воздуха. Первая попытка построить теорию работы волоса была сделана Б. И. Срезневским в 1882 г., однако удовлетворительной теории нет до сих пор.

Волос состоит из нескольких пористых слоев кератина. Если он обезжирен, то обладает способностью конденсировать в своих порах водяной пар также и из ненасыщенного воздуха. Вследствие такой капиллярной конденсации волос значительно увеличивает свой вес. Так, при 100%-ной относительной влажности он принимает количество воды, равное примерно 30% собственного веса.

Капиллярная конденсация и испарение обладают гистерезисом. Например, волос, приведенный от 10%-ной влажности к влажности 60%, будет иметь 14 весовых процентов воды, но тот же волос, приведенный к 60%-ной влажности от влажности 100%, будет иметь уже 16 весовых процентов воды.

В результате капиллярной конденсации волос удлиняется. Если сконденсированная в порах волоса вода испаряется, то он укорачивается. Относительное удлинение натянутого волоса составляет приблизительно 2,5% при изменении относительной влажности от 0 до 100%.

Процесс удлинения и укорачивания волоса обладает своеобразным антигистерезисом, который в большинстве случаев превосходит гистерезис поглощенной воды. Так, например, волос, приводимый от 10%-ной влажности к влажности 60%, будет при этой влажности длиннее, чем в том случае, когда 60% влажности достигнуто при изменении ее от 100%.

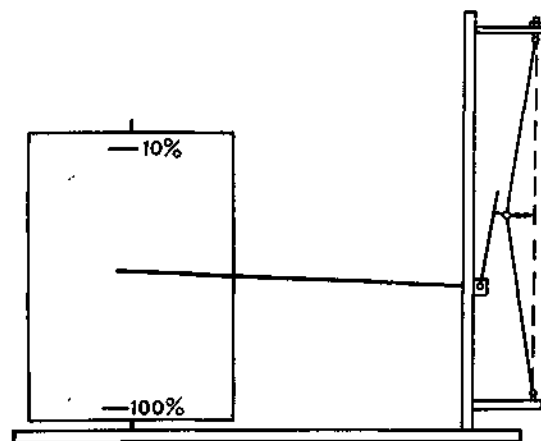


Рис. 3.9. Схема волосного гигрометра.

Эти два физических процесса, происходящих в волосе, — капиллярная конденсация и испарение (с гистерезисом) и растяжение и сжатие (с антигистерезисом) — связаны между собой нелинейно. Например, волос между 80 и 100%-ной относительной влажностью воспринимает наибольшее количество воды (составляющее 10% его сухого веса); в то же время в этой области он обнаруживает наименьшее относительное удлинение (0,2%).

На изменение длины волоса влияет не только влажность, но и температура воздуха. Термический линейный коэффициент для температуры от -80 до $+50^{\circ}\text{C}$ составляет примерно $34 \cdot 10^{-6}$, т. е. 0,0034% на 1°C или 0,34% на 100°C . Этот коэффициент мал по сравнению с удлинением, обусловленным изменением относительной влажности на 100%, составляющим 2,5% начальной длины. Удлинение волоса на каждый 1% относительной влажности примерно в 15 раз больше, чем на каждый 1°C . Поэтому им можно пренебречь, особенно при температуре от $+20$ до -60°C .

Однако при влажности, близкой к 100%, изменение температуры на 3—4 $^{\circ}\text{C}$ может привести к такому же изменению показания гигрометра, как и изменение влажности на 1%. Поэтому влияние температуры в этих условиях становится сравнимым с влиянием влажности.

При очень низкой температуре (ниже -45°C) некоторые сильно обезжиренные волосы внезапно удлиняются при отсутствии изменения относительной влажности. После этого волос перестает реагировать на изменение влажности и становится негодным.

Волос обладает очень большой инерцией, при положительной температуре инерция волоса примерно такая, как и биметалла. Однако при -30°C его инерция уже возрастает более чем в 30 раз, достигая 17 мин. Ясно, что при столь значительной инерции результаты измерений влажности волосным гигрометром являются совершенно неудовлетворительными.

Волосной гигрометр (рис. 3.9) применялся в первом советском радиозонде РЗ-049 и в первых самолетных метеорографах. В. Д. Решетов создал теорию использования волосного гигрометра в атмосфере. Однако в настоящее время волосные гигрометры в аэрологии практически не применяются.

Вальцованный волос. Франкенбергу (ФРГ) удалось с помощью механической обработки значительно улучшить измерительные свойства волоса. Если нормальный волос, имеющий круговое сечение, провальцевать между двумя валами при высоком давлении, придав ему эллиптическое сечение (с отношением осей 1:3 или 1:4), то такой вальцованный волос реагирует на изменения влажности, особенно при низкой температуре, гораздо лучше, чем нормальный волос. Поэтому во многих зарубежных радиозондах применяют только вальцованный волос.

Животная пленка. В настоящее время для измерения влажности используют также животную пленку (так называемый бодрюш, золотобича, парфюмерная лайка).

Животная пленка, так же как и человеческий волос, состоит главным образом из кератина. Она изготавливается из серозной оболочки слепой кишки крупного рогатого скота.

Подобно волосу, животная пленка требует предварительной обработки. Она тщательно моется в теплой воде и эфире, затем просушивается. Чаще всего пленку применяют в виде мембран (пленка, натянутая на кольцо), имеющих жесткий центр. Полоски животной пленки подвергаются искусственному старению в растянутом состоянии в пересыщенном влажном воздухе в течение нескольких дней; при этом она удлиняется и меняет свою структуру: первоначально гладкая и прозрачная пленка становится беловатой и хрупкой. Затем ее массируют посредством 4—5-кратного воздействия на нее изменением влажности от 5 до 100%. После того как первоначальное удлинение снижается примерно наполовину, полоску можно уже применять как датчик влажности. Оптимальное натяжение для бодрюша составляет 2—3 г на 1 мм ширины полоски. Удлинение бодрюша не зависит от температуры и достигает 48% при изменении влажности от 0 до 100%. Поэтому чувствительность животной пленки в 2—3 раза больше чувствительности нормального волоса. Недостатком животной пленки является быстрое увеличение ее коэффициента инерции при уменьшении температуры.

При изменении относительной влажности бодрюш обнаруживает отчетливый гистерезис. При проверке путем изменения влажности от 20 до 100% и обратно получается петля гистерезиса в 10—15%, причем наиболее широкое место петли гистерезиса соответствует относительной влажности 40—50%. Чтобы уменьшить влияние гистерезиса, перед проверкой и перед подъемом животную пленку надо подержать 20 мин в насыщенном воздухе, а затем провести проверку при понижении влажности.

При покрытии животной пленки тончайшим налетом воды ее показания резко отклоняются от действительной влажности. Поэтому ее следует защищать от дождя.

Все органические гигроскопические гигрометры (нормальный волос, вальцованный волос, животная пленка) обладают малой устойчивостью поверки, объясняемой отчасти их небольшой механической прочностью, а главным образом весьма сложным процессом капиллярной конденсации водяного пара и удлинения.

Главным требованием, которое предъявляется к датчикам влажности при аэрологических измерениях, является малый коэффициент инерции при низкой температуре. Исследования показали, что вальцованный волос при любой температуре реагирует на изменение влажности быстрее, чем пленка, а пленка в свою очередь реагирует быстрее, чем нормальный волос.

Пленочные датчики влажности в настоящее время используются во всех советских радиозондах. Многолетний опыт показывает, что эти датчики работают до высоты 5—8 км, выше они неработоспособны вследствие значительной инерционности и гистерезиса.

Как показали лабораторные исследования, температурная погрешность пленочного датчика при температуре -20°C может достигать 20%, а при температуре ниже -60°C пленочные датчики практически теряют чувствительность. Оценка инерционности показала, что при отрицательных температурах она достигает десятков минут. При совместных выпусках пленочного датчика с датчиком другого типа, обладающим значительно меньшей инерцией, оказалось, что пленочные датчики после выхода из облачности еще в течение некоторого времени показывают высокую относительную влажность и, следовательно, завышают верхнюю границу облачности.

Электролитические гигрометры. Наряду с органическими гигроскопическими гигрометрами за последние годы были разработаны датчики из неорганических гигроскопических веществ.

К классу электролитических гигрометрических датчиков (ЭГД) относятся датчики, имеющие чувствительный элемент, изготовленный из гигроскопического материала, который при измерении влажности находится в гигротермическом равновесии с воздухом. На выходе такого датчика создается тот или иной электрический параметр. Основные электролитические датчики — хлористо-литиевый, угольный, полиэлектролитический и некоторые другие.

Измерение влажности такими датчиками сводится к определению электрического сопротивления или емкости нанесенной на пластинку тонкой пленки электролитического вещества, содержащего гигроскопические соли. В зависимости от относительной влажности пленка поглощает то или иное количество влаги и ее электропроводность меняется. Поглощение водяного пара происходит до тех пор, пока давление пара над поверхностью образующегося раствора не достигнет равновесия с давлением водяного пара окружающей среды. Дальнейшее изменение влажности среды в зависимости от знака этого изменения вызовет

поглощение влаги или испарение ее до состояния равновесия. Сопротивление электролитической пленки изменяется в зависимости от температуры и концентрации растворенного вещества. При попадании воды градуировка ЭГД нарушается. Инерция электролитических гигрометров при измерениях влажности сильно возрастает при уменьшении температуры. Для каждой температуры имеется нижний предел измерений относительной влажности.

Электролитические гигрометры применяются в американских радиозондах. Один из них состоит из тонкой полистироловой пластинки, вдоль длинных краев которой нанесены металлические электроды. Пластика и электроды покрыты пленкой поливинилацетата с хлористым литием. При положительной температуре окружающего воздуха сопротивление этого гигрометра меняется примерно от 10 Мом до 5000 Ом при изменении относительной влажности от 15 до 100%.

В другом электролитическом гигрометре тонкая пленка состоит из гигроскопического вещества, в котором диспергированы частицы угля; такой элемент называется угольным гигрометром. Этот датчик обладает высокой чувствительностью по отношению к изменению влажности, малой инерцией, отсутствием поляризации и не зависит от температуры в диапазоне $0-40^{\circ}\text{C}$. Однако этот датчик полностью выходит из строя при температуре ниже -40°C .

В последние годы разработаны перспективные кулонометрические и оксидно-алюминиевые датчики влажности. Сорбционный оксидно-алюминиевый датчик (ОАД) обладает рядом положительных качеств, он имеет малую инерцию, чувствителен к малым концентрациям влаги, хорошо воспроизводит электрические характеристики, обладает малым гистерезисом и, кроме того, имеет малые размеры.

Оксидно-алюминиевый датчик представляет собой тонкую алюминиевую фольгу или проволоку, на которой путем анодирования образован слой окиси алюминия. На поверхность окиси напылена в вакууме тонкая металлическая пленка, позволяющая свободно протекать процессам сорбции влаги. По данным электроно-микроскопических исследований слой окиси алюминия имеет пористую упорядоченную структуру, при этом диаметр пор и их расположение неизменны по всей толщине слоя. Структура ОАД показан на рис 3.10.

Такое строение в сочетании с повышенной сорбционной активностью поверхности окиси алюминия создаст благоприятные условия для сорбции паров воды. Выходными характеристиками датчика являются проводимость и емкость.

Основными недостатками ОАД являются зависимость их градуировок от температуры и существенная нестабильность во времени. Однако тщательные лабораторные исследования этих отрицательных свойств показали, что температурная зависимость может быть устранена с помощью введения поправок на температуру при обработке данных зондирования.

Кулонометрические гигрометры. Кулонометрический метод измерения влажности основан на измерении количества электрической энергии, затраченной на электролиз воды, поглощенной химическим сорбентом (поглотителем) из воздуха, проходящего через измерительную камеру гигрометра.

Чувствительным элементом является электролитическая ячейка, представляющая собой стеклянную или тефлоновую трубку, внутренняя поверхность которой покрыта поглотителем (частично гидратированным фосфатным ангидридом) и на которой расположены платиновые электроды. Поглощаемая влага непрерывно разлагается электродами на водород и кислород. При этом величина тока является мерой концентрации водяного пара.

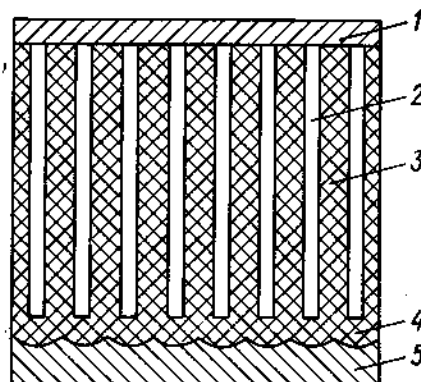


Рис. 3.10. Строение оксидно-алюминиевого датчика влажности.

1 — паропрозрачная металлическая пленка; 2 — микропоры; 3 — слой окиси алюминия; 4 — «барьерный» слой; 5 — алюминиевое основание.

Кварцевый метод. Значение относительной влажности можно также определять по изменению частоты колебаний кварцевого кристалла, покрытого влагочувствительной пленкой. В зависимости от абсолютной влажности изменяется вес пленки и частота собственных колебаний кварца. Однако вследствие зависимости частоты колебаний от давления применение этого метода в аэрологии представляет значительные трудности.

3.5.3. Конденсационные методы

Наименее удовлетворительно измеряется влажность всеми описанными выше методами при низкой температуре (до -70°C). В этом случае единственно надежным является гигрометр, основанный на измерении температуры точки росы. Он обладает высокой точностью и малой инерцией.

Непосредственное измерение точки росы невозможно. Сначала необходимо так понизить температуру некоторой поверхности, соприкасающейся с воздухом, чтобы на ней началась конденсация. Для определения точки росы измеряют температуру поверхности, при которой начинается конденсация и при которой конденсат исчезает. Точка росы находится как среднее арифметическое этих измерений.

Таким образом, в приборе для измерения температуры точки росы должно быть: 1) холодильное устройство, которое в состоянии понизить температуру воздуха ниже ожидаемой температуры точки росы; 2) нагревательное приспособление для удаления продуктов конденсации; 3) оптическое или электрическое устройство для установления факта начала конденсации и удаления продуктов конденсации и для переключения от холодильника к нагревателю и, наконец, 4) устройство для измерения температуры зеркала, на котором осаждается роса.

Гигрометры, основанные на измерении точки росы, находят свое применение в самолетном зондировании.

3.5.4. Метод спектрального поглощения

Водяной пар имеет несколько интенсивных полос поглощения радиации в инфракрасной части спектра. Поэтому содержание водяного пара в воздухе можно определять, измеряя спектрофотометром поглощение длинноволновой

радиации в двух областях спектра: в какой-либо из интенсивных полос поглощения спектра водяного пара и в другом участке спектра, где радиация водяным паром не поглощается.

Измерение интенсивности радиации в выбранных двух областях спектра можно производить, например, с помощью фотозлемента с электронным усилителем. Спектроскопический метод измерения влажности обладает достаточной чувствительностью и безинерционен. Но при уменьшении температуры чувствительность метода заметно уменьшается. Практическое применение метода затруднено из-за сложности и громоздкости всего измерительного устройства. Применяется на самолетах и аэростатах.

В заключение приведем табл. 3.2, в которой даны характеристики различных методов измерения влажности.

ТАБЛИЦА 3.2

Тип датчика	Назначение	Диапазон измерения	Ошибка, %	Инерция, с	Нижний предел температуры, $^{\circ}\text{C}$
Сорбционные методы					
Деформационный					
Волосной	Самолет	20—100%	5—7	40—30	—35
Вальцованный волос (ФРГ)	Р/з	20—100	5—7	10—30	—50
Пленочный	Самолет, Р/з	20—100	5	5—30	—60
Электролитический					
Хлористо-литиевый (США, Япония, Канада)	Р/з	15—100	3—5	5—40	—40
Угольный (США)	"	10—100	3—5	1—40	—40
Свинцово-иодистый	Лаборатория	12—100	3—5	3—5	—30
Титано-цериевый	"	10—100	3—5	5—20	—30
Полиэлектролитический (США)	Р/з	10—100	3	1—30	—65
Фтористо-бариевый (США)	"	1,5—100	3	0,5—30	—60
Оксидно-алюминиевый (Шотландия, Япония, США, СССР)	"	10—100	3	1—30	—80
Термоэлектрический (США, Канада)	"	11—100	3—5	20—40	—65
Кварцевый (США)	Лаборатория	0,001—30 г/м ³		3—30	
Кулонометрический					
Индикатор отношения смеси (США)	Самолет	0,01—30 г/кг	0,3—10	1	—90
Кулонометрический гигрометр «Теплоприбор» (СССР)	Лаборатория	1—30	2,5	200	—30
Конденсационный метод					
Автоматический гигрометр (США)	Аэростат	+30...—70 $^{\circ}\text{C}$	5—14	1—25	—90
Автоматический гигрометр «Бендикс» (США)	Р/з	+30...—70			
Автоматический гигрометр ИПГ	Самолет	+30...—80	2—6	5—60	
	"	+30...—20	3—5		

Тип датчика	Назначение	Диапазон измерения	Ошибка, %	Инерция, с	Нижний предел температуры, °С
Полуавтоматический гигрометр академии им. Можайского	Самолет	+30...-70			
Спектроскопический метод					
ИК спектрометр (комплекс ЛГУ)	Лаборатория	2—20 г/м ³	0,5—5	0,1—60	-70
ИК гигрометр ИФА	Аэростат	0,001—30	10	—	—
ИК спектрометр Хаутона (Англия)	Самолет	0,01—30	10	—	—
УФ гигрометр	„	0,01—30	1	0,05	—
Рефрактометрический метод					
Микроволновый гигрометр Серженца (США)	Лаборатория	0,15—15 мбар	0,7—4	180	—
Микроволновый гигрометр Банкера (США)	Самолет	0,2—30	3—5	—	—
Микроволновый гигрометр ЦАО (СССР)	Лаборатория	3—30	3	—	—

3.5.5. Ошибки, возникающие при измерении влажности

Измерение влажности связано с еще большими трудностями, чем измерение температуры, в особенности очень малых значений влажности при низкой температуре.

Все перечисленные выше приборы — психрометр, волосной, пленочный и электролитический гигрометры — становятся чрезмерно инертными и неточными при низкой температуре и малой влажности. Инертность этих приборов связана с резким замедлением процесса влагообмена между воздухом и датчиком влажности. Такой влагообмен возможен только при достаточной вентиляции и влажности воздуха.

При больших скоростях обтекания гигрометра воздухом при зондировании на скоростных самолетах его показания могут быть существенно искажены вследствие повышения температуры, обусловленного трением и адиабатическим нагреванием: относительная влажность будет занижена.

Особая проблема возникает при измерениях влажности в облаках и осадках. В случае попадания капель воды на датчик требуется длительное время для его высыхания. Поэтому, если прибор, пройдя через дождь или облако, попадет затем в ненасыщенный воздух, его показания становятся ненадежными. Если датчик влажности подвергся обледенению, то затем он долгое время не реагирует на изменение влажности независимо от того, увеличивается она или уменьшается.

4 РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ

Радиозондированием называется вертикальное зондирование атмосферы с помощью специальных приборов — радиозондов. Радиозондом называется физический измерительный прибор, поднимаемый в атмосферу на свободно летящем шаре для измерения параметров состояния атмосферы на разных высотах и передачи результатов измерений по радио. Существуют еще так называемые сбрасываемые радиозонды, выпускаемые на парашютах с самолетов или аэростатов.

Метод исследования атмосферы с помощью радиозондов в настоящее время получил широкое распространение. В наши дни на многих аэрологических станциях регулярно выпускаются радиозонды, сообщаящие сведения об изменении с высотой таких важных метеорологических величин, как температура и влажность воздуха, атмосферное давление и облачность. Существенным преимуществом метода является то, что одновременно с измерениями указанных метеорологических величин имеется возможность определять скорость и направление ветра по сведениям о траектории полета радиозонда.

Радиозондирование является оперативным, простым и сравнительно дешевым методом получения массовой информации о состоянии свободной атмосферы практически при любой погоде.

Весьма существенно отметить при этом, что радиозонд при всей внешней простоте и дешевизне является точным и принципиально сложным измерительным прибором. Каждый радиозонд имеет измерительные узлы, коммутирующее устройство, или шифрующий механизм, и миниатюрную радиопередающую станцию, питающуюся от батарей.

Кроме того, радиозонд предназначается для работы в таких тяжелых условиях, в которых многие другие сложные механизмы едва ли смогли бы действовать бесперебойно. Действительно, перепад температуры воздуха за время полета радиозонда составляет 100°С и даже более за сравнительно короткое время, давление уменьшается в 100—200 раз — от 1000 мбар

у земли до 5 мбар на высоте около 35 км, полный диапазон изменения влажности от полного насыщения до почти абсолютной сухости. При прохождении же сквозь зоны жидких осадков и облаков на прибор в изобилии попадает вода. При этом должна обеспечиваться высокая точность измерения всех этих параметров: давления ± 1 мбар, температуры $\pm 0,5^\circ\text{C}$, влажности $\pm 5\%$. Из известных в области точного приборостроения устройств в подобных условиях могут работать только метеорографы, но они не имеют ни шифрующих механизмов, ни радиопередатчиков и к тому же меньше ограничены в весе.

К настоящему времени в мире разработано свыше 100 конструкций радиозондов, однако в практике радиозондирования в наши дни их используется всего несколько, остальные конструкции представляют лишь исторический и некоторый учебный интерес.

Гибкость метода радиозондов, выражающаяся в общедоступности, дешевизне, принципиальной возможности получать высокую степень точности производимых измерений и во многих случаях в безопасности для наблюдателя (например, при необходимости изучать грозовые облака), способствовала появлению новых видов радиозондов, предназначенных для специальных исследований.

Оперативное радиозондирование атмосферы с помощью обычных радиозондов, измеряющих температуру, влажность, давление и ветер в свободной атмосфере, в настоящее время называется *температурно-ветровым радиозондированием*. Результаты подъемов обычных радиозондов практически немедленно используются в службе прогнозов погоды. Специальные радиозонды пока выпускаются только с исследовательскими целями, их конструкция более сложная и они дороже. Использование специальных радиозондов различных видов составляет *специальное зондирование атмосферы*.

4.1. Основы метода

При всем разнообразии конструкций радиозондов и систем радиозондирования каждая из них включает две основные части: собственно радиозонд и наземное приемное устройство (телеметрическая система). При этом радиозонд должен быть легким, простым и дешевым, так как он является прибором разового действия и после выпуска не возвращается. Наземное же устройство, напротив, может быть очень сложным и дорогим, так как оно должно обеспечивать устойчивый и бесперебойный прием сигналов от радиозонда на большом расстоянии и, кроме того, может быть оснащено различными приспособлениями для автоматической регистрации и обработки сигналов радиозонда.

Вследствие большого разнообразия принципов измерений, заложенных в первых радиозондах, были созданы основы клас-

сификации радиозондов по способу кодирования сигналов. Выделялось пять основных способов телеизмерений, отличавшихся друг от друга весьма характерными признаками. Передача значений отдельных метеорологических величин производилась либо знаками условного кода, либо путем использования промежуточных «величин-переносчиков», которыми являются время, число сигналов, длина волны радиопередатчика или частота модуляции создаваемых радиопередатчиком незатухающих или импульсных колебаний.

1. Кодовый способ — передача информации с помощью условных комбинаций электрических сигналов — точек и тире, например, азбуки Морзе. Обязательными для каждого кода являются краткость и четкость составляющих его знаков, а самое главное — их условное смысловое содержание по возможности должно быть однозначным.

Участие человека в процессе приема кодовых сигналов значительно повышает надежность передачи, которая остается возможной даже при наличии больших помех и глубоких замираний слышимости. В связи с этим кодовый способ телеизмерений при радиозондировании позволяет обходиться радиопередатчиками минимальной мощности.

Возможность применять весьма простую наземную аппаратуру для приема сигналов облегчает задачу оборудования пунктов радиозондирования и делает радиозонды, основанные на использовании кодового способа, особенно пригодными для экспедиционных условий.

Большое достоинство кодового способа заключается в том, что телеизмерение одних и тех же метеорологических величин в моменты изменения сигналов производится с минимальными погрешностями, так как телеметрический тракт в эти моменты никаких собственных погрешностей не добавляет. Этого нельзя сказать ни об одном из остальных способов телеизмерений, где процесс передачи каких угодно доброкачественных данных всегда сопровождается непременным увеличением общей погрешности результатов за счет телеметрического тракта.

Однако при этих достоинствах обстоятельствами, ограничивающими применение кодового способа, являются обязательность использования чувствительных элементов деформационного типа, а также неизбежная дискретность получаемых данных. Вследствие этого ограничивается область его применения. Кодовый способ телеизмерений наиболее пригоден в радиозондах для передачи закономерных изменений давления с высотой, менее пригоден для передачи температуры и еще менее — для передачи влажности.

Этот способ передачи данных сейчас используется в советской системе радиозондирования «Малахит» — А-22.

2. Временной способ — один из самых старых способов превращения деформаций чувствительных элементов

в пропорциональные отрезки времени. Сущность метода заключается в следующем. Чувствительные элементы управляют подвижными контактными стрелками. Подвижные стрелки заключены в пределах определенного сектора, на краях которого установлены неподвижные контакты. Контактный указатель, вращаемый часовым механизмом, поочередно соприкасается с неподвижным контактом, а затем с подвижным измерительным контактом. Вначале передается позывной сигнал (неподвижный контакт), а затем после паузы — рабочий измерительный сигнал. Мерой изменения измеряемого метеорологического элемента является временной размер паузы между этими двумя сигналами. При временном способе телеизмерения большое значение имеет равномерное вращение контактного устройства и вследствие этого контроль скорости вращения.

Временной способ телеизмерений в настоящее время в радиозондах практически не используется.

3. Числовой способ является разновидностью временного способа телеметрии. Он основан на преобразовании измеряемой величины в пропорциональное ей число однотипных сигналов, подсчитываемых на приемном конце линии телеизмерения, т. е. вместо времени мерой изменения измеряемой величины является число импульсов, излучаемых между позывным и измерительным сигналами. При этом процесс измерения совершенно не зависит от времени. Искомая величина определяется по принятому числу импульсов с помощью градуировочной таблицы или графика, выражающих эту величину в виде функции числа сигналов.

Числовой способ кодирования сигналов сейчас тоже практически не применяется.

4. Высокочастотный способ. При этом способе телеизмерений передача значений метеорологических величин осуществляется путем изменения несущей частоты радиопередатчика. Воздействие на частоту передатчика осуществляется с помощью конденсаторов переменной емкости, управляемых чувствительными элементами. Высокочастотному способу свойственна условная цена деления шкалы, которой определяется максимально достижимая точность передачи измеренных значений.

Однако высокочастотный радиозонд работает безупречно лишь тогда, когда изменение частоты вызывается только чувствительным элементом, управляющим емкостью измерительного конденсатора. Исключение посторонних влияний, например изменения напряжения батарей, температуры окружающей среды и др. обычно производится с помощью периодического включения конденсаторов постоянной емкости в катушку колебательного контура.

Недостатком всех высокочастотных радиозондов является также требуемая для необходимой точности измерения большая ширина полосы частот передатчика, что не всегда выполнимо.

5. Низкочастотный способ. Сущность способа заключается в том, что величиной-переносчиком служит низкочастотный сигнал, воздействующий на амплитуду несущей частоты радиопередатчика. В своем полном виде низкочастотный способ применен в моделях радиозондов США и в советской системе радиозондирования «Метеорит» — РКЗ.

Специфической особенностью низкочастотного способа является возможность сравнительно простыми в техническом отношении приемами осуществить воздействие на частоту модуляции датчиками сопротивления, такими, как терморезисторы, а также электрические гигрометры. Амплитудная модуляция осуществляется с помощью переменного сопротивления, включенного в цепь сетки лампы измерительного генератора.

В то же время частота измерительного генератора зависит от таких дестабилизирующих факторов, как изменения напряжений батарей накала и анода или общие значительные изменения температуры всех деталей схемы. В целях исключения возможных погрешностей в модуляционных радиозондах применяются датчики опорных частот, которые формируются с помощью высокостабильных сопротивлений. Мерой изменения параметров является отношение частоты, модулируемой чувствительным элементом, к опорной частоте передатчика. Низкочастотный метод позволяет осуществить полную автоматизацию приема и регистрации сигналов радиозонда.

Каждый радиозонд (независимо от вида и конструкции) обязательно включает в себя три основные части:

1) первичные преобразователи или чувствительные элементы, которые реагируют на изменения измеряемых величин;

2) коммутирующее устройство, т. е. приспособление, предназначенное для последовательного подключения чувствительных элементов к передатчику; в некоторых случаях оно является также и кодирующим устройством, преобразующим выходные параметры чувствительных элементов в подходящие для передачи по радио сигналы;

3) коротковолновый или ультракоротковолновый радиопередатчик с антенной и источниками питания.

Обязательной принадлежностью каждого радиозонда являются градуировочные графики, содержащие сведения о зависимости измеряемого параметра от изменения состояния чувствительного элемента. Эти графики составляются в процессе градуировки чувствительных элементов на заводах, где изготавливаются радиозонды.

Процесс радиозондирования содержит ряд обязательных операций, обеспечивающих правильное использование радиозонда и получение точных результатов зондирования. Эти операции включают в себя:

а) подготовку радиозонда к выпуску, в которую входит внешний осмотр радиозонда, сличение номеров чувствительных

элементов и радиопередатчика с номерами на градуировочных графиках, проверка радиопередатчика, подготовка комплекта питания, сборка радиозонда;

б) поверку радиозонда перед выпуском, целью которой является проверка сохранности градуировочных данных радиозонда, которая осуществляется путем сопоставления результатов измерений метеопараметров с помощью радиозонда и с помощью контрольных наземных приборов;

в) выпуск радиозонда, прием и обработку сигналов радиозонда, составление таблицы результатов зондирования и подачу аэрологической телеграммы.

Не останавливаясь подробно на истории радиозондирования в нашей стране, описанной в первой главе, рассмотрим в следующих разделах основные системы радиозондирования, применяющиеся в настоящее время для оперативного радиозондирования атмосферы.

4.2. Система радиозондирования «Малахит» — А-22

Как указывалось в первой главе, первым в мире радиозондом был советский радиозонд РЗ-049, который в период с 1930 по 1955 г. подвергался различным изменениям и модернизациям и точность измерения которым все же оставалась недостаточной.

В 1955 г. на аэрологической сети появился радиотеодолит «Малахит», для совместной работы с этим радиотеодолитом в гребенчатом радиозонде коротковолновый передатчик был заменен на ультракоротковолновый передатчик ПРБ-1,5. Появилась возможность измерять угловые координаты радиозонда, а следовательно, получать информацию о ветре в любую погоду. Новый радиозонд для радиотеодолита «Малахит» появился в 1957 г. и был назван А-22-III, в этом радиозонде также использовался УКВ передатчик ПРБ-1,5. В конце 60-х годов радиотеодолит «Малахит» был оснащен дальномерной приставкой для измерения наклонной дальности до радиозонда. Одновременно с этим появился радиозонд А-22-IV, в котором вместо передатчика ПРБ-1,5 был установлен передатчик-ответчик А-35 и, кроме того, пропеллер был заменен микроэлектродвигателем, обеспечивавшим более равномерное вращение кодового барабана.

4.2.1. Описание радиозонда А-22-IV

Радиозонд А-22-IV является электромеханическим и по способу телеизмерения представляет собой кодовый прибор, однозначно передающий значения метеорологических величин с помощью десяти знаков Морзе (рис. 4.1). Радиозонд состоит из узлов давления, температуры, влажности, микроэлектродвигателя и кодового барабана, смонтированных на легком жестком

каркасе. Все измерительные узлы закрепляются на раме радиозонда. Кодовый барабан устанавливается концами оси в опорные гнезда и подпружинивается.

Для измерения давления используется блок из двух anerоидных коробок (рис. 4.2а), изготовленных из фосфористой бронзы и закрепленных на каркасе.

Для измерения температуры служит биметаллическая спираль (рис. 4.2б) толщиной 0,13 мм, прикрепленная в каркасу своими концами. В середине биметаллической спирали припа-

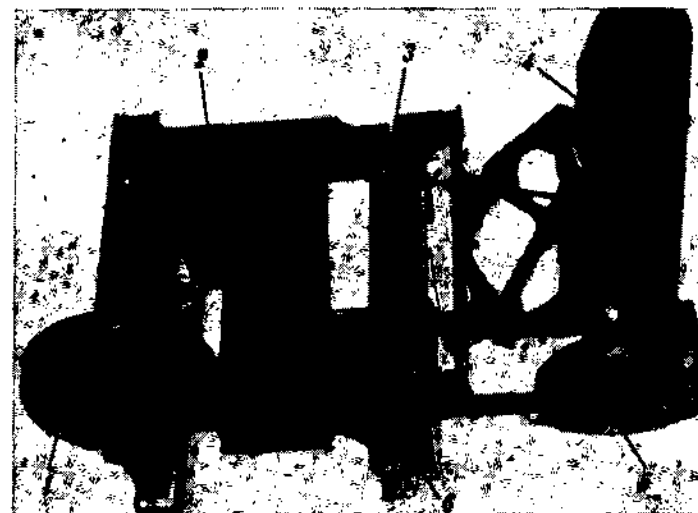


Рис. 4.1. Общий вид радиозонда А-22-IV.

1 — узел давления; 2 — мотор (микроэлектродвигатель); 3 — кодовый барабан; 4 — узел температуры в шахте; 5 — узел влажности; 6 — рама.

яна контактная стрелка. Витки спирали от стрелки к концам имеют противоположное направление. Вследствие изменения температуры биметаллическая спираль деформируется и вызывает поворот стрелки. Приемник температуры защищен от солнечной радиации тонкой съемной цилиндрической шахтой. Наружная поверхность шахты отполирована, а внутренняя зачернена.

Для измерения влажности служит животная пленка. Вызванная изменением относительной влажности деформация пленки передается с помощью системы передач указателю влажности.

Указатели температуры, давления и влажности поочередно касаются поверхности вращающегося кодового барабана. При этом каждому положению указателя относительно барабана соответствует определенное сочетание замыканий цепи передатчика в виде знаков Морзе. Сила, необходимая для преодоления

трения при образовании контактов, подводится не от чувствительных элементов, а от электромотора, вращающего кодовый барабан. Для того чтобы указатель не скользил по поверхности контактного барабана, на ней нанесены ведущие дорожки (бороздки). Поэтому указатель контакта входит в ведущую бороздку без бокового смещения, при этом образуется надежный

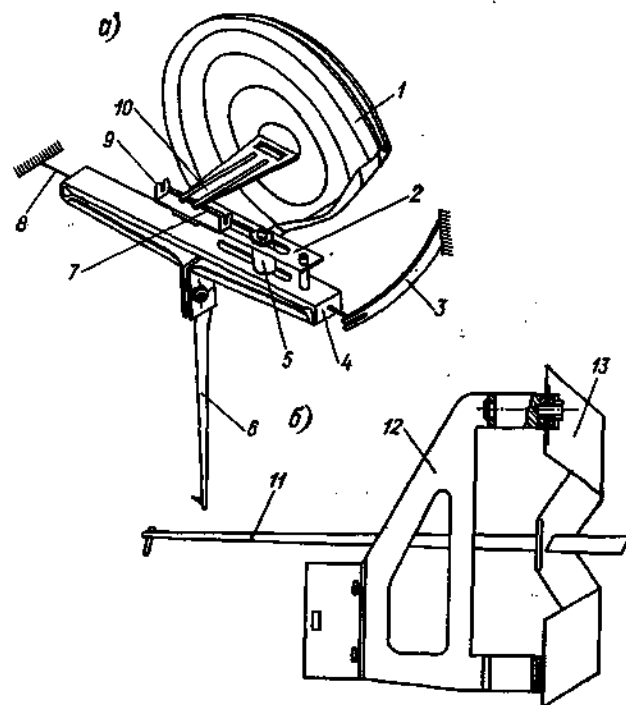


Рис. 4.2. Схема узлов температуры и давления радиозонда А-22-IV.

а — узел давления: 1 — блок мембранных коробок; 2 — биметалл термокомпенсатора; 3 — пружина для натяжения струны; 4 — скоба крошштейна; 5 — зажим регулятора; 6 — контактная стрелка; 7 — гибкая металлическая лента; 8 — струна; 9 — пружинная скоба; 10 — пружинный крошштейн; б — узел температуры; 11 — контактная стрелка; 12 — каркас; 13 — биметаллическая спираль.

контакт. Давление острия контактной стрелки может быть увеличено без искажения результатов измерений.

Кодовый барабан представляет собой металлический цилиндрический сектор с рифленой поверхностью, т. е. с поверхностью, покрытой дорожками, нанесенными по окружности цилиндра. Часть поверхности барабана проводит ток, а часть покрыта электроизоляционным лаком. Кодовое поле барабана (рис. 4.3) нанесено на его поверхность (кодую пластину) так, что при

прохождении острия стрелки любого датчика вдоль дорожек обеспечивается посылка передатчиком сигнала в виде двух букв азбуки Морзе: первая буква определяет номер десятка бороздок, вторая — номер единицы в данном десятке. Каждая буква десятка занимает 10 бороздок, а буквы единиц — только одну бороздку. Таким образом, с помощью десяти букв однозначно передается сто различных двухбуквенных комбинаций. Буквам, которые используются для передачи сигналов радиозонда, соответствуют следующие номера (десятков и единиц) дорожек:

	Код Морзе									
	—	.-	..--	.-.	..-.	.-..	---	-. .		..
Буква	Т	А	У	Р	Ф	Л	Д	Н	С	И
Номер дорожки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Ширина каждой дорожки кодового барабана равна 0,25 мм. Всего дорожек на кодовом барабане 300 (три секции по 100 дорожек).

Таким образом, сигналы любой метеорологической величины передаются двучисленным числом. Например, если сигнал давления подан в виде сочетания букв «УС», то это означает, что контакт произошел в тот момент, когда указатель давления находился на 28-й дорожке кодового барабана.



Рис. 4.3. Кодовое поле барабана.

1 — поле десятков; 2 — поле единиц.

За каждый оборот кодового барабана последовательно двухбуквенным кодом передаются показания датчиков давления, влажности и температуры. Для разделения циклов сигналов служит контактная пластинка, которая вмонтирована в паз изоляционной втулки оси барабана. При вращении барабана контактная пластинка замыкается с ламелью, закрепленной на корпусе прибора, в результате образуется сигнал в виде разделительного тире.

При хранении и транспортировке приборов кодовый барабан не соприкасается с контактными стрелками и стопорится винтом. Кожух прибора разборный. Верхняя часть надевается в виде крышки на нижнюю и закрепляется. Приемники температуры и влажности помещены в шахту прибора. В верхней части кожуха есть два отсека для радиопередатчика и батарей.

Усовершенствованной моделью радиозонда А-22-IV является радиозонд А-22-VII. Он отличается от радиозонда А-22-IV более усовершенствованным узлом давления: вместо бронзовых

барокоробок используются барокоробки из элинвара, которые имеют малый коэффициент температурного расширения и не требуют термокомпенсации.

Технические характеристики радиозонда:

Пределы измерений:

температуры	 +40 ... -70°C
давления	 1100—50 мбар
влажности	 15—100%

Коэффициент чувствительности:

температуры	 0,43—0,55°C/дорожка
давления	 4,0—5,3 мбар/дорожка
влажности	 0,9—2,0%/дорожка

Масса радиозонда:

без комплекта питания	800 г
с батареями	1100 г

Электроцепь радиозондов А-22-IV и А-22-VII составлена таким образом, что от плюса анодной батареи анодный ток через передатчик подается на корпус, таким образом корпус радиозонда всегда находится под напряжением. От корпуса ток проходит через стрелки на контактную часть кодового барабана и далее через ось кодового барабана на минус анодной батареи. При свободном положении всех контактных стрелок электрическая цепь замыкается через ламель, связанную с корпусом, и сектор, связанный с осью кодового барабана (разделительное тире). Для подключения батареи на корпусе радиозонда имеется трехштырьковый разъем.

4.2.2. Передатчик А-35

В радиозондах А-22-IV и А-22-VII для совместной работы с радиотеодолитом «Малахит» используется радиопередатчик-ответчик А-35. Детали передатчика в основном смонтированы на одной стороне платы. На другой стороне печатным способом нанесена монтажная схема и размещены два высокочастотных дросселя. Здесь же расположена катушка контура возбуждения и движок реохорда. Передатчик-ответчик А-35 совместно с радиотеодолитом «Малахит», оснащенный дальномерной приставкой, обеспечивает измерение угловых координат и наклонной дальности.

Наклонная дальность измеряется способом вторичной радиолокации. Передатчик дальномерной приставки посылает направленные радиоимпульсы на частоте 216 МГц. Принявший эти импульсы ответчик А-35 излучает ответный импульс на этой же частоте. Наклонная дальность определяется по времени между моментом излучения запросного импульса и моментом приема

ответного импульса. Определение дальности производится по индикатору дальномерной приставки при совмещении ответной паузы с отметкой на шкале.

Работа передатчика А-35 складывается из двух различных режимов:

1. Режим передачи метеоинформации — цепь замкнута. Передатчик генерирует импульсы, обеспечивая определение угловых координат, и одновременно передает сигналы метеоданных радиозонда.

2. Режим ответа — цепь разомкнута. Передатчик генерирует импульсы, обеспечивая измерение угловых координат, и одновременно с этим при поступлении запросного импульса излучает ответный импульс.

Технические данные передатчика А-35:

Частота излучения	 215—218 МГц
Мощность излучения	 0,1 Вт
Дальность действия	 100 км

Анодный ток радиолампы (в зависимости от режима работы) 1—10 мА

Ток накала радиолампы 130 мА

Питание передатчика осуществляется от батареи 80-ПМХС-2ч. Эта батарея состоит из трех анодных и одной накальной секции. Анодные секции соединены последовательно, в каждой 27 элементов. В качестве анода используются пластинки магния, в качестве катода — хлористый свинец. Между отдельными элементами проложена диафрагма из алюминия. При смачивании батареи водой происходит химическая реакция и возникает ток.

4.2.3. Градуирование радиозонда

Радиозонды А-22-IV и А-22-VII изготавливаются на Рижском опытном заводе гидрометеоприборов. Определение чувствительности и градуирование производится на заводе в процессе изготовления чувствительных элементов радиозонда.

Для градуирования узла давления необходимо следующее оборудование: барокамера, манометр МБП, вакуумный насос и ондулятор. Перед определением чувствительности барокоробок в барокамере производится массаж узла давления — узел давления несколько раз подвергается изменению давления от наземного до 10 мбар. Затем к проверяемым радиозондам подключают питание для вращения мотора и при очень медленной откачке воздуха начинают «поднимать» радиозонд в барокамере от давления 1040 мбар с остановками при следующих значениях давления (ступени): 850, 700, 550, 400, 250, 100, 50, 30 и 15 мбар, допустимое отклонение ± 10 мбар. На каждой ступени

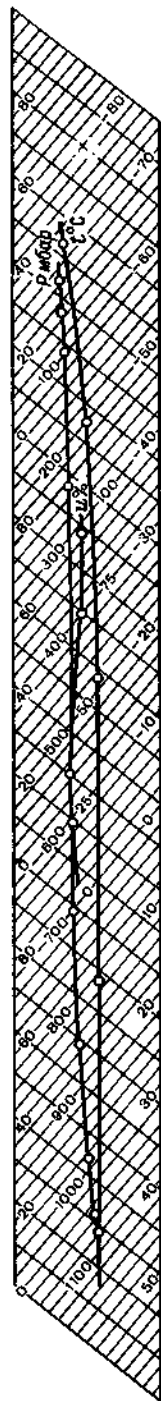


Рис. 4.4. Градуировочные графики радиозонда А-22-IV.

с помощью ондулятора производится запись сигналов давления на ленте ондулятора, через каждый миллибар делаются отметки. В результате обработки ленты ондулятора на каждой ступени определяется момент перехода сигнала радиозонда с одной дорожки на другую и значение давления для этого момента. Результаты градуирования наносят на график и с помощью лекала проводят кривую зависимости давления от номера дорожки с допустимым разбросом точек $\pm 0,5$ мбар (рис. 4.4). От первой и последней градуировочных ступеней выполняют экстраполяцию кривой до 1050 и до 0 мбар.

Для градуирования узла температуры применяется установка с ваннами, в которые наливается охлаждающая жидкость (спирт с углекислотой) или вода (для положительных температур). В каждой ванне поддерживается определенная температура (-70 , -55 , -25 , $+5$ и $+35^\circ\text{C}$) с допустимыми отклонениями $\pm 5^\circ\text{C}$. Температура в ваннах измеряется с помощью образцовых термометров сопротивления. Поверяемые приборы устанавливаются на кронштейны, датчики температуры радиозондов поочередно опускаются в ванны, и сигналы радиозондов записываются на ондулятор. По результатам измерения строятся градуировочные графики радиозондов по температуре.

Градуирование узла влажности производится в специальной камере-гигростате. Первой ступенью поверки является значение относительной влажности в гигростате около 100%. Затем при уменьшении влажности в камере до 80, 60 и 40% последовательно определяются значения влажности и соответствующие им сигналы радиозонда. Результаты градуирования наносят на бланк градуировочного графика, при проведении градуировочной кривой производится экстраполяция до 100 и 15%. После окончания градуирования всех измерительных узлов на градуировочном графике пишется номер радиозонда. Градуировочный график является основным документом, позволяющим выполнить обработку сигналов радиозонда.

4.2.4. Подготовка радиозонда к выпуску и выпуск радиозонда

Подготовка радиозондов к выпуску производится в следующей последовательности: 1) подготовка механической части радиозонда и проверка электрических цепей, 2) контрольная поверка радиозонда, 3) контрольная поверка узла давления, 4) подготовка радиоблока, 5) сборка радиозонда с радиоблоком, 6) поверка радиозонда перед выпуском.

При подготовке механических частей радиозонда проверяют работу микродвигателя, протирают кодовую пластинку — вначале керосином, затем сухой ветошью. Проверка электрических цепей заключается в прослушивании сигналов через зуммер — должны быть слышны четкие сигналы в определенной последовательности. Отключать питание радиозонда следует только в момент звучания разделительного тире, т. е. при свободном положении всех контактных стрелок.

Цель контрольной поверки радиозонда — сравнение показаний радиозонда с показаниями образцовых приборов: психрометра и манометра. В результате обработки данных контрольной поверки определяют вариации, или отклонения номеров дорожек от градуировочных данных, и делают предварительное заключение о годности радиозонда для дальнейшей подготовки к выпуску.

Для того чтобы сделать контрольную поверку, радиозонд устанавливают на вентиляционную подставку. В процессе поверки с помощью психрометра измеряют температуру и влажность. При установившихся сигналах радиозонда прослушивают номера дорожек и затем с помощью градуировочного графика определяют значения температуры и влажности, измеренных радиозондом. Вычисляют вариации, $\Delta N = N_{\text{градуир}} - N_{\text{прибор}}$. Радиозонд считается годным при следующих значениях вариаций влажности и температуры: $\Delta N_u \leq 10$ дорожек, $\Delta N_t \leq 6$ дорожек.

Если радиозонд годен по данным контрольной поверки, производится контрольная поверка узла давления, цель которой состоит в сравнении показаний узла давления радиозонда с показаниями манометра при барокамере на нескольких уровнях. Контрольная поверка дает возможность проверить стабильность чувствительности узла давления и градуировочные данные. Порядок выполнения контрольной поверки аналогичен порядку выполнения градуирования, при этом также необходимы барокамера, манометр и ондулятор. Радиозонд считается годным по результатам поверки узла давления, если абсолютная вариация на всех уровнях не превышает трех дорожек, а алгебраическая разность между максимальным и минимальным значениями вариаций не превышает одной дорожки.

Перед сборкой радиозонда проверяют работу передатчика и настраивают его на требуемую частоту.

После выполнения всех подготовительных операций собранный радиозонд выносят в будку и делают поверку перед выпуском. Основное назначение поверки — сравнение показаний радиозонда и абсолютных приборов и получение окончательного заключения о годности радиозонда к выпуску. Прослушивание сигналов радиозонда из будки ведется через «Малахит», регистрация — на полуавтоматическом регистраторе ПР-4. Регистрация производится только при установившихся сигналах радиозонда. Запись и обработка данных поверки в будке производятся так же, как и в случае контрольной поверки. Температура и влажность измеряются с помощью психрометра. Допуски на вариации давления, влажности, температуры такие же: 3, 10 и 6 дорожек. При неудовлетворительных результатах выдержки (вариации превышают допуск) поверку следует повторить. При повторных неудовлетворительных результатах прибор бракуют и заменяют запасным радиозондом.

Если прибор по данным поверки годен к выпуску, его вынимают из будки и привязывают к наполненной заранее оболочке, длина подвеса должна быть не менее 10 м. В это время в лаборатории оператор должен подготовить к работе полуавтоматический регистратор ПР-4. Антенны радиотеодолита направляют в ту сторону, куда должен полететь радиозонд. Начальные данные выпуска — дата, время, метеорологические наблюдения — записываются в таблицу ТАЭ-4а и книжку КАЭ-3. В момент запуска радиозонда по команде «пуск» в радиотеодолите включается секундомер, а в лаборатории — тумблер «сеть» регистратора ПР-4.

Работа операторов в радиотеодолите сводится к следующему: сразу же после выпуска радиозонда оператор, выполняющий пеленгование, по команде аэролога, выпустившего радиозонд, с помощью штурвалов направляет антенну на радиозонд. Через 0,5 мин импульсы должны быть выровнены (штурвалы вращают в сторону большего импульса), затем по блоку сельсинов производятся отсчеты горизонтального и вертикального углов. Как и при шаропилотных наблюдениях, отсчеты производятся через 0,5 мин до 3-й минуты, через 1 мин до 10-й минуты и далее через 2 мин.

Оператор, работающий на дальномерной приставке, сразу после выпуска включает приставку, соблюдая при этом необходимый последовательность включения, и далее в моменты отсчетов углов совмещает начало ответной паузы с визиром и отсчитывает по шкале значения дальности. Оператор, принимающий сигналы метеоканала, начинает прием на ПР-4 сразу после запуска и работает до конца подъема.

4.2.5. Обработка сигналов радиозондов А-22-IV и А-22-VII

Обработка сигналов радиозондов выполняется в следующей последовательности: 1) предварительная (до выпуска радиозонда), 2) проведение кривых p , T и u по сигналам радиозонда на диаграммной ленте, 3) обработка стандартных барических уровней и расчет высот радиозонда, 4) выбор и обработка особых слоев и точек, 5) обработка данных о ветре; 6) составление аэрологической телеграммы, 7) обработка стандартных высот и составление таблицы ТАЭ-3.

Предварительная обработка выполняется до выпуска и заключается в подготовке вспомогательных линеек или палеток для облегчения последующей обработки диаграммной ленты. Для этого используют кусок диаграммной ленты или полосу плотной бумаги. На ней вертикальными линиями размечают каждый десяток дорожек и производят их оцифровку в соответствии с градуировочными данными. Далее на градуировочном графике размечают стандартные барические уровни. Стандартными при радиозондировании являются следующие уровни: 1000, 900, 850, 800, 700, 600, 500, 400, 350, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 40, 30, 20, 15, 10 и 5 мбар. Для этих значений давления определяют и записывают номера дорожек. Кроме того, перед выпуском вычисляются радиационные поправки. Для этого с помощью астрономических таблиц определяют высоту солнца и по его высоте для стандартных барических уровней с помощью таблиц, помещенных в Наставлении, определяют радиационные поправки, которые записываются на градуировочном графике рядом с номерами дорожек стандартных барических уровней.

При обработке диаграммной ленты прежде всего следует проставить значения минут у отметок реле времени. Через нулевую отметку времени проводится горизонтальная линия выпуска, на ней с помощью палетки наносятся начальные данные p , T и u , определенные в момент выпуска. Далее на ленте последовательно размечают кривые давления, температуры и влажности, рекомендуется проводить их разными карандашами. Точки сигналов давления до 30 мбар соединяются либо от руки, либо с помощью специальных лекал. Переход сигналов с дорожки на дорожку при давлении ниже 30 мбар наносится в виде точек на любую из десятков дорожек на ленте. Следующий переход наносится на следующий десяток дорожек и т. д. Через точки перехода проводят по линейке отрезки, которые заменяют кривую давления на высотах 30 мбар и более. Точки сигналов температуры соединяют от руки карандашом, кривые проводят по большинству точек с таким расчетом, чтобы по обе стороны от кривой было одинаковое количество точек. Точки

сигналов влажности также соединяются от руки плавной линией. Часть диаграммной ленты показана на рис. 4.5.

На диаграммной ленте прежде всего обрабатывают данные для стандартных барических уровней. С помощью палетки и градуировочного графика на кривой давления точками отмечают моменты прохождения зондом стандартных уровней и через эти точки проводят горизонтальные линии через кривые T и u . Около этих линий определяют и записывают время от начала выпуска радиозонда, затем с помощью палеток определяют значения температуры и влажности. Чтобы определить высоты уровней, рассчитывают среднюю температуру слоя между соседними уровнями и вводят виртуальную поправку. *Первым слоем при любом наземном давлении является слой земля — 900 мбар.* Высота радиозонда определяется послойно, т. е. вначале с помощью барометрической формулы определяют толщины слоев между соседними уровнями. Затем эти толщины складываются. Полученная высота стандартного барического уровня в соответствии с выбранным масштабом откладывается в функции времени. Соединяя эти точки, строят график высоты радиозонда.

С помощью графика высоты в каждом слое вычисляют вертикальную скорость радиозонда (скорость подъема). При обработке данных радиозонда существуют следующие допуски на вертикальную скорость подъема:

p мбар	до 20	20—10	10—5	выше 5
w м/мин (не более) . .	550	600	650	750

Нижний предел вертикальной скорости существует только в светлое время суток, когда вводятся радиационные поправки, он равен 200 м/мин. Обработка диаграммной ленты производится только в тех случаях, когда скорость подъема не превышает допуска. За максимальную высоту подъема принимают уровень, до которого радиозонд поднимается с допустимой вертикальной скоростью.

После обработки стандартных барических уровней обрабатываются особые точки — изломы на кривых температуры и влажности; дополнительной особой точкой является уровень нулевой изотермы. Обработка аналогична обработке стандартных уровней, только «привязка» давления, высоты, температуры и влажности делается к моменту времени, соответствующему времени особой точки. Далее определяют уровень тропопаузы — нижнюю границу переходного слоя от тропосферы к стратосфере. За уровень тропопаузы принимают точку на кривой температуры, начиная с которой средний вертикальный градиент температуры становится равным или меньше $2^\circ\text{C}/\text{км}$.

Обработка ветра выполняется на планшете А-30Д по данным о горизонтальном и вертикальном углах и наклонной

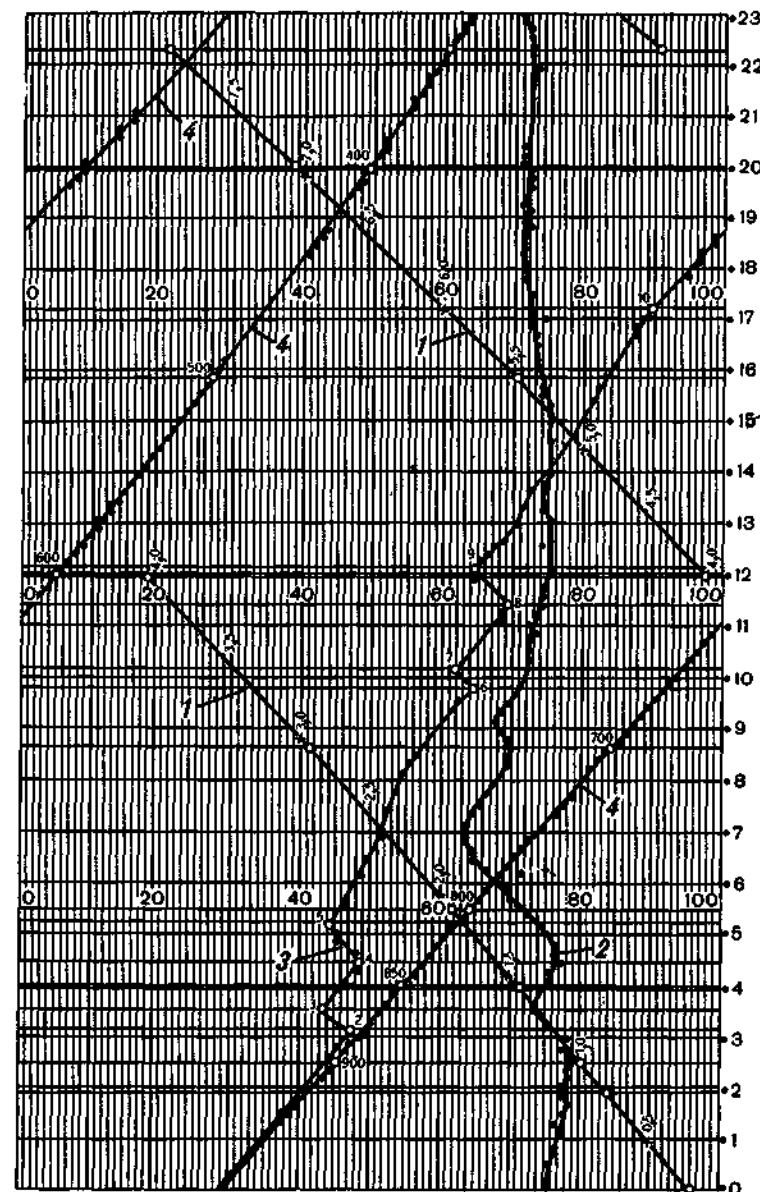


Рис. 4.5. Диаграммная лента с обработанными сигналами радиозонда А-22-IV.

1 — линия высоты; 2 — кривая влажности; 3 — кривая температуры; 4 — кривая давления.

дальности. После обработки ветра производится интерполяция ветровых данных на стандартные уровни и особые точки. Далее составляется аэрологическая телеграмма и таблица результатов зондирования ТАЭ-3, эти операции будут подробно рассмотрены далее.

4.3. Система радиозондирования «Метеорит» — РКЗ

Система «Малахит»—А-22 широко применялась на аэрологической сети СССР, однако потребности народного хозяйства постоянно требуют совершенствовать методы зондирования путем повышения их оперативности (сокращения времени получения результатов зондирования) и точности (применения более совершенных и точных чувствительных элементов). Вполне понятно, что повысить оперативность метода можно только с помощью автоматизации процесса получения и обработки информации от радиозонда. В конце 50-х годов была разработана новая, более совершенная по сравнению с предшествующими система радиозондирования «Метеорит»—РКЗ.

Главной особенностью этой системы является полная автоматизация процесса получения информации от радиозонда: сопровождение радиозонда по угловым координатам, прием и регистрация сигналов радиозонда осуществляются автоматически. Это дает возможность постоянно совершенствовать систему зондирования.

Система «Метеорит»—РКЗ состоит из наземной радиолокационной станции (РЛС) «Метеорит» и радиозондов типа РКЗ. Самый первый радиозонд РКЗ-1 измерял только давление и температуру, в радиозонд РКЗ-1А был добавлен узел влажности.

Большая точность определения высоты радиозонда позволила отказаться от измерения давления, а следовательно, и от градуировки баропереклювателя. В 1967 г. была произведена модернизация узла температуры, позволившая уменьшить ошибки измерения. Прибор с новым термоузлом получил название РКЗ-2. Позже на базе радиозонда РКЗ-1А был создан образцовый радиозонд РКЗ-3, в котором чувствительным элементом температуры служит высокоточный малоинерционный бусинковый терморезистор.

К 1971 г. была модернизирована РЛС «Метеорит». Новая станция «Метеорит-2» работает совместно с радиозондом РКЗ-5 и обеспечивает сопровождение его до 250 км. Более высокая чувствительность этой РЛС позволяет проводить радиоветровые наблюдения с помощью уголкового отражателя (пассивных мишеней) до высоты 100 км. Наконец, автоматические сопровождение и прием сигналов радиозонда в этой системе зондирования позволяют с помощью специального устройства получать перфоленту, которая вводится в ЭВМ для полной обработки данных.

Таким образом решается задача полной автоматизации получения информации от радиозондов.

Поскольку принципиальных различий в системах «Метеорит»—РКЗ-2 и «Метеорит-2»—РКЗ-5 нет, мы будем в дальнейшем рассматривать их совместно. Описание и рекомендации по эксплуатации технических средств системы, а также методика обработки результатов зондирования изложены в Наставлении.

4.3.1. Радиолокационные станции «Метеорит» и «Метеорит-2»

Прием и регистрация сигналов радиозондов типа РКЗ ведется с помощью РЛС «Метеорит» и «Метеорит-2». Радиозонд излучает в пространство радиосигналы на сверхвысокой частоте (СВЧ), при этом информация от чувствительных элементов (датчиков) кодируется в частоте повторения пауз в излучении СВЧ. Радиосигналы радиозонда кроме передачи информации о метеоэлементах используются для автоматического сопровождения его по угловым координатам. В данном случае используется принцип активной локации — наклонная дальность от РЛС до радиозонда определяется по времени запаздывания ответного сигнала радиозонда относительно момента послышки запросного импульса РЛС. Угловые координаты и наклонная дальность служат для определения высоты полета радиозонда и скорости и направления ветра на высотах.

При радиоветровых наблюдениях с помощью РЛС осуществляется сопровождение передатчика-ответчика А-28 или уголкового отражателя, в этом случае измеряются и регистрируются только координаты летящей цели.

В настоящее время аэрологическая сеть оборудована РЛС подвижными («Метеор» — полевой вариант) и стационарными. «Метеорит» — стационарный вариант РЛС, размещается обычно в здании аэрологической станции.

Тактико-технические данные станций «Метеор» и «Метеорит» одинаковы, они различаются только конструктивно.

Основные тактико-технические данные станций «Метеорит» и «Метеор» следующие:

Несущая частота	1782±8 мГц
Частота следования зондирующих импульсов	833 имп/с
Импульсная мощность передатчика	200 кВт
Длительность импульса передатчика	0,8 мкс
Чувствительность приемной системы	6,5·10 ⁻¹⁶ Вт
Диаметр раскрытия зеркала антенны	1,83 м
Ширина диаграммы направленности по половинному спаду мощности	6,5±1°
Дальность автоматического сопровождения радиозонда с регистрацией координат и метеоданных	150 км
Пределы работы по азимуту	неограниченно
по углу места	3—90°

Радиолокационная станция «Метеорит-2» используется на сети только в стационарном варианте. Как уже говорилось, эта станция является результатом модернизации РЛС «Метеорит», основной целью которой было увеличить дальность сопровождения радиозонда. Поэтому приемная система РЛС «Метеорит-2» имеет более высокую чувствительность. Увеличение чувствительности было достигнуто путем установления на входе приемной системы радиолокатора электронного параметрического усилителя (ЭПУ) с малым уровнем собственных шумов. Кроме того, в приемнике РЛС сужена полоса пропускания усилителя промежуточной частоты, увеличен диаметр зеркала антенны. Для того чтобы обеспечить начало сопровождения радиозонда непосредственно от момента выпуска (т. е. с малых дальностей примерно 75—200 м), РЛС «Метеорит-2» помимо основного магнетронного имеет дополнительный маломощный передатчик с отдельной антенной. Для облегчения поиска угловых отражателей имеется дистанционный пульт управления антенной, который может быть использован и для сопровождения радиозондов в тех случаях, когда радиозонд сразу после выпуска поднимается над станцией и при больших угловых скоростях его перемещения скорость переброса антенны оказывается недостаточной.

Основные тактико-технические данные радиолокационной станции «Метеорит-2»:

Несущая частота	1782±8 мГц
Частота следования импульсов	416 имп/с
Импульсная мощность магнетронного передатчика	200 кВт
Импульсная мощность маломощного передатчика	1 кВт
Длительность импульса магнетронного передатчика	1,5 мкс
Длительность импульса маломощного передатчика	0,7 мкс
Чувствительность приемной системы	5·10 ⁻¹⁴ Вт
Диаметр раскрытия зеркала антенны	2,5 м
Ширина диаграммы направленности по половинному спаду мощности	5±1°
Дальность автоматического сопровождения радиозонда с регистрацией координат и метеоданных	250 км

Монтаж радиолокационных станций «Метеорит» и «Метеорит-2» на аэрологической сети, так же как и развертывание полевого варианта станции «Метеор», производится только опытными специалистами по радиолокации, хорошо знакомыми с этими работами. После развертывания или монтажа радиолокационной станции выполняются следующие операции: станцию устанавливают по уровням (горизонтируют), производят поверку и настройку всех ее систем в соответствии с заводской инструкцией по эксплуатации, проверяют согласование электрической оси антенны с оптической осью визира, ориентируют от-

носительно стран света, проверяют установку шкал вертикального угла и при необходимости устанавливают шкалы.

На многих аэрологических станциях и особенно на судах погоды антенна радиолокатора с целью защиты от ветра, осадков

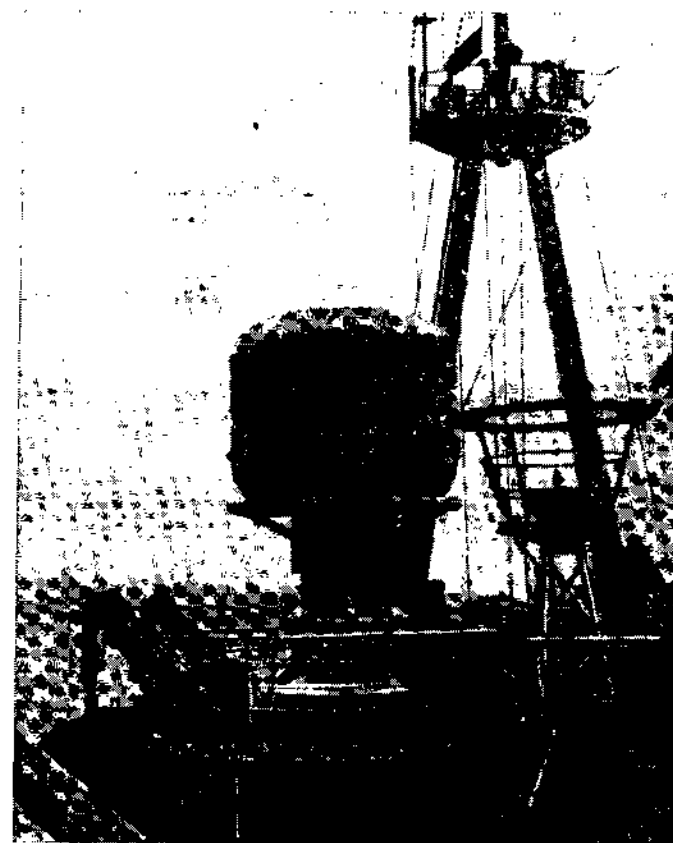


Рис. 4.6. Антенна РЛС «Метеорит» в радиопрозрачном укрытии на борту НИС.

и других внешних воздействий закрывается специальным радиопрозрачным укрытием (рис. 4.6). В этом случае все операции по установке антенны и подготовке ее к работе производят до установки радиопрозрачного укрытия.

4.3.2. Описание радиозондов РКЗ-2 и РКЗ-5

Для совместной работы с РЛС «Метеорит» и «Метеорит-2» используются различные радиозонды типа РКЗ. Температурно-ветровое зондирование производится с помощью радиозондов

РКЗ-2 и РКЗ-5. Высота полета радиозонда, а также скорость и направление ветра вычисляются по угловым координатам. Давление воздуха на различных высотах рассчитывается с помощью барометрической формулы.

Технические характеристики радиозонда РКЗ-2:

Диапазон измерения температуры воздуха	+50 —80°C
Диапазон измерения относительной влажности	15—100%
Диапазон определения давления на заданных уровнях	от наземного до максимальной высоты подъема
Несущая частота радиозонда	1782,5±8 мГц
Температура, относительная влажность и опорная частота	передаются в виде частот прерываний (пауз) в излучении передатчика СВЧ

Частоты пауз лежат в следующих пределах:

Опорная частота	1960—2220 Гц
Частота сигналов температуры ниже опорной частоты не менее чем на 50 Гц	
Минимальная частота	50 Гц
Частота сигналов относительной влажности ниже опорной частоты не менее чем на 50 Гц	
Минимальная частота	1500 Гц
Длительность пауз в излучении генератора СВЧ	50—300 мкс

Генератор СВЧ работает в режиме сверхрегенерации, частота суперирования 800 ± 25 кГц.

Очередность и дискретность передачи сведений о температуре, относительной влажности и опорной частоты обуславливаются рисунком шкалы баропереклюателя.

Радиозонд питается от батареи 200-ПМХМ-2 ч. Рабочие напряжения питания (в вольтах) в цепях накала $6,1 \pm 10$ и $2,4 \pm 10\%$, в цепи анода $195 \pm 8,5\%$. Общий потребляемый анодный ток не более 25 мА, потребляемый ток по цепи накала 2,4 В — не более 270 мА, по цепи накала 6,1 В — не более 290 мА.

Вес радиозонда в кожухе без комплекта питания не более 750 г.

На рис. 4.7 показаны основные узлы радиозонда РКЗ-2. В комплект радиозонда входят: радиоблок в футляре, баропереклюатель, термоузел (с кронштейном), узел влажности (с соединительным проводником), кожух, график градуировки радиозонда по температуре (одновременно служит паспортом радиозонда), график градуировки радиозонда по влажности, бумага миллиметровая для обработки результатов зондирования размером 550×750 мм, шнур льнопеньковый или хлопчатобумаж-

ный длиной 10 м, шнур хлопчатобумажный или шторный длиной 0,75 м.

В радиозонде РКЗ-2 принята числоимпульсная система передачи сведений о метеорологических величинах. Показанию того или иного датчика соответствует определенная частота повторения радиоимпульсов. Датчики температуры и влажности через баропереклюатель, с помощью которого осуществляется коммутация в радиозонде, поочередно включаются в сеточную цепь измерительного генератора радиоблока, вырабатывающего им-

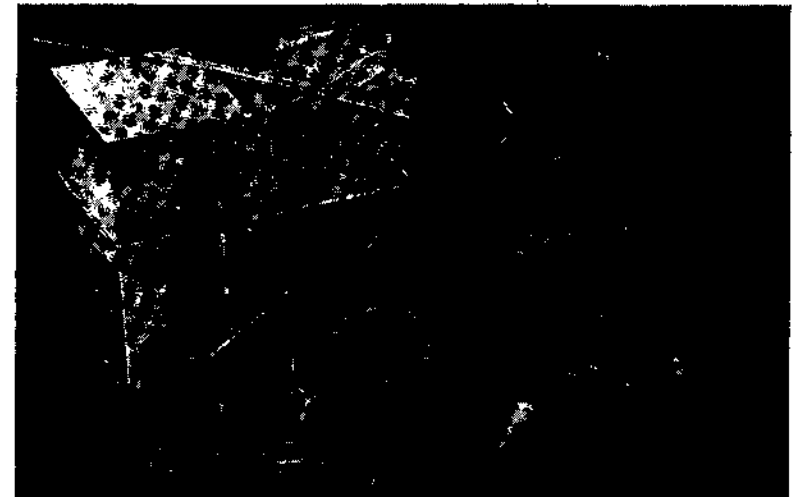


Рис. 4.7. Основные узлы радиозонда РКЗ-2.

1 — футляр радиоблока; 2 — кожух радиозонда; 3 — узел температуры; 4 — комплект питания 200-ПМХМ-2ч; 5 — радиоблок; 6 — баропереклюатель; 7 — узел влажности.

пульсы напряжений отрицательной полярности. Частота повторения этих импульсов определяется величиной сопротивления датчика (терморезистора, реостата узла влажности и опорного сопротивления). Измерительный генератор управляет работой генератора СВЧ радиозонда. Импульсы напряжений, поступающие от измерительного генератора на сетку лампы генератора СВЧ, срывают его генерацию, образуя паузы в излучении радиопередатчика. По частоте пауз в излучении передатчика радиозонда определяются температура и влажность воздуха. Обычно для краткости частоту пауз в излучении генератора СВЧ, соответствующую включению узла температуры, называют частотой температуры, частоту, соответствующую включению узла влажности, — частотой влажности, а частоту опорного сопротивления — опорной частотой.

Частота импульсов напряжений, вырабатываемых измерительным генератором радиоблока, зависит не только от величины сопротивления, включенного в его сеточную цепь, но и от ряда других факторов, в первую очередь от напряжения питающих батарей. Для того чтобы свести к минимуму влияние этих факторов на точность измерения параметров датчиков, в сеточную цепь измерительного генератора постоянно включено высокостабильное (опорное) сопротивление. В том случае, когда включено только опорное сопротивление, вырабатывается опорная частота, которая меняется только под влиянием различ-

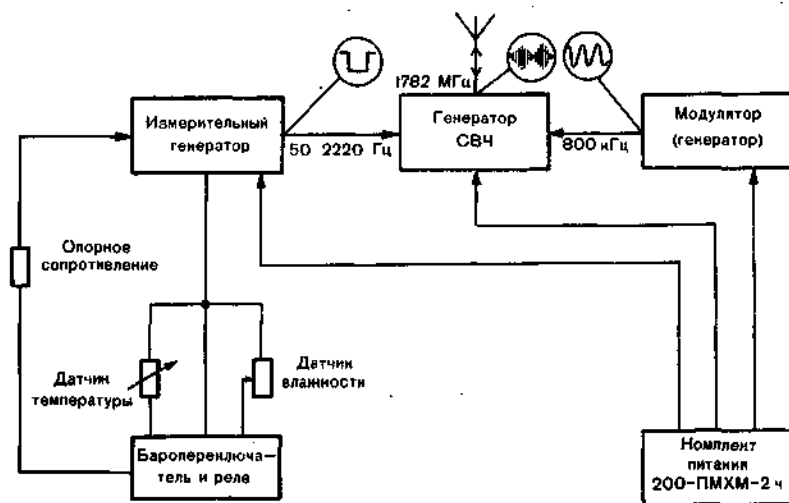


Рис. 4.8. Блок-схема радиозонда РКЗ-2.

ных дестабилизирующих факторов. Изменения опорной частоты и частот метеоданных под влиянием этих факторов происходят примерно пропорционально. Температура и влажность определяются по отношению частоты температуры f_t или влажности f_u к опорной частоте $f_{оп}$, т. е. по величинам $Y_t = f_t/f_{оп}$ и $Y_u = f_u/f_{оп}$, что значительно уменьшает ошибку измерения.

Работа передатчика радиозонда в режиме ответа управляется специальным модулятором — генератором синусоидальных колебаний 800 кГц. Наклонная дальность определяется автоматически по времени между посылкой запросного импульса РЛС и получением ответного сигнала от радиозонда $D = ct/2$, где c — скорость распространения радиоволн, t — время прохождения радиосигнала от радиолокатора до радиозонда и обратно.

На рис. 4.8 приводится блок-схема радиозонда РКЗ-2. Для измерения температуры используется полупроводниковый терморезистор типа ММТ-1, сопротивление которого зависит от температуры (возрастает с понижением температуры). Термо-

резистор прикрепляется к держателям в виде рамки, для крепления рамки к кожуху радиозонда имеется специальный полистироловый кронштейн. К концам держателей припаяны соединительные провода. Каждый терморезистор имеет шильдик с номером, который крепится к рамке.

Для измерения влажности служит пленочный датчик. Прогиб пленки, изменяющийся с изменением влажности, вызывает перемещение стрелки по контактной поверхности реостата. В зависимости от перемещения стрелки происходит увеличение или уменьшение сопротивления на выходе датчика влажности. Датчик влажности крепится к верхней части крышки кожуха радиозонда приемной частью наружу и защищается от попадания капель дождя козырьком.

Последовательное включение узлов температуры, влажности и опорного сопротивления в электрическую цепь радиоблока производится с помощью баропереклюателя, который крепится в специальном гнезде в крышке кожуха радиозонда. Движение стрелки баропереклюателя по металлической контактной шкале производится с помощью двух барокоробов. Вследствие постоянного понижения давления с высотой стрелка движется только в одном направлении. Металлическая контактная шкала нанесена на пластинку из органического стекла (рис. 4.9). Когда контактный указатель стрелки скользит по оргстеклу, подключается узел температуры. Для предохранения шкалы и контакта стрелки во время перевозки и хранения имеется специальный арретир, с помощью которого поднимают стрелку и размыкают ее со шкалой. Для проверки радиозонда перед выпуском баропереклюатель имеет специальную вилку для подключения к дистанционному переключателю. *Перед выпуском стрелка должна быть опущена на шкалу.*

Кожух радиозонда изготовлен из специального белого картона. В закрытом виде верхняя и нижняя части кожуха завязываются общим шнуром, пропущенным через специальные отверстия. Этот шнур используется одновременно для подвески радиозонда к шару.

В нижней части кожуха имеются два отсека, в меньшем устанавливается радиоблок, в большем — батарея.

Радиоблок состоит из следующих узлов: измерительный генератор, модулятор и передатчик СВЧ. Они смонтированы на тетиаксовой плате, на которой имеются гнезда для подключения

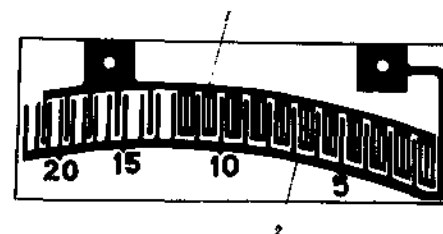


Рис. 4.9. Шкала баропереклюателя радиозонда РКЗ-2.

1 — шкала относительной влажности; 2 — шкала опорной частоты.

к радиоблоку баропереклювателя, узла температуры, узла влажности и комплекта питания.

Питание радиозондов РКЗ-2 и РКЗ-5 осуществляется от батареи 200-ПМХМ-2ч. Батарея имеет одну анодную и две накальные секции, составленные из гальванических элементов.

В качестве отрицательных электродов используются пластинки магния, в качестве положительных электродов — слой хлористой меди, нанесенный на тонкую медную пластинку. Между электродами находятся гигроскопические прокладки из алигнина, являющиеся электролитоносителем. Электрохимическая реакция возникает после заливки батареи водой.

Номинальное анодное напряжение батареи 195 В, первое накальное напряжение 6,1 В, второе накальное 2,4 В.

Выводы батареи питания заканчиваются четырехштырьковой вилкой, предназначенной для подключения батареи к радиоблоку.

Батарея типа 200-ПМХМ-2ч обладает особой характеристикой разряда. Напряжение в начале работы батареи быстро повышается, а затем в течение значительного времени изменяется мало. Лишь в заключительной стадии разряда напряжение начинает резко падать. В процессе работы батарея выделяет значительное количество тепла, что повышает ее морозостойкость.

Стабильность вырабатываемых батареями напряжений имеет важное значение, так как от их величины зависит точность измерений радиозондом метеорологических величин. Наибольшая точность обеспечивается при номинальных значениях напряжений. Однако, как правило, напряжения батарей отличаются от номинальных, поэтому контрольную поверку радиозонда производят только с той батареей, с которой он будет выпущен в полет.

Для работы с РЛС «Метеорит-2» используется радиозонд РКЗ-5. Он отличается от радиозонда РКЗ-2 увеличенной длительностью метеопаз, соответственно этому он излучает уменьшенные почти в два раза частоты температуры и влажности и опорную частоту. За счет этого сужена полоса приемной системы РЛС, повышена ее чувствительность и увеличена дальность сопровождения радиозонда.

Баропереклюватель в радиозонде РКЗ-5 заменен коммутатором, который состоит из микродвигателя, замедляющего редуктора и контактной системы. Микродвигатель вращает подвижный ползунок контактной системы, он питается от секции 6,1 В батареи 200-ПМХМ-2ч. Редуктор обеспечивает время нахождения ползунка на ламели в течение 15—30 с. Контактная система состоит из гетинаксовой платы, по окружности которой расположены семь сегментообразных контактов — ламелей, и подвижного контакта — ползунка. От ламелей отходят провода, соединяющие коммутатор с радиоблоком и датчиками.

Технические характеристики радиозонда РКЗ-5 следующие:

Длительность метеопаз	... больше 200 мкс, но меньше $\frac{1}{2}$ периода
Опорная частота	... 1060—1090 Гц (для номинальных напряжений)
Частота следования сигналов температуры	... более 50 Гц и ниже опорной не менее чем на 25 Гц
Частота следования сигналов относительной влажности	... более 500 Гц и ниже опорной не менее чем на 25 Гц

4.3.3. Этапы изготовления и градуировки радиозондов РКЗ-2 и РКЗ-5

Радиозонды типа РКЗ изготавливаются на Свердловском заводе гидрометеоприборов. Основные этапы изготовления и градуировки радиозондов следующие.

Плата для монтажа радиоблока изготавливается из гетинакса. Гетинаксовые платы покрываются медной фольгой, на которую масляной краской наносится рисунок монтажной схемы. После этого плата погружается в ванну с кислотой, в которой фольга вытравливается, рисунок же схемы под краской сохраняется. В следующей ванне в растворе уайт-спирита с платы смывается масляная краска, а рисунок из медной фольги с целью защиты от окисления покрывается защитным слоем — смесью из олова и висмута.

После этих операций плата попадает на автоматическую линию; автомат обрезает края, пробивает отверстия для монтажа и осуществляет установку на ней конденсаторов и резисторов. Монтаж ламп и окончательная сборка радиоблока производятся на конвейере.

После конвейера готовый радиоблок поступает на градуировку, которая делается с помощью магазина, состоящего из 18 контрольных высокостабильных сопротивлений: 1,5; 2,0; 3,6; 4,3; 5,6; 7,5; 11; 15; 20; 36; 47; 62; 82; 110; 150; 200; 270; 360 кОм. При поочередном подключении сопротивлений на частотомере определяются опорная частота радиоблока и частоты контрольных сопротивлений. По этим данным строится градуировочный график радиоблока в координатах $Y-R$ (отношение частот—сопротивление).

После градуировки на специальном стенде производится настройка радиоблока на паузу и ответ. Эпизодически радиоблоки испытываются на вибростенде. Проверка на вибростенде имитирует условия транспортировки и частично условия полета.

Узлы влажности полностью изготавливаются на заводе и собираются на конвейере вручную. После сборки узлы влажности устанавливаются в гигростат, где в течение 7—8 ч «массируются», т. е. выдерживаются в условиях изменяющейся влажности от комнатной (40—50%) до 100%. После массирования производят предварительную проверку узлов влажности: а) при комнатной влажности, которая определяется по психрометру, б) при 100%-ной влажности (над поверхностью воды).

Затем делают градуировку узлов влажности. Для этого их устанавливают в специальные гнезда в кассетах (по 100—200 штук) и помещают в гигростат. В результате градуировки составляют графики в координатах $R-u$ (сопротивление — относительная влажность).

При изготовлении узлов температуры терморезисторы ММТ-1 вначале градуируют в термостате, для чего их устанавливают в специальные кассеты. Градуировку производят по следующим точкам: 40, 25, 5 — 20, —45, —65°C. При каждой температуре выдержка составляет 40 мин. Градуировочный график терморезистора строится в координатах $R-t$ (сопротивление — температура). После градуировки терморезистор с помощью точечной сварки устанавливают в рамку и затем покрывают антирадиационной эмалью ВЛ-548.

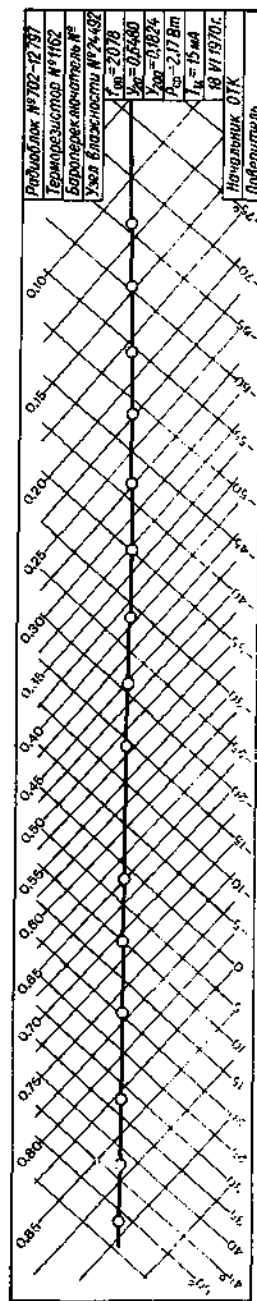


Рис. 4.10. Градуировочный график радиозонда РКЗ-2 по температуре.

его по сопротивлениям 20 и 200 кОм; средняя мощность излучения $P_{\text{ср}}$; общий анодный ток I_a ; указана дата градуировки.

В собранном виде узел температуры подвергают проверке при комнатной температуре — с помощью моста измеряют сопротивление и по градуировочному графику определяют температуру, допуск $\pm 0,25^\circ\text{C}$.

Готовые узлы радиозонда поступают на сборку, после которой с помощью градуировочных графиков в координатах $Y-R$ (для радиоблока), $R-t$ (температура) и $R-u$ (влажность) строятся рабочие графики в координатах $Y-t$ и $Y-u$.

Рабочий график градуировки радиозонда по температуре (рис. 4.10) строится по результатам сопряжения графика градуировки радиоблока при номинальных значениях питающих напряжений (195, 2,4 и 6,1 В) и графика градуировки терморезистора. Он строится по 15 точкам, соответствующим сопротивлениям 4,3; 5,6; 7,5; 11; 15; 20; 36; 47; 62; 82; 110; 150; 200; 270; 360 кОм. Точки нумеруются в той последовательности, в которой перечислены сопротивления. Иногда на графике отсутствует 1-я точка, поэтому для удобства ориентирования на графике 6-я (20 кОм) и 13-я (200 кОм) точки обводятся чернилами.

По оси абсцисс откладываются значения температуры терморезистора, соответствующие указанным сопротивлениям, по оси ординат — значения отношений частот $Y=f/f_{\text{ом}}$, соответствующие этим же сопротивлениям. График строится в специальном масштабе, обеспечивающем представление градуировочной кривой в виде прямой или отрезков прямых (не более трех). Масштаб графика: по оси температуры 1 деление $= 1^\circ\text{C}$, по оси отношений частот 1 деление $= 0,005$.

С правой стороны градуировочного графика указываются номера радиоблока, терморезистора и узла влажности, входящих в комплект данного радиозонда; значения опорной частоты и отношений частот при градуировке

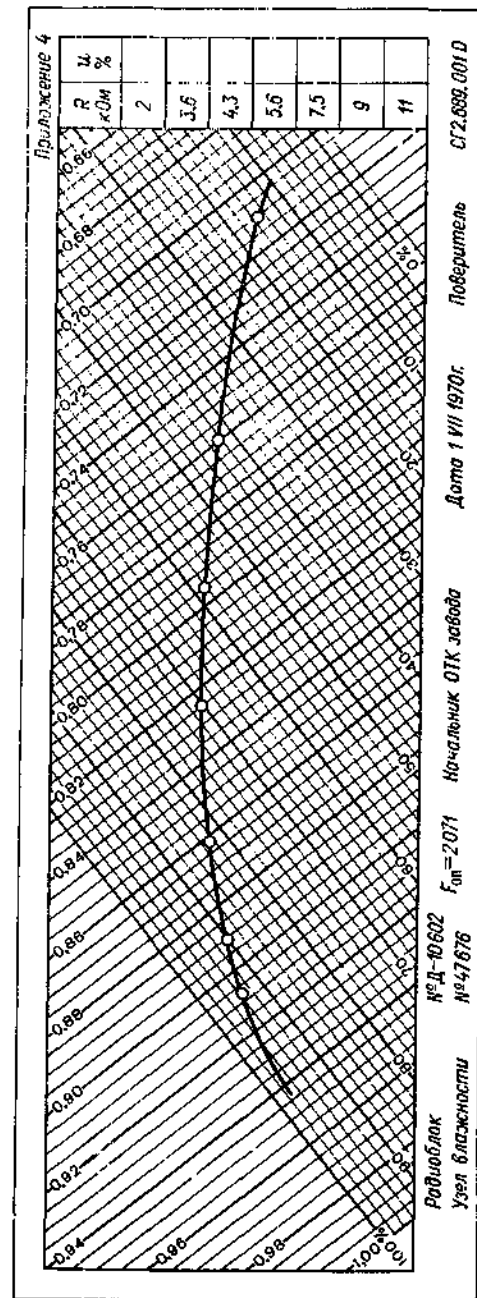


Рис. 4.11. Градуировочный график радиозонда РКЗ-2 по влажности.

График градуировки радиозонда по влажности (рис. 4.11) строится по результатам сопряжения графика градуировки радиоблока по сопротивлениям 1,5; 2,0; 3,6; 4,3; 5,6; 7,5; 11 кОм и графика градуировки узла влажности. График градуировки узла влажности представляет собой график зависимости сопротивления, снимаемого с реостата узла влажности, от значения относительной влажности.

По оси абсцисс графика влажности откладываются значения относительной влажности в масштабе 1 деление = 2%, по оси ординат — значения отношений частот $Y_u = f_u / f_{оп}$ в масштабе 1 деление = 0,005.

4.3.4. Подготовка к выпуску и выпуск радиозондов

Подготовка радиозондов к выпуску включает в себя подготовку измерительных узлов, проверку радиоблока, сборку радиозонда, подготовку комплекта питания и контрольную проверку радиозонда. Обычно на станции подготавливают к выпуску два или даже несколько радиозондов для того, чтобы в случае неисправности можно было бы быстро произвести замену.

Подготовка измерительных узлов радиозондов заключается во внешнем осмотре их и сличении номеров, записанных на градуировочных графиках, с номерами, выбитыми или прикрепленными к соответствующим узлам радиозонда.

Очень важным этапом подготовки радиозонда к выпуску является проверка радиоблока, так как при этом обеспечивается нормальная работа всего радиозонда в полете. Проверка электрических параметров радиоблока производится с помощью комплекта измерительных приборов аэрологической станции — КИПАС-1 или КИПАС-1М. КИПАС (рис. 4.12) готовят к работе, затем к нему подключают радиозонд и последовательно проверяют следующие характеристики радиоблока: величину потребляемого радиоблоком тока по анодным цепям, несущую частоту генератора СВЧ, частоту модулятора 800 кГц, качество ответного сигнала и величину опорной частоты.

Источником питания комплекта КИПАС является сеть переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 220 ± 20 В. Комплект позволяет производить измерения:

- несущей частоты радиоблока с погрешностью $\pm 0,07\%$;
- частоты модулятора с погрешностью $\pm 1\%$;
- длительности пауз в излучении генератора СВЧ и пауз при передаче опорной частоты с погрешностью $\pm 5\%$;
- частот измерительного генератора с погрешностью ± 1 Гц;
- проверку ответного сигнала.

Для выполнения всех этих операций в комплект входят следующие приборы: импульсный осциллограф С1-54, электронносчетный частотомер ЧЗ-33, резонансный частотомер ЧЗ-9А, вольтамперметр М-253, стенд СП-1М, стенд

СФ-1, запросчик З-2М и переключатель ПР-1. Все приборы связаны между собой разъемными электрическими соединениями. Они обеспечивают питание цепей радиоблока постоянным напряжением (стенд СП-1М), формовку и проверку батарей 200-ПМХМ-2ч (стенд СФ-1), излучение запросных импульсов, имитирующих импульсы наземной РЛС.

При проверке радиозонд устанавливается на специальную подставку, питание радиозонда осуществляется от стенда СП-1М. Излучаемые радиоблоком сигналы принимаются антенным устройством стенда СП-1М и резонанс-



Рис. 4.12. Комплект измерительных приборов аэрологической станции для проверки радиозондов типа РКЗ (КИПАС).

1 — запросчик З-2М, 2 — частотомер ЧЗ-33, 3 — резонансный частотомер ЧЗ-9А, 4 — стенд СП-1М, 5 — радиоблок РКЗ, 6 — подставка для радиозонда, 7 — осциллограф С1-54, 8 — стенд для формовки заливки батарей СФ-1, 9 — переключатель ПР-1, 10 — ювета для заливки батарей.

ным частотомером ЧЗ-9А. После установки питающих напряжений на стенде проверяется величина потребляемого радиоблоком анодного тока, который должен быть в пределах 10—25 мА. С помощью резонансного частотомера ЧЗ-9А производится измерение несущей частоты, которая должна быть в пределах 1782 ± 8 МГц. Проверка частоты модулятора 800 кГц при работе с комплектами КИПАС-1 и КИПАС-1М осуществляется по-разному; в КИПАС-1 используется генератор Г4-18А, а в КИПАС-1М — частотомер ЧЗ-33. Отсчет частоты производится на шкале генератора, либо по индикатору частотомера. Ответный сигнал радиоблока возникает в ответ на запросный импульс запросчика З-2М. Ответный сигнал проявляется на экране осциллографа С1-54 в виде некоторого превышения над общим уровнем «суперных шумов» с более яркой вершиной; за изображением ответа следует пауза в виде темной вертикальной полоски с четко различимыми краями. Для проверки измерительных цепей радиозонд подключается к переключателю ПР-1, с помощью которого проверяются частоты $f_{оп}$, f_t , f_u ; значения частот отсчитываются на частотомере.

Сборка радиозонда производится на специальной подставке (рис. 4.13), последовательность сборки подробно описана в Наставлении. Зимой при температуре ниже -10°C узел влажности в кожух радиозонда не вставляют, его выносят в будку за 1 ч до выпуска и подключают к радиозонду непосредственно перед проверкой. Схема подключения измерительных узлов

к радиоблоку показана на рис. 4.14. Там, где важно обеспечить определенный порядок соединения, сделана маркировка, в этом случае вилку или разъем надо подключать в таком направлении, чтобы точки (красная или черная) были обращены друг к другу.

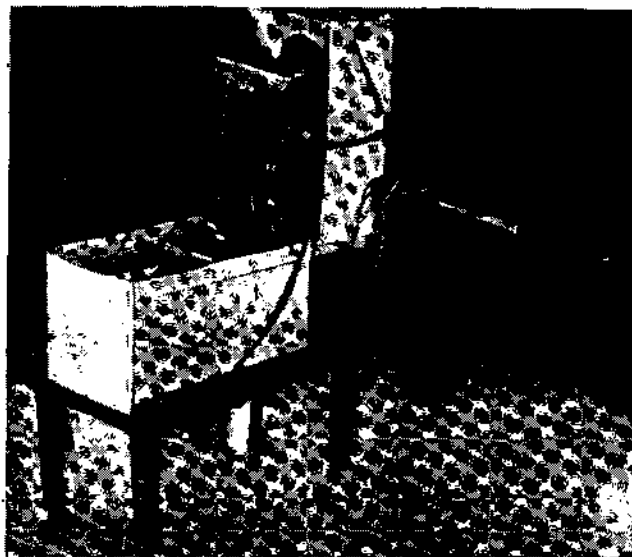


Рис. 4.13. Собранный на подставке радиозонд.

Перед сборкой радиозонда РКЗ-5 проводится проверка электромеханического коммутатора. При внешнем осмотре нужно убедиться в отсутствии повреждений, проверить положение осей редуктора и расправить провода таким образом, чтобы они не мешали движению ползунка по ламелям.

Потребляемый микроэлектродвигателем коммутатора ток не должен превышать 90 мА. Микроэлектродвигатель должен обладать самопуском, т. е. начинать вращение сразу с момента подключения питания к двигателю. При включенном моторе с помощью секундомера проверяют время полного оборота подвижного контакта, которое должно быть в пределах 1,5—3,5 мин; в этом случае обеспечивается оптимальное время передачи одной метеорологической величины 20—50 с. Схема электромеханического коммутатора показана на рис. 4.15. Порядок сборки радиозонда РКЗ-5 определяется монтажной схемой (рис. 4.16). В данном случае также важно соблюдать маркировку и соединять только одноцветные штекеры и гнезда.

Подготовленный и собранный радиозонд выносят в аэрологическую будку для контрольной поверки (рис. 4.17). Аэроло-

гическая будка обычно больше, чем метеорологическая, и обязательно оборудована вентиляционной установкой.

Контрольная поверка радиозонда производится с целью определения его годности для зондирования атмосферы, поскольку условия транспортировки или неправильное хра-

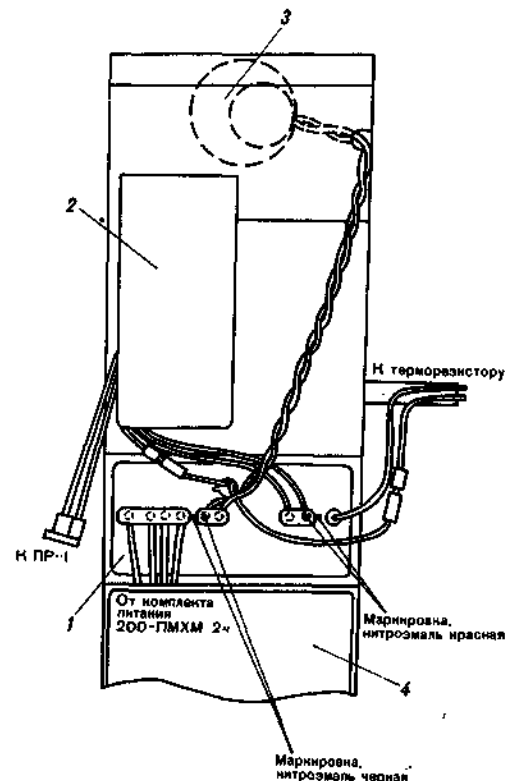


Рис. 4.14. Схема электрических соединений узлов радиозонда РКЗ-2.

1 — радиоблок; 2 — баропереключатель; 3 — узел влажности; 4 — комплект питания 200-ПМХМ-24.

нение могут привести к нарушению точностных характеристик радиозонда. Контрольная поверка обязательно производится в полном комплекте, радиозонд проверяется с той батареей, с которой будет выпущен в полет. Для обеспечения нормальной работы радиоблока необходимо строго придерживаться рекомендаций по подготовке комплекта питания. Батарея заливается водой, после слива воды формируется на стенде СФ-1 до минимальных напряжений. Подключение ее к радиозонду производится за 10—15 мин до начала поверки.

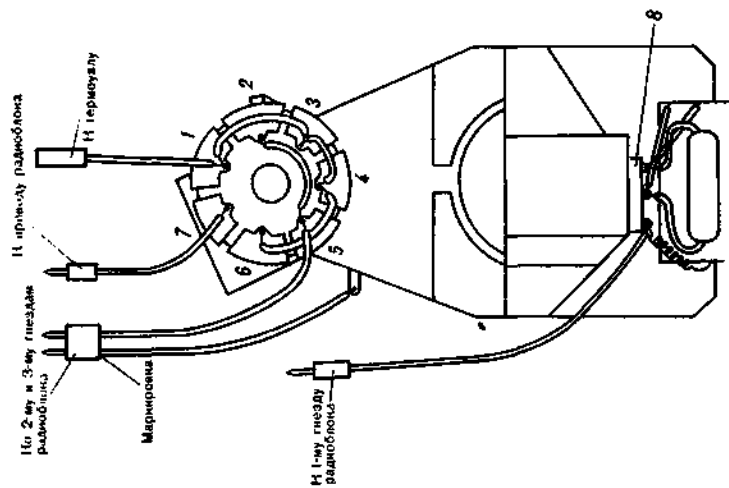


Рис. 4.15. Схема электромеханического коммутатора радиозонда РКЗ-5.

1, 2, 4, 6 — клеммы подключения термодатчика;
3, 5 — клеммы подключения узла влажности;
7 — клеммы подключения опорного сопротивления;
8 — микроэлектродвигатель.

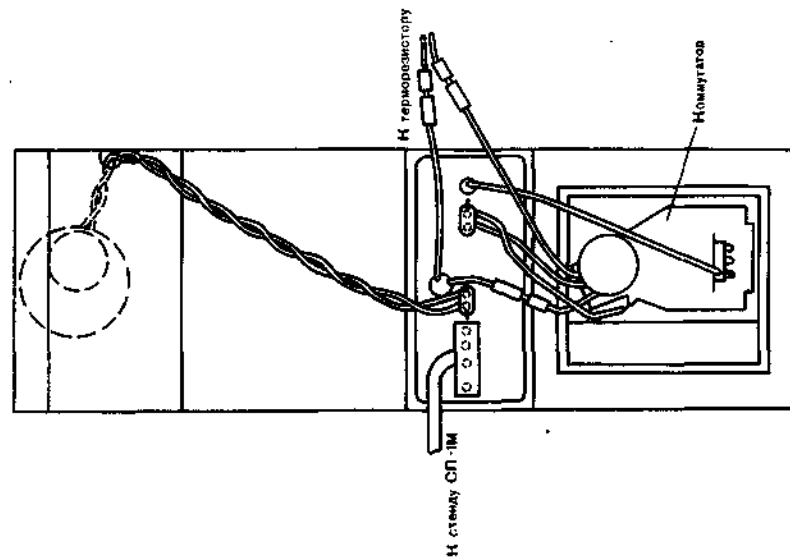


Рис. 4.16. Монтажная схема радиозонда РКЗ-5.

Для переключения измерительных узлов радиозонда в будке и подключения контрольных сопротивлений к радиоблоку при контрольной поверке используется переключатель ПР-1, который может быть дистанционным (пульт управления находится в РЛС).

Поверка радиозонда в будке проводится в два этапа: вначале по контрольным сопротивлениям 20 и 200 кОм проверяется



Рис. 4.17. Радиозонд РКЗ-5 в будке.

только радиоблок, затем по температуре и влажности — радиозонд.

В качестве образцового прибора для измерений температуры и влажности применяется аспирационный психрометр. При температуре ниже -10°C показания радиозонда по влажности сравнивают с показаниями волосного гигрометра.

Контрольные сопротивления (КС) 20 и 200 кОм соответствуют разным участкам диапазона температуры, таким образом, проверяется сохранность градуировки радиоблока практически по всей шкале. При контрольной поверке радиозонда необходимо выполнять следующие условия:

— отсчеты показаний радиозонда по температуре и влажно-

сти производить примерно через 10 мин после начала его вентиляции в будке;

— узел влажности при отрицательной температуре до начала контрольной поверки должен находиться в будке не менее 1 ч;

— смачивание термометра аспирационного психрометра при положительной температуре производить за 4 мин, при отрицательной — за 30 мин до отсчетов;

— завод пружины или включение электромотора аспиратора психрометра производить за 4 мин до отсчета;

— отсчет показаний аспирационного психрометра и гигрометра производить сразу после снятия показаний радиозонда.

Обработку ленты РЛС с записью сигналов радиозонда производят в такой последовательности:

— проверяют согласованность показаний стрелочных индикаторов с данными, напечатанными на ленте. Расхождения не должны превышать 1 Гц;

— проверяют стабильность опорной частоты. Отсчеты между соседними циклами не должны отличаться более чем на 5 Гц, в одном цикле — более чем на 2 Гц. В противном случае необходимо дать возможность батарее питания доформоваться и повторить выдержку.

Рассчитывают отношения частот f_{20} , f_{200} , f_u , f_t к опорной частоте:

$$Y_{20} = \frac{f_{20}}{f_{оп}}, \quad Y_{200} = \frac{f_{200}}{f_{оп}},$$

$$Y_u = \frac{f_u}{f_{оп}}, \quad Y_t = \frac{f_t}{f_{оп}}.$$

Эти вычисления производят с помощью планшета А-63 или логарифмической линейки длиной 50 см. Точность расчета 0,001. Значения f_{20} , f_{200} , f_u , $f_{оп}$ вычисляют, как средние в цикле измерений.

По градуировочному графику радиозонда определяют значения температуры и влажности, соответствующие вычисленным отношениям частот. По этому же графику определяют значения температуры для Y_{20} и Y_{200} , записанные на градуировочном графике радиозонда по температуре. Приняты следующие обозначения: $t_{20\text{ зав}}$ и $t_{200\text{ зав}}$ — значения температуры, соответствующие Y_{20} и Y_{200} , записанным на градуировочном графике радиозонда (т. е. заводские), t_{20} и t_{200} — значения температуры, соответствующие Y_{20} и Y_{200} , полученным при контрольной поверке; $t_{p/3}$ и $u_{p/3}$ — значения температуры и влажности, соответствующие отношениям Y_t и Y_u . Определяют расхождения показаний радиозонда с данными заводской поверки и показаниями

психрометра. Для этого вычисляют Δt_{20} , Δt_{200} , $\delta t_{КС}$, $\Delta t_{ср}$, Δt_1 , Δt_2 , Δu , где

$$\begin{aligned} \Delta t_{20} &= t_{20\text{ зав}} - t_{20}, \\ \Delta t_{200} &= t_{200\text{ зав}} - t_{200}, \\ \delta t_{КС} &= \Delta t_{20} - \Delta t_{200}, \\ \Delta t_{ср} &= \frac{\Delta t_{20} + \Delta t_{200}}{2}, \end{aligned}$$

(4.1)

$$\Delta t_1 = t_{\text{психр}} - t_{p/3},$$

$$\Delta t_1 = \Delta t_1 - \Delta t_{20},$$

$$\Delta t_2 = \Delta t_1 - \Delta t_{200},$$

$$\Delta u = u_{\text{психр}} - u_{p/3}$$

($t_{\text{психр}}$ и $u_{\text{психр}}$ — показания психрометра).

Радиозонд годен для зондирования при следующих условиях:

$$\text{а) } |\Delta t_{20}| \leq 2^\circ\text{C};$$

$$|\Delta t_{200}| \leq 2^\circ\text{C};$$

$$\text{б) } |\Delta t_1| \leq 1^\circ\text{C};$$

$$|\Delta t_2| \leq 1^\circ\text{C};$$

$$\text{в) } |\Delta u| \leq 20\%.$$

$$\delta t_{КС} = |\Delta t_{20} - \Delta t_{200}| \leq 0,6^\circ\text{C};$$

Если радиозонд не удовлетворяет всем условиям «а» или одному из них, то бракуется радиоблок зонда; если условиям «б» — бракуется узел температуры, если условиям «в» — бракуется узел влажности. Следует иметь в виду, что в тех случаях, когда бракуется узел температуры или узел влажности, его можно заменить соответствующим датчиком от радиозонда, у которого забракован радиоблок. В этом случае на градуировочном графике температуры или влажности выпускаемого радиозонда строится новая кривая: значениям отношений частот контрольных сопротивлений, показанных на графике, должны соответствовать новые значения температуры или влажности, определенные по градуировочному графику забракованного радиоблока.

Результаты контрольной поверки заносятся в таблицу обработки данных зондирования ТАЭ-46.

Величина $\Delta t_{ср}$ является поправкой к отсчетам значений температуры по заводскому градуировочному графику при обработке сигналов температуры радиозонда. Эта величина прибав-

ляется к значениям температуры, отсчитанным по графику; следовательно, если поправка имеет знак минус, значения температуры после введения поправки станут меньше, если знак плюс — больше. Поправку вводят, если ее абсолютное значение больше $0,5^{\circ}\text{C}$.

Величина Δt является поправкой к отсчету значений влажности по заводскому градуировочному графику. Поправку вводят, если ее абсолютное значение больше 1%.

Если радиозонд годен к выпуску, оператор сообщает об этом технику. Техник отключает переключатель ПР-1, выдвигает кронштейн термоузла так, чтобы язычок скобы попал в отверстие кронштейна, отрезает номерной лепесток (шпильдик) от терморезистора, подключает термоузел к радиоблоку, опускает арретиром стрелку на шкалу баропереключателя. Проверяет работу радиозонда с баропереключателем путем перемещения вручную стрелки по шкале: должны быть слышны щелчки срабатывания реле радиоблока. После этого укладывает все соединительные провода аккуратно в кожу радиозонда в стороне от баропереключателя таким образом, чтобы они не мешали стрелке баропереключателя свободно перемещаться по шкале. Закрывает и завязывает крышку радиозонда. Козырек устанавливает параллельно плоскости крышки радиозонда.

Для подъема радиозондов РКЗ-2 и РКЗ-5 обычно используются оболочки № 150 и 200 или комбинации оболочек (200 + 100 или 200 + 150 и 150 + 100). Норма наполнения оболочек в среднем составляет 2800 г и увеличивается при плохой погоде. Годный по данным контрольной проверки радиозонд подвешивают к наполненной водородом оболочке и выпускают в полет. Обычная длина подвеса составляет 10 м, но при больших высотах солнца для избежания затенения радиозонда оболочкой длина подвеса должна быть 30 м.

Сразу после выпуска прибора производятся метеорологические наблюдения, результаты которых записываются в графу таблицы ТАЭ-46 «Наблюдения в момент выпуска».

Выпуски радиозондов производятся два или четыре раза в сутки в стандартные сроки (по московскому времени): 2 ч 30 мин, 8 ч 30 мин, 14 ч 30 мин, 20 ч 30 мин. Допускаемое отклонение от срока ± 5 мин.

4.3.5. Прием и обработка сигналов радиозонда

В процессе зондирования атмосферы данные радиолокационных наблюдений за радиозондом и сведения о частотах (f_1 , f_u и $f_{оп}$) печатаются на ленте РЛС (рис. 4.18).

Группа цифр у левого края ленты (первый столбец) означает время, прошедшее с момента выпуска радиозонда. Минус (—) рядом с последней цифрой этой группы означает, что от-

печатано целое число минут, знак плюс (+) означает, что к отпечатанному числу минут надо прибавить 30 с.

Вторая группа цифр означает величину угла места (вертикального угла) в делениях угломера. Одно большое деление угломера равно 6° . Первая цифра означает десятки, вторая — единицы больших делений угломера, третья — десятки малых делений угломера. Единицы малых делений угломера определяются по расстоянию между левой базисной отметкой и штрихом, отпечатанным регистрирующей системой при пеленге радиозонда (штрих между базисными отметками). Базисные отметки и штрихи регистрации единиц малых делений угломера печатаются справа от цифровой группы. Расстояние между базисными отметками равно 10 мм, т. е. 1 мм соответствует одному малому делению угломера (0—01 д. у.).

Третья группа цифр означает величину азимута радиозонда в делениях угломера. Данные азимута регистрируются так же, как данные угла места.

Четвертая группа цифр означает величину наклонной дальности радиозонда в сотнях метров. Десятки метров определяются по расстоянию между штрихом, отпечатанным регистрирующей системой при пеленге радиозонда, и левой базисной отметкой; 1 мм расстояния соответствует 10 м.

Данные о времени полета, азимуте, угле места и наклонной дальности печатаются с интервалом 30 с. Сведения с частоты температуры, влажности и опорной частоты печатаются в правой части ленты.

Пятая группа цифр означает тысячи и сотни частоты. Значения десятков и единиц частоты определяются по расстоянию между левой базисной линией и двойными штрихами, отпечатанными между базисными линиями. Расстояние между левой и правой базисными линиями равно 100 мм и соответствует 100 пауз/с (Гц); 1 мм соответствует 1 Гц.

В целях распознавания частот температуры, влажности и опорной частоты на ленте регистрации в радиозонде установлены различные диапазоны их изменений: $f_{оп}$ — от 2000 до 2200 пауз/с, f_1 — от 100 до 1700 пауз/с, f_u — от 1500 до 2000 пауз/с.

На рис. 4.19 показана лента регистрации сигналов радиозонда РКЗ-5. При проведении кривых изменения частот температуры и влажности необходимо иметь в виду, что радиолокационная станция «Метеорит-2» печатает только достоверные (подтвержденные вторичным счетом) значения частот температуры, влажности и опорной частоты. «Выскакивающие» точки на границах смены регистрации различных элементов отсутствуют. Тысячи и сотни пауз/с печатаются только в случае их изменения.

Радиозонд РКЗ-5 имеет меньшую по сравнению с радиозондом РКЗ-2 чувствительность, поэтому одинаковое изменение

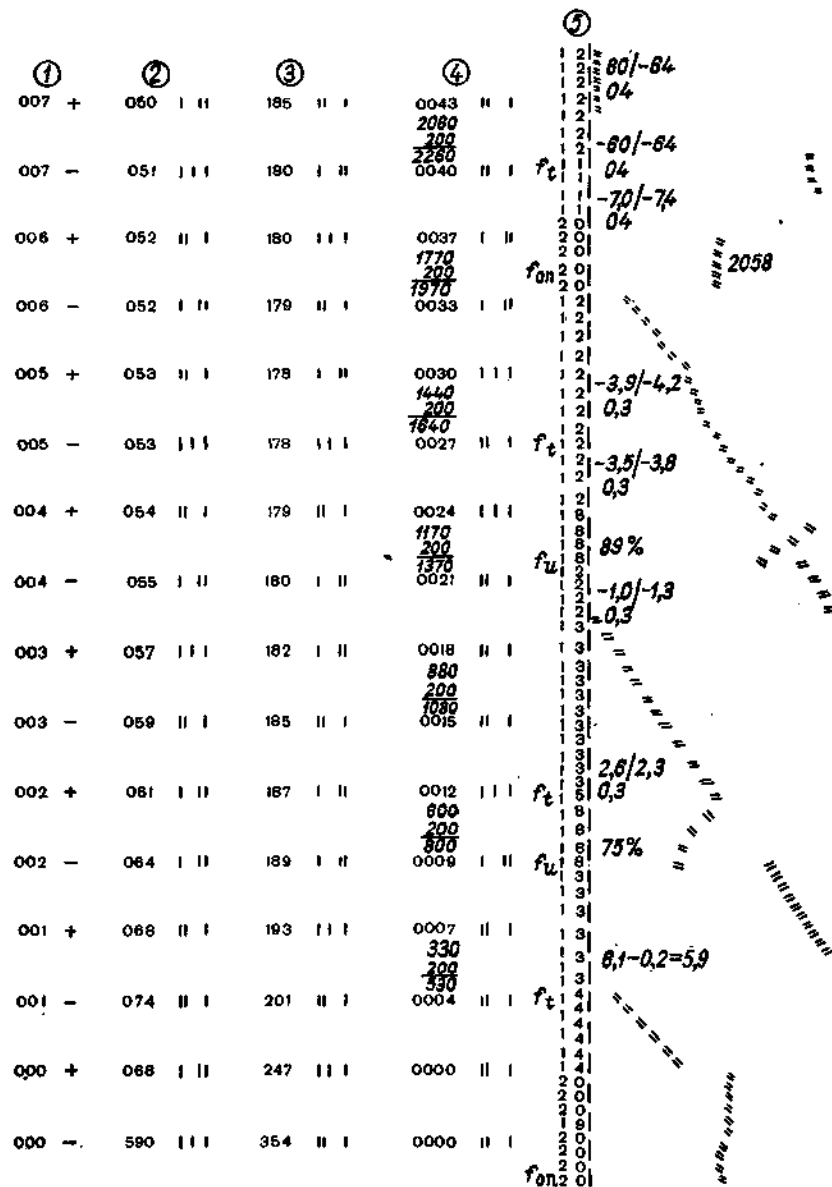


Рис. 4.18. Лента регистрации сигналов радиозонда РКЗ-2, принятых РЛС «Метеорит».

градиента метеоэлемента при измерении радиозондом РКЗ-5 будет характеризоваться меньшим изменением наклона (меньшим изломом) кривой частоты температуры или влажности, чем при измерении радиозондом РКЗ-2. В связи с этим в обра-

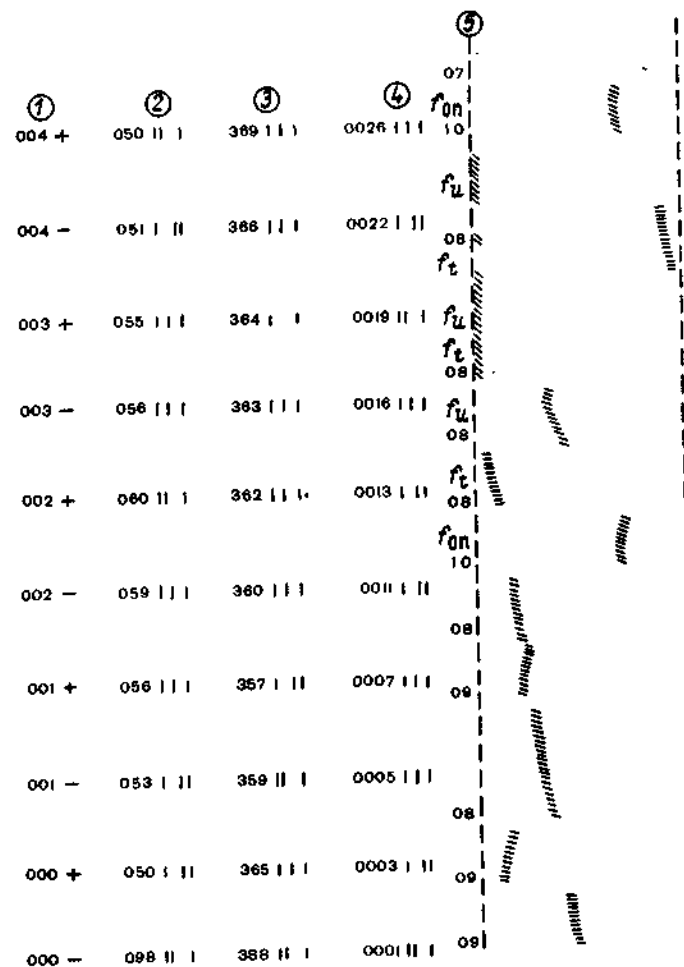


Рис. 4.19. Лента регистрации сигналов радиозонда РКЗ-5, принятых РЛС «Метеорит-2».

ботку необходимо включать все точки излома кривой. Точки излома рекомендуется выявлять с помощью линейки. Дополнительные точки включают в обработку с таким расчетом, чтобы в тропосфере обрабатывались точки не реже чем через 1,5 мин, а в стратосфере — не реже чем через 2 мин.

При обработке сигналов влажности, если точки излома кривой частоты влажности наблюдаются реже чем по одной за время полного оборота коммутатора, необходимо включить в обработку дополнительные точки таким расчетом, чтобы за период каждого оборота коммутатора было обработано по одной точке.

При изменении частоты влажности менее чем на 10 Гц за время одного оборота коммутатора разрешается включать в обработку по одной точке за период двух оборотов коммутатора.

Целью обработки результатов подъема радиозонда является определение вертикальных изменений метеорологических величин (температуры, давления, влажности, направления и скорости ветра) в свободной атмосфере.

Обработка делится на два основных этапа: 1) расшифровка сигналов радиозонда, зарегистрированных радиолокационной станцией; 2) определение и вычисление значений метеорологических величин на различных уровнях.

Обработка производится в следующем порядке.

Вычисляют высоты подъема радиозонда по величине наклонной дальности и углу места. Полученные высоты наносят на график обработки сигналов радиозонда по времени (рис. 4.20). Затем определяют (расшифровывают) значения температуры и влажности для обрабатываемых точек на ленте регистрации. Помимо поправки $\Delta t_{\text{ср}}$ в дневное время в значения температуры вводятся радиационные поправки. Исправленные значения температуры и влажности также наносят на график обработки во времени (рис. 4.20).

Высоту подъема радиозонда над уровнем моря вычисляют по формуле

$$H_{\text{ур. м}} = H_{\text{р/л}} + \Delta H_{\text{рефр}} + H_{\text{бар}} + H_{\text{ант.}}$$

где $H_{\text{р/л}} = D \sin \delta$ — высота подъема радиозонда по радиолокационным данным в метрах (D — наклонная дальность в метрах, δ — угол места в градусах); $\Delta H_{\text{рефр}}$ — суммарная поправка на кривизну Земли и рефракцию радиоволн в метрах; $H_{\text{ант.}}$ — превышение антенной колонки РЛС «Метеорит» над нулем шкалы барометра (учитывается при 10 м и более) в метрах; $H_{\text{бар}}$ — высота нуля шкалы барометра над уровнем моря в метрах. Высота нуля шкалы барометра записывается в технической документации РЛС и используется при обработке данных подъемов радиозондов. Вычисление $H_{\text{р/л}}$ производят с помощью планшета А-63 или большой логарифмической линейки длиной 50 см. При необходимости угол места переводят из делений угломера в градусы с помощью таблиц, приведенных в Наставлении.

Высоту вычисляют для каждой минуты до 10-й минуты подъема, с 10-й минуты и до конца — для каждой второй ми-

нуты, т. е. для 12-й, 14-й, 16-й и т. д. Точность вычисления высоты: 10 м до 10 км, 20 м от 10 до 20 км, 40 м — более 20 км.

Поправку на кривизну Земли и рефракцию радиоволн вводят при наклонной дальности более 20 км. Поправка имеет положительный знак и прибавляется к $H_{\text{р/л}}$; таблицы с поправ-

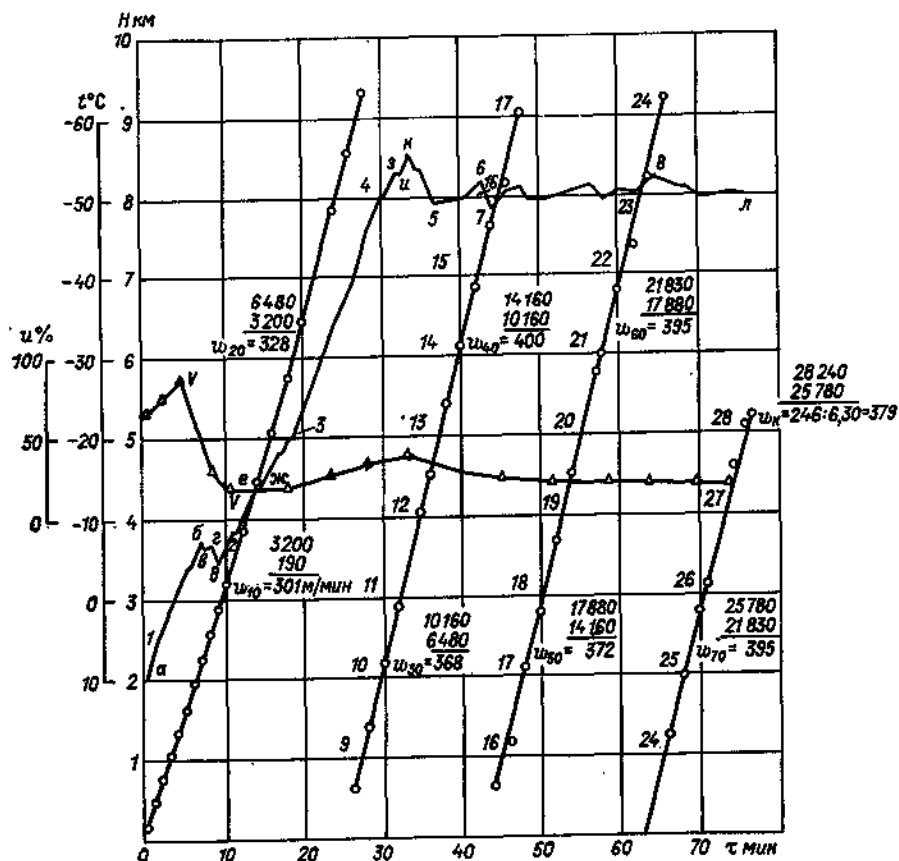


Рис. 4.20. График обработки радиозонда типа РКЗ.

ками приводятся в Наставлении, ч. 3а. Для промежуточных значений вертикального угла и наклонной дальности поправку определяют путем линейной интерполяции с точностью до 10 м.

Расшифровку сигналов температуры и влажности производят следующим образом.

На ленте регистрации по точкам, соответствующим частотам температуры и влажности, проводят кривую изменения

частоты температуры во времени и кривую изменения частоты влажности. На участках перерывов передачи частоты температуры кривую интерполируют. На проведенных кривых намечают точки для обработки. Особое внимание обращают на те участки регистрации частоты температуры и влажности, в которых изменяется наклон кривой (точки излома).

При обработке сигналов температуры в тропосфере обязательно учитывают границы участков с постоянными или увеличивающимися во времени значениями частоты температуры (границы слоев изотермии или инверсии) независимо от продолжительности регистрации частоты на этих участках. Если точек для обработки мало, в обработку включают дополнительные точки с таким расчетом, чтобы в обработку сигналов температуры были взяты точки с интервалами не менее чем через 1,5 мин.

В стратосфере разрешается увеличить интервалы между обрабатываемыми точками температуры до 2 мин.

Если на кривой частоты влажности нет изломов, в обработку сигналов влажности включают средние точки в каждом цикле регистрации частоты.

Для обрабатываемых точек температуры и влажности вычисляют значения $Y_t = f_t / f_{оп}$ и $Y_u = f_u / f_{оп}$, где f_t и f_u — значения частот температуры и влажности для обрабатываемой точки, а $f_{оп}$ — значение опорной частоты для момента обрабатываемого сигнала.

Значения f_t и f_u рассчитывают с точностью до 1 Гц. Значения отношений частот Y_t и Y_u вычисляют с точностью до 0,001 с помощью планшета А-63 или логарифмической линейки длиной 50 см.

Значение опорной частоты для обрабатываемой точки определяют линейной интерполяцией между значениями опорной частоты в циклах измерений до и после обрабатываемого сигнала температуры или влажности. Опорную частоту для цикла измерений определяют как среднее арифметическое из достоверно зарегистрированных значений в цикле. Интерполяцию опорной частоты производят с точностью до 1 Гц для температурных частот, превышающих 1500 Гц, с точностью до 2 Гц — в диапазоне температурных частот 1500—800 Гц, с точностью до 5 Гц — для частот, меньших 800 Гц. При обработке сигналов влажности допустимая ошибка интерполяции опорной частоты составляет 5 Гц.

Обработку температуры и влажности в слое от момента выпуска до момента печати первой опорной частоты следует производить по значению первой опорной частоты, зарегистрированному после выпуска радиозонда.

По градуировочным графикам определяют температуру и влажность для каждой обрабатываемой точки по значениям Y_t и Y_u .

Если согласно результатам контрольной поверки необходима корректировка градуировочных данных радиозонда, к отсчетам температуры по заводскому графику прибавляют поправку $\Delta t_{гр}$.

Изменение градуировочных данных узла влажности учитывают прибавлением к отсчетам по заводскому графику поправки Δu .

Значения f_t , f_u , $f_{оп}$, Y_t , Y_u и значения температуры и влажности, им соответствующие, записывают на ленте регистрации рядом с обрабатываемой точкой. Все значения температуры и влажности наносят на график обработки данных радиозонда по времени (рис. 4.20).

Скорость и направление ветра вычисляются по угловым координатам и высоте подъема так, как это указано во второй главе.

4.3.6. Получение результатов зондирования и составление аэрологической телеграммы

Результаты зондирования должны в конечном виде содержать всю информацию, необходимую прежде всего для построения вертикальных профилей метеорологических величин, а также для обеспечения различных потребителей аэрологической информацией. Обычно различают три группы данных радиозондирования:

1) данные на стандартных барических уровнях. Стандартными являются барические уровни 1000, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 и 5 мбар;

2) данные на стандартных геометрических высотах над поверхностью земли (0,3; 0,6; 0,9 км) и над уровнем моря (0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0 км и далее через 1 км до конца подъема радиозонда);

3) данные на уровнях особых точек в вертикальном распределении температуры, влажности, скорости и направления ветра.

Данные на стандартных высотах и изобарических поверхностях используются для режимной обработки (вычисление средних характеристик, сравнение с данными других станций или с другими параметрами, нанесение на синоптические карты и др.). Особыми точками считаются точки, в которых отмечается резкое изменение в ходе вертикального профиля температуры, влажности или ветра.

Значения температуры и относительной влажности на стандартных высотах, изобарических поверхностях, уровнях особых точек, а также высоты особых точек определяют путем снятия синхронных значений высоты подъема радиозонда, температуры и влажности с графика обработки и записывают в таблицу

ТАЭ-46. Затем в этой таблице вычисляют давление и дефицит точки росы.

Исходными данными для вычисления давления на стандартных высотах являются средняя виртуальная температура слоя, давление на нижней границе этого слоя и разность высот верхней и нижней границ слоя.

Особыми точками температуры являются: уровень станции, конечная высота зондирования по температуре, нижняя и верхняя границы слоев температурной инверсии в тропосфере, нижняя и верхняя границы слоев изотермии в тропосфере, продолжительность регистрации которых превышает 30 с, уровни резких изломов кривой температуры. К резким изломам кривой температуры относят также границы слоев изотермии в тропосфере, продолжительность регистрации которых 30 с и меньше. Важной особой точкой является уровень тропопаузы.

Особыми точками относительной влажности являются границы слоя (или уровень) со значением относительной влажности 100% и уровни резких изломов кривой относительной влажности.

Тропопауза обычно проявляется в резком изменении вертикального профиля температуры: уменьшение вертикального градиента, слой изотермии или слой инверсии. Полярная тропопауза чаще представляет собой уровень уменьшения вертикального градиента температуры, тропическая — инверсию температуры. В умеренных широтах нередко наблюдаются обе тропопаузы: полярная на высоте 7—10 км и тропическая на высоте 15—17 км.

В основу критерия выбора особых точек положена возможность восстановления по данным особых точек, включаемых в телеграмму, кривой температуры с точностью до 1°С в тропосфере и до 2°С в стратосфере, кривой влажности с точностью до 15%.

Тропопауза определяется как первый уровень, лежащий не ниже изобарической поверхности 500 мбар, между которым и всеми более высокими уровнями особых точек в слое толщиной не менее 2 км средний вертикальный градиент температуры не превышает 2°С/км.

Если выше этой тропопаузы имеется слой толщиной не менее 1 км, между нижней границей которого и всеми более высокими уровнями особых точек средний вертикальный градиент температуры превышает 3°С/км, то выше (иногда и в пределах) этого слоя может находиться вторая тропопауза. Она определяется так же, как и первая тропопауза.

Особыми точками по ветру являются уровни значительного изменения скорости ветра и уровни резких поворотов ветра, особые точки выбираются на графике распределения скорости и направления ветра по высоте.

Результаты температурно-ветрового зондирования записывают в таблицу ТАЭ-3 (образец 1). Запись осуществляют по уровням в порядке возрастания высоты. В таблицу ТАЭ-3 включают следующие уровни: высоту станции над уровнем моря; изобарические поверхности, входящие в телеграмму; особые точки; уровни 0,3; 0,6; 0,9 км над поверхностью земли; уровень тропопаузы; стандартные высоты; уровни максимальной скорости ветра; максимальную высоту зондирования. Уровни 0,3; 0,6; 0,9 км над поверхностью земли включаются в таблицу ТАЭ-3 с учетом высоты станции над уровнем моря. При составлении таблицы ТАЭ-3 вычисляют вертикальный градиент температуры γ и вертикальную скорость подъема радиозонда w . Для уровней, включаемых в аэрологическую телеграмму, определяют дефицит точки росы. Перед составлением телеграммы обязательно проводится критический просмотр результатов наблюдений и только после этого составляют телеграмму.

Критический просмотр результатов наблюдений перед передачей телеграммы включает в себя проверку результатов контрольной проверки радиозонда, проверку правильности обработки ленты регистрации, проверку правильности выбора особых точек и определения тропопаузы. Данные стандартных изобарических поверхностей сравниваются с результатами, полученными для них в предыдущий срок (6 или 12 ч назад) — это является дополнительным критерием правильности обработки. После проверки всех этапов обработки проверяют правильность составления телеграммы.

Помимо таблицы ТАЭ-3 результаты зондирования заносятся в таблицу ТАЭ-16, в которой информация, полученная в результате зондирования, разнесена по указанным выше группам. В настоящее время таблицы ТАЭ-16 составляются в территориальных гидрометеорологических центрах на ЭВМ по данным аэрологической телеграммы.

Аэрологическая телеграмма составляется по коду для передачи данных вертикального зондирования атмосферы КН-04, который полностью соответствует международному коду FM.36.E TEMP. В коде имеются четыре части: части А и В предусматривают кодирование данных для уровней не выше 100 мбар, части С и D — данных для уровней выше 100 мбар. Обычно части телеграммы А и В передаются раньше, до окончания приема сигналов радиозонда. Для опознавания частей кода в него введены отличительные буквы: ТТАА — часть А, ТТВВ — часть В, ТТСС и ТТDD — соответственно части С и D. После отличительных букв группой YYGGI_a передается число (YY) и время (GG), а также сведения о последней изобарической поверхности (I_a), на которой имеются данные о ветре. Третьей группой в заголовке телеграммы передается индекс станции Iiii.

ТАЭ-3

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ

Станция Долгопрудный. Тип радиозонда РКЗ-2 № р/з 702-127979 сентября 1970 г.

(число, месяц)

Время наблюдений 13 час 55 мин 14 час 25 мин
(местное ср. солнечное) (московское декретное)

Облачность и атмосферные явления	Ветер над поверхностью земли (км)					
	0.1		0.2		0.5	
	d	v	d	v	d	v
	282	05	275	06	289	08

10/10 Sc (141) 122

H	p	t	γ	u	d	v	D	w
0.104	1000							
0.19	989.8	10.0		66	248	02	6.1	
0.20	988.3	9.9		66				
0.49	954.1	6.6		70	279	07		
0.50	953.2	6.5		70	280	07		
0.55	947.5	5.9	1.13	71	286	08	4.8	
0.79	919.8	3.7		75	288	08		
1.00	896.5	1.7	0.93	79	287	08		
1.09	887.1	1.1		81	285	08		
1.428	850	-1.6		87	282	09	1.9	
1.50	842.4	-2.1	0.76	88	282	09		
1.53	839.3	-2.4		89	282	09	1.6	
2.00	790.9	-5.2	0.62	65	292	10		
2.27	764.1	-7.4	0.81	52	303	11	8.1	
2.50	741.9	-6.4	-0.43	39	311	12	11.5	
2.67	726.0	-6.7	0.18	32	310	12	14.0	
2.95	700.7	-4.5	-0.79	26	305	10	16.6	
2.957	700	-4.5		26	305	10	16.6	
3.00	696.2	-4.7		25	305	10		
3.35	665.6	-6.9		18	311	12	20.4	301
3.70	636.2	-8.4	0.52	18	316	14	20.1	

H	p	t	γ	u	d	v	D	w
4.00	612.0	-11.1	0.90	18	317	15		
4.30	588.4	-13.7	0.87	18	318	17	19.3	
4.59	566.4	-13.7	0.00	18	319	20	19.3	
5.00	536.6	-16.3	0.63	18	322	23		
5.53	500	-18.6		18	326	25	18.5	
5.93	473.6	-20.1	0.41	19	329	29	17.7	
6.00	469.2	-20.5		19	329	30		328
7.00	409.2	-27.7	0.71	23	328	32		
7.16	400	-28.5		24	327	33	14.3	
8.00	355.3	-34.8	0.71	27	326	37		
9.00	307.2	-42.5	0.77	30	328	44		
9.16	300	-43.7		30	328	44	10.6	
10.00	264.3	-49.4		33	327	43		368
10.15	258.4	-50.5	0.70	34	326	44	9.0	
10.36	250	-50.6		34	325	44	9.0	
10.53	243.7	-51.5		35	324	45		
10.87	231.2	-53.7	0.44	36	324	45	8.3	
11.00	226.6	-53.2		36	325	44		
11.07	224.3	-53.2	-0.25	36	325	44	8.3	
11.35	214.7	-54.5		37	325	44	8.0	
11.56	207.8	-55.9	0.55	36	326	41	8.3	
11.80	200	-54.2		35	327	39	10.2	
12.00	193.9	-53.7	-0.50	34	328	36		
12.90	168.8	-49.4	-0.48	31	324	23	9.8	
13.00	166.2	-49.4		30	324	22		
13.68	150	-49.7		28	317	21	10.5	
14.00	142.7	-49.9	0.05	27	316	20		400
15.00	122.4	-51.5	0.16	25	314	17		
15.26	117.7	-52.1	0.23	24	313	16	11.5	
15.78	108.8	-48.9	-0.62	23	310	14	12.3	
16.00	105.0	-49.7	0.36	23	309	13		
16.32	100	-50.7		22	307	11	12.4	
17.00	90.05	-51.2	0.15	22	300	10		
18.00	77.25	-49.8	-0.14	20	288	08		372
18.65	70	-50.2		20	271	07	13.1	
19.00	66.30	-50.5	0.07	20	262	07		
20.00	56.86	-51.2	0.07	19	256	05		
20.84	50	-51.7		19	266	04	13.3	395
21.00	48.76	-50.4	-0.08	19	268	04		
22.00	41.81	-50.6	0.02	18	238	03		
23.00	35.85	-50.7	0.01	18	224	03		
23.65	32.46	-52.3	0.25	18	229	04	13.9	
24.00	30.73	-51.9	-0.11	18	231	05		
24.16	30	-51.6		18	232	05	13.8	
25.00	26.34	-51.1	-0.08	18	238	05		
26.00	22.59	-49.8	-0.13	18	239	05		395
26.80	20	-49.9		18	223	07	14.0	
27.00	19.39	-50.0	0.02	18	218	07		
28.00	16.64	-50.0	0.00	—	—	—		
28.24	16.05	-49.9	0.04	—	—	—		379

Группы, входящие в части А и С, которые служат для передачи данных на изобарических поверхностях, построены все одинаково:

PPhhh TTT_aDD dfff

Здесь PP — отличительные цифры для стандартных изобарических поверхностей (00—1000 мбар, 85—850 мбар, 70—700 мбар и т. д.), hhh — высоты изобарических поверхностей в геопотенциальных метрах, TT — температура воздуха в целых градусах Цельсия, T_a — приближенное значение десятых долей температуры воздуха и одновременно указатель знака температуры, DD — дефицит точки росы, dd — направление ветра в десятках градусов, fff — скорость ветра в м/с.

Группы, входящие в части В и D, служат для передачи информации об особых точках температуры и влажности, эти группы включаются в телеграмму в порядке убывания давления и составляются следующим образом:

nnPPP TTT_aDD

Здесь nn — порядковый номер особой точки, PPP — давление, TTT_aDD — группа, аналогичная группе в частях А и С.

Информация об особых точках по ветру передается после отличительных цифр 2121 и строится аналогичным образом:

nnPPP dfff

В данном случае вместо температуры и дефицита точки росы дается направление и скорость ветра.

Для передачи данных о тропопаузе, которые могут включаться как в часть А, так и в часть С, имеется специальная группа:

88P_tP_tP_t T_tT_tT_tD_tD_t d_td_tf_tf_t

где 88 — отличительные цифры, P_tP_tP_t — давление на уровне тропопаузы в целых миллибарах; остальные группы аналогичны вышеперечисленным.

Для передачи данных о максимальном ветре введены группы 77P_mP_mP_m или 66P_mP_mP_m. В коде имеется еще ряд дополнительных групп, которые не являются обязательными, но могут использоваться для передачи любой дополнительной информации в тех случаях, когда возникает в ней необходимость.

В тех случаях, когда производится только радиоветроное зондирование (например, с помощью уголкового отражателя или передатчика-ответчика), информация о ветре передается по коду КН-03 (FM.32.E PILOT) для передачи данных ветро-

вого зондирования атмосферы наземными станциями. Код построен аналогично коду КН-04, за исключением, естественно, групп, включающих сведения о температуре и дефиците точки росы.

4.3.7. Комплекс ОКА-3 для централизованной автоматической обработки данных системы зондирования «Метеорит» — РКЗ

Для сокращения затрат ручного труда на обработку результатов зондирования, а также для избежания при этом субъек-

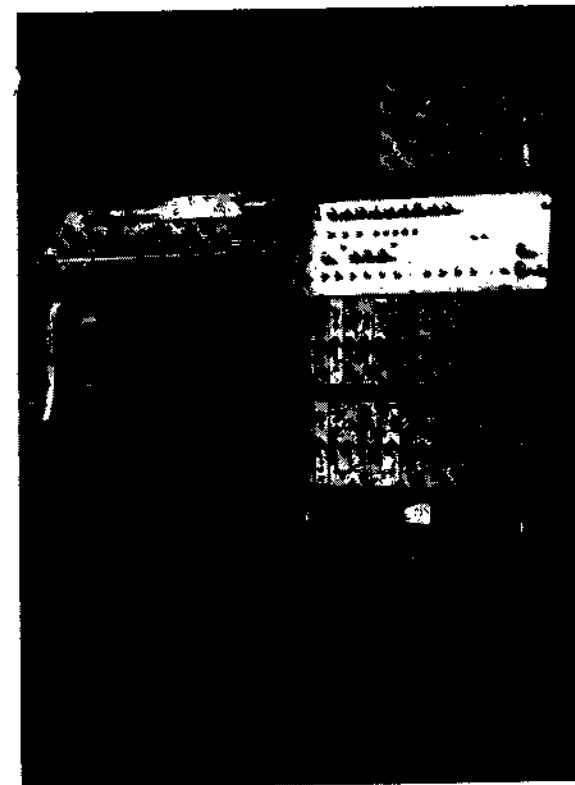


Рис. 4.21. Внешний вид комплекса ОКА-3.

ективных ошибок разработан специальный комплекс для автоматической обработки данных зондирования. Таким комплексом является комплекс ОКА-3, внешний вид которого показан на рис. 4.21.

Комплекс ОКА-3 предназначен для автоматического съема, преобразования, передачи и централизованной обработки данных, полученных в пунктах зондирования, соединенных телеграфными или цифровыми каналами связи с территориальным гидрометцентром (ТГМЦ), оснащенным цифровыми вычислительными машинами (ЭВМ) «Минск-22» или «Минск-32». Комплекс обеспечивает получение оперативной и климатологической информации в форме соответствующих таблиц выходных данных и в форме, пригодной для последующей передачи выходных данных по телеграфным или цифровым каналам связи. Комплекс обеспечивает централизованную обработку данных четырех-пяти пунктов зондирования при оснащении территориального гидрометцентра ЭВМ «Минск-22» и 12—15 пунктов при обработке на ЭВМ «Минск-32». Основным промежуточным носителем информации при передаче и хранении исходных и выходных данных комплекса является пятипозиционная перфолента (ГОСТ 1391—51).

Комплекс для централизованной автоматической обработки данных радиозондирования состоит из устройства автоматического съема и перфорации данных радиолокаторов «Метеорит» (ОКА-3) и математического обеспечения для ЭВМ «Минск-22» и «Минск-32» (ОКА-70).

Устройство ОКА-3 предназначено для преобразования в цифровой код сферических координат радиозонда (дальности, угла места и азимута) и частоты и для выдачи их на телетайп Т-51 или Т-63 в виде пятипозиционной перфоленты и ленты печати для последующей передачи по телеграфным или цифровым каналам связи и для ввода в универсальные ЭВМ «Минск-22» или «Минск-32».

Устройство ОКА-3 состоит из следующих основных блоков: преобразователя координат в цифровой код, преобразователя частоты в цифровой код, запоминающего регистра, блока управления телетайпом, блока контрольного суммирования, блока управления, телетайпа, стабилизированного выпрямителя.

Математическое обеспечение ОКА-70 предназначено для обработки на ЭВМ «Минск-22» или «Минск-32» координатно-телеметрической информации, получаемой устройством автоматического съема и перфорации данных на перфоленте в пунктах зондирования и передаваемой по телеграфным или цифровым каналам в территориальный гидрометцентр, и для получения на выходе оперативной и климатологической информации.

Математическое обеспечение комплекса состоит из

- 1) программы ОКА-70 для оперативной централизованной обработки данных от систем зондирования «Метеорит» — РКЗ;
- 2) программы ОКА-78 для климатологической обработки данных зондирования атмосферы;
- 3) вспомогательных программ записи констант пункта зондирования и записи радиационной поправки.

Оперативная обработка по программе ОКА-70 сводится к преобразованию исходной координатно-телеметрической информации в значения метеорологических величин как функций высоты, к сокращению и кодированию этих функций в виде аэрологической телеграммы по коду КН-04, передаваемой непосредственно после ее получения в прогностические центры и другим потребителям.

4.3.8. Система радиозондирования «Метеорит» — РКЗ на научно-исследовательских судах погоды

В настоящее время около двух десятков научно-исследовательских судов (НИС) флота Гидрометслужбы Советского Союза оснащены аэрологическим комплексом для температурно-ветрового зондирования атмосферы. Судовые аэрологические станции являются частью аэрологической сети. Основным разделом программы их работы является проведение стандартных наблюдений в единые синоптические сроки (00 и 12 ч гринвичского времени). Результаты этих наблюдений передаются в органы Службы прогноза погоды.

Аэрологические наблюдения, проводимые с судов, имеют большое научное значение. Изучение особенностей циркуляции атмосферы над океанами важно для правильного понимания циркуляции атмосферы в целом и улучшения качества прогноза погоды. Научной программой рейса судна определяется его маршрут, планируются серии учащенных наблюдений.

Радиозондирование производится с помощью системы «Метеорит» — РКЗ-2. При проведении наблюдений аэрологические отряды научно-исследовательских судов должны руководствоваться «Наставлением гидрометеорологическим станциям и постам», вып. 4, ч. 3а, изд. 1973 г., а также ч. 3б, изд. 1974 г.

Условия наблюдений на движущихся судах имеют ряд особенностей, которые потребовали оборудования судовых аэрологических станций дополнительными приборами и обусловили некоторые отличия в эксплуатации аэрологических приборов на судне и в методике проведения и обработки наблюдений.

К таким особенностям относится необходимость стабилизации антенны радиолокатора, использование для подъема радиозондов гелия вместо водорода, влияние режима движения судна на качество наблюдений и др.

Научно-исследовательские суда и суда погоды оснащены стационарным вариантом радиолокатора «Метеорит-Р» (ракетный вариант), который устанавливается на судне в непосредственной близости с аэрологической лабораторией. С целью избежания влияния качки на результаты измерения угловых координат радиозонда антенная колонка радиолокатора установлена на платформе стабилизированного поста, размещенного на специальном барбете (жесткое палубное сооружение

трапецидальной формы, отвечающее условиям размещения поста).

Стабилизированный пост, являющийся составной частью системы гироскопической стабилизации, предназначен для удержания антенной колонки радиолокатора при зондировании атмосферы в горизонтальном положении. Внутри барбета, на котором установлен стабилизированный пост, смонтированы узлы и блоки механического и электрического управления работой поста.

В соответствии с техническими условиями на стабилизированный пост выравнивание платформы поста при качке судна

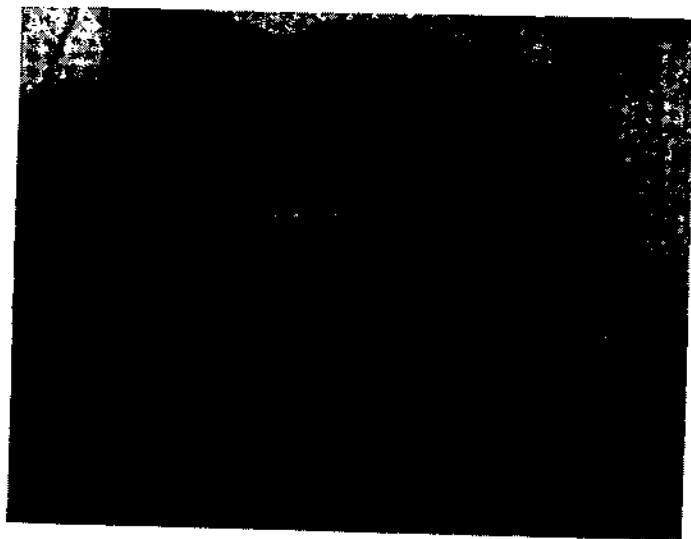


Рис. 4.22. Ветрозащита на борту НИС.

происходит плавно, без рывков. Стабилизированный пост на судне обслуживается механиком электрогруппы судна.

Подготовка радиозонда к выпуску и контрольная поверка его перед выпуском на судне производятся в обычном порядке и не отличаются от этих операций в наземных условиях. Поверка радиозонда производится в будке, прикрепленной для лучшей вентиляции к борту судна.

Добывание водорода и использование его для наполнения оболочек на судах категорически запрещено. Для наполнения оболочек используется гелий, который хранится в сжатом виде в баллонах в специальном помещении — гелиохранилище.

Для наполнения оболочки на судах используется специальная ветрозащита (рис. 4.22), которая облегчает процесс наполнения оболочки и выпуск радиозонда. Существует несколько

конструкций ветрозащит, но все они похожи. Обычно это эллипсоид, нижняя часть которого жестко закреплена на металлической раме, установленной на четырех опорах с роликами, на которых ветрозащита легко передвигается по палубе. Верхняя половина эллипсоида имеет несколько меньшие размеры и состоит из двух частей. Каркас ветрозащиты изготавливается из дюралевых труб и обтягивается тонким брезентом. Оболочка вкладывается в нижнюю половину эллипсоида, а две части

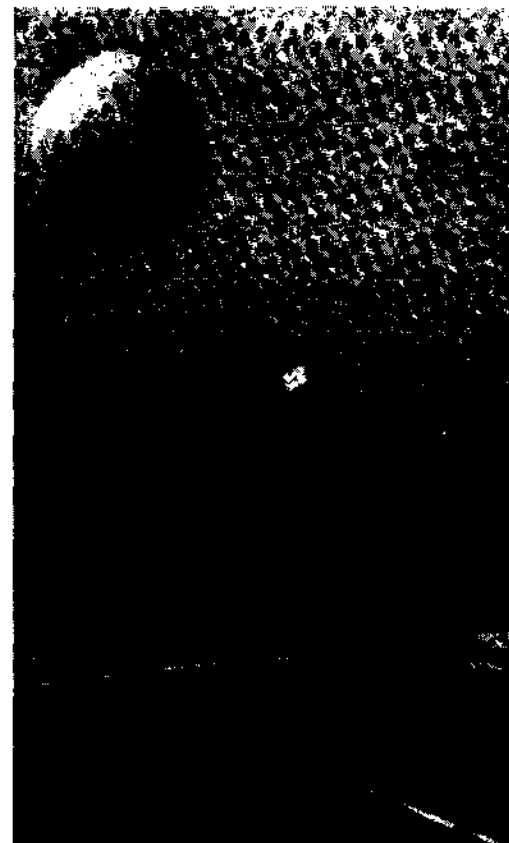


Рис. 4.23. Выпуск радиозонда с борта НИС.

верхней его половины, вращаясь вокруг длинной оси эллипсоида навстречу одна другой, закрывают внутри объема радиозондовую оболочку.

Выпуск радиозонда показан на рис. 4.23.

Прием сигналов радиозонда производится в обычном порядке, так же, как и обработка метеоданных. Специфические особенности обработки судовых радиозондовых наблюдений заключаются в правилах обработки ветровых наблюдений.

Особенностью ветровых наблюдений, проводимых на судах, является перемещение вместе с судном радиолокатора, т. е. перемещение точки отсчета координат радиозонда. Это обуславливает необходимость ориентации радиолокатора по диаметральной плоскости судна, а при вычислении скорости и направления ветра — учета скорости и направления (курса) движения судна.

Расчет ветра производится по синхронно измеренным значениям координат радиозонда, курса и скорости движения судна.

Методику обработки ветрового наблюдения с движущегося судна легко понять из рис. 4.24. Пусть точки $A_0, A_1, A_2, A_3, \dots, A_{n-1}, A_n$ изображают

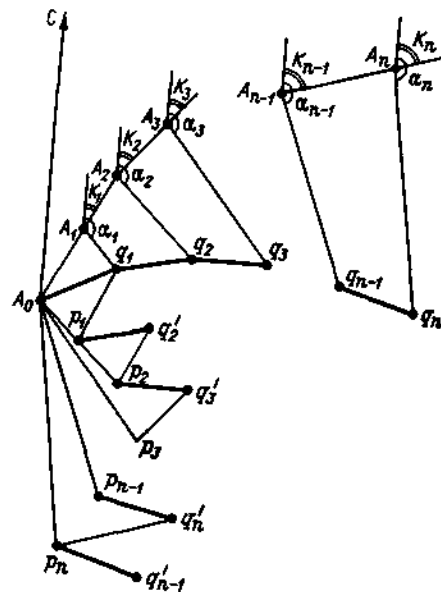


Рис. 4.24. Схема определения скорости и направления ветра при наблюдении с движущегося судна.

мированием курса судна и горизонтального угла ($\alpha_{\text{дн}}$), измеренного радиолокатором относительно диаметральной плоскости судна.

В случаях движущегося судна горизонтальные проекции радиозонда можно получить одним из следующих двух способов.

Графоаналитический способ. Построив путевую линию судна ($A_0, A_1, A_2, A_3, \dots, A_{n-1}, A_n$), последовательно от точек положения судна ($A_1, A_2, A_3, \dots, A_{n-1}, A_n$) откладывают в направлении азимутов ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_{n-1}, \alpha_n$), горизонтальные удаления радиозонда ($A_1q_1, A_2q_2, A_3q_3, \dots, A_{n-1}q_{n-1}, A_nq_n$), которые вычисляют по измеренным значениям наклонной дальности D и вертикального угла δ по формуле

$$L = D \cos \delta,$$

где L — горизонтальное удаление.

По отрезкам $A_0q_1, q_1q_2, q_2q_3, \dots, q_{n-1}q_n$ определяют скорость и направление ветра в соответствующих слоях.

Графический способ. От точки A_0 — места выпуска радиозонда — откладывают в направлении азимутов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_{n-1}, \alpha_n$ горизонтальные удаления радиозонда, которые на рис. 4.24 показаны отрезками $A_0p_1, A_0p_2, A_0p_3, \dots, A_0p_{n-1}, A_0p_n$ (они равны и параллельны отрезкам $A_1q_1, A_2q_2, A_3q_3, \dots, A_{n-1}q_{n-1}, A_nq_n$ соответственно). Точки $p_1, p_2, p_3, \dots, p_{n-1}, p_n$ являются фиктивными (вспомогательными) проекциями радиозонда. Они не соответствуют истинным проекциям, так как нанесены по данным измерений азимутов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_{n-1}, \alpha_n$, вертикального угла и наклонной дальности, произведенных с движущегося судна, но в предположении, что судно стоит в точке A_0 . Чтобы получить горизонтальные смещения радиозонда за обрабатываемый интервал времени, достаточно от фиктивных проекций в направлении курса судна отложить отрезки $p_1q_1, p_2q_2, p_3q_3, \dots, p_{n-1}q_{n-1}, p_nq_n$, изображающие путь судна за соответствующий интервал времени (отрезки $p_1q_1, p_2q_2, p_3q_3, \dots, p_{n-1}q_{n-1}, p_nq_n$ равны и параллельны отрезкам $A_0A_1, A_1A_2, A_2A_3, \dots, A_{n-1}A_n$).

Как следует из построения, полученные отрезки $A_0q_1, p_1q_2, p_2q_3, \dots, p_{n-1}q_n$ равны и параллельны соответствующим горизонтальным смещениям радиозонда $A_0q_1, q_1q_2, q_2q_3, \dots, q_{n-1}q_n$ (первые отрезки A_0q_1 совпадают). По ним и определяют скорость и направление ветра.

В настоящее время разработаны программы обработки ветровых данных на ЭВМ для научно-исследовательских судов.

Составление таблицы результатов зондирования ТАЭ-3 производится в обычном порядке (см. раздел 4.3.6). Аэрологическая телеграмма на НИС составляется по коду КН-04, по той его части, которая предназначена для передачи данных с борта судна (FM.36. E TEMP, SHIP). В этой телеграмме вместо групп ТТАА, ТТБВ, ТТСС и ТТДД передаются группы UUAA, UUBB, UUCS и UUDD. Вместо индекса станции IIII передаются координаты судна:

99L₁L₂L₃, где 99 — отличительные цифры судовой станции, L₁L₂L₃ — географическая широта в градусах с десятичными долями.

Q₀L₀L₁L₂L₃, где Q₀ — квадрант (четвертая часть земного шара), кодируется по таблице, приведенной в коде, L₀L₁L₂L₃ — географическая долгота в градусах с десятичными долями.

MMMU_LU_L, где MMM — номер квадранта на земном шаре, в котором находится корабль (определяется по таблице кода), U_L — количество единиц градусов широты, U_L — количество единиц градусов долготы. Эта группа контролирует содержание первых двух.

4.4. Обзор некоторых зарубежных систем радиозондирования

Выше мы уже говорили о том, что из большого числа конструкций радиозондов, создаваемых в различных странах, в настоящее время в мире используется всего несколько. Практически все зарубежные радиозонды, описанные в учебнике «Аэрология» В. А. Белинского и В. А. Побияхо, сейчас не используются. Так, в международном Атлантическом тропическом эксперименте в 1974 г. (АТЭП-74), в котором участвовало около 70 стран, использовались всего четыре системы радиозондирования. На советских судах — системы «Метеорит» — РКЗ-2 (10 судов) и радиозонды А-22-IV (2 судна), на судах Франции использовалась финская система радиозондирования «Кора» (3 судна), а на всех остальных иностранных судах (США, Канада, Англия, Мексика, Бразилия, ФРГ и др.) —

американская система радиозондирования. В странах социалистического содружества так же, как и в ряде других стран, получающих помощь от СССР, используются советские системы радиозондирования, в капиталистических странах, во всяком случае в большинстве их, используется американская система радиозондирования. В Западной Европе популярна финская система радиозондирования. Ниже дается краткое описание радиозондов США и Финляндии.

4.4.1. Радиозонды США

Американские радиозонды (стандарт бюро погоды США) являются почти полностью электрическими. На протяжении последних двух-трех десятков лет при модернизациях радиозондов чувствительные элементы практически не меняются. Для измерения давления в американских приборах применяется мембранная коробка. Для измерения температуры служит полупроводниковый терморезистор с антирадиационным покрытием. Измерение влажности производится с помощью электролитического гигрометра. Узел давления является одновременно переключателем. Узлы температуры и влажности и два опорных сопротивления попеременно управляют частотой блокинг-генератора, который модулирует частоту передатчика.

Мембранная коробка снабжена термокомпенсатором. Она имеет нелинейные характеристики, чувствительность коробки при давлении 50 мбар примерно в пять раз больше, чем при 1000 мбар.

Деформация коробки передается контактному указателю, который перемещается по колодке, сделанной попеременно из изоляционных и проводящих полосок. Всего в колодке 50 проводящих полосок, дающих 150 контактов. Этим контактам соответствуют вполне определенные значения давления (устанавливаемые при градуировке), они объединены в три контактные группы. Таким образом, возникают четыре различных положения контактного устройства: нет контакта, есть контакт 1-й, 2-й и 3-й группы. При изменении давления указатель давления проходит через эти четыре положения и включает друг за другом узел температуры (нет контакта), узел влажности и два стандартных сопротивления. Последовательность сигналов температуры, влажности и стандартных сопротивлений представляет собой серию определенных значений давления, соответствующих калибровке этого переключателя. Таким образом датчик давления выполняет две функции: он измеряет давление и одновременно переключает различные измерительные узлы радиозонда. Каждый баропереключатель имеет индивидуальную градуировку.

Терморезистор имеет форму цилиндра диаметром 1 мм и длиной 25 мм. Он обладает большим отрицательным температурным коэффициентом. Коэффициент отражения антирадиа-

ционного покрытия близок к 0,90. Радиационные поправки не вводятся.

Для измерения влажности применяется угольный гигристор, выполненный в виде пластинки, покрытой гигроскопичным угольным порошком. Сопротивление пластинки изменяется в зависимости от изменения влажности.

В настоящее время в США используются радиозондовые системы двух типов: для измерений на суше система зонд—радиолокатор, при этом ветер измеряется радиолокационным способом, на научно-исследовательских судах — радиозонды фирмы Бьюкерс Ло-Кейт (VLZ, Beukers Lo-Cate), имеющая две модификации — омега-зонды и VLF — зонды. Как уже упоминалось во второй главе, они отличаются от обычных тем, что позволяют определять ветер с помощью системы навигационных радиостанций.

Технические характеристики этих радиозондов следующие:

Несущая частота	403±3 МГц
Частота модуляции	
для метеоданных	200 кГц
для ветра	450 кГц
Масса	
общая	700 г
зонда	530 г
батарей	170 г
Выходные параметры батарей	18,0 В, 100 мА; 6,6 В, 30 мА; 5 В, 25 мА
Узел давления	анероидная коробка
Точность измерения давления	до 2 мбар
Узел температуры	терморезистор, при +30°C номинальное сопротивление 14 000 Ом
Точность измерения температуры	до 0,4°C
Узел влажности	угольный гигристор
Точность измерения влажности	±5%

Давление измеряется от 1050 до 2 мбар, температура — от +50 до —90°C и влажность — от 15 до 100%. При температуре ниже —40°C влажность не измеряется.

При транспортировке комплекты питания находятся в запаянных металлических коробках, что предохраняет их от воздействия внешней среды.

Существенным преимуществом американской системы зондирования является высокая степень автоматизации процессов приема и регистрации сигналов радиозонда, а также обработки данных. Приемное устройство непосредственно связано с небольшим специализированным компьютером, предназначенным только для обработки данных зондирования. В результате работы компьютера печатающий механизм выдает всю информацию о результатах зондирования, вплоть до составления аэрологической телеграммы.

4.4.2. Радиозонды Финляндии (Вайсала)

В Финляндии существует одна из старейших в мире фирм по производству радиозондов — фирма Вайсала. Радиозонды Вайсала характеризуются относительной простотой, малым весом и сравнительно низкой стоимостью. Это электромеханические радиозонды, в которых используются деформационные датчики (анероидная коробка, биметалл, волос). Эти датчики управляют переменными конденсаторами, емкость которых является функцией измеряемой метеорологической величины.

В схеме передатчика имеются два дополнительных контрольных постоянных конденсатора, предназначенных для учета влияния на частоту передатчика меняющихся напряжений накала и анода и других дестабилизирующих факторов. Эти конденсаторы вместе с измерительными конденсаторами попеременно включаются в колебательный контур. Таким образом, радиозонд построен на принципе сравнения емкостей. Для передачи измеряемой величины используется изменение несущей частоты передатчика, вызываемое изменением емкости колебательного контура.

В настоящее время в Финляндии имеется несколько типов радиозондов с различным назначением. Основные характеристики их приведены в таблице 4.1.

ТАБЛИЦА 4.1

Тип радиозонда	Назначение	Пределы измерения		
		анероидные коробки, мбар	термометр, °C	гигрометр (вальцованный волос), %
RS-13, RS-15	Обычные наблюдения	1050—0	Биметалл +40 ... —85	0—100
RS-16	Для больших высот, образцовые	2 барокоробки, 1050—0 100—0	Проволочный +40 ... —85	0—100
RS-17	Для низких высот	1050—700	Биметалл или проволока +40 ... —25	0—100

Новый радиозонд RS-16 предназначен для измерений на больших высотах. Он был принят в качестве образцового радиозонда Комиссией по приборам и методам ВМО в 1969 г. В радиозонде RS-16 применяется стандартный передатчик, принцип действия которого описан выше. Для измерения температуры в нем используется проволочный деформационный термометр, который имеет малую радиационную ошибку и небольшую инерцию.

Конструкция проволочного деформационного термометра показана на рис. 4.25. Проволока 3 изготавливается из алюминиевого сплава и имеет диаметр 0,15 мм, длину 130 мм. Один ее конец закреплен в кварцевой раме 2 посредством скобы 1 и инваровой проволоки δ_1 , в то время как другой конец соединен также с помощью инваровой проволоки δ_2 с пластинкой 7 переменного измерительного конденсатора. Неподвижная пластина 4 конденсатора закреплена на раме 2. Пружина 6 обеспечивает натяжение проволоки и движение пластины 7.

Для точных измерений давления на больших высотах радиозонд снабжен двумя изолированными анероидными коробками, одна из которых является обычной и измеряет давление от 1050 до 0 мбар, а вторая предназначена для измерения только малого давления (менее 100 мбар), и ее показания почти не зависят от температуры.

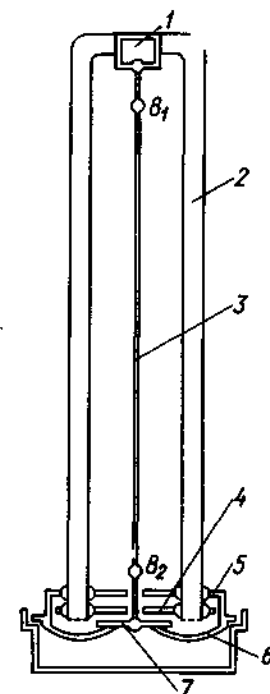


Рис. 4.25. Конструкция проволочного деформационного термометра радиозонда RS-16.

Для измерения влажности применяется волосной гигрометр Франкенберга обычной конструкции.

4.4.3. Сравнения различных систем радиозондирования

Выше мы ознакомились с системами радиозондирования и конструкциями радиозондов, в которых используются как разные методы измерений метеорологических величин, так и разные способы кодирования и приема сигналов радиозондов. Однако показания радиозондов, ежедневно в большом количестве выпускаемых на земном шаре, должны быть сопоставимы, так как они используются для синоптического анализа и прогноза погоды. Для определения сопоставимости показаний различных радиозондов Всемирная Метеорологическая Организация регулярно организует международные сравнения радиозондов.

Сравнения радиозондов принципиально разделяются на два вида. В одном случае осуществляются сравнения обычных

радиозондов, использующихся в оперативной практике. Целью этих сравнений является определение расхождений в показаниях различных радиозондов и оценка возможности их совместного применения для анализа состояния свободной атмосферы. В этом случае практически не удастся ответить на вопрос, показания какого радиозонда являются более точными, так как отсутствуют критерии сравнения. Примером таких сравнений являются международные сравнения радиозондов, выполненные в плане подготовки к эксперименту АТЭП-74 летом 1973 г. в Атлантике и при осуществлении эксперимента летом 1974 г.

В этих сравнениях участвовали системы радиозондирования США, СССР и Финляндии. В целом сравнения показали, что наблюдается удовлетворительное согласие показаний различных радиозондов в тропосфере о высотах изобарических поверхностей, температуре и влажности, соответствующее требуемой точности измерений. Было обнаружено систематическое расхождение в показаниях температуры в стратосфере, советский радиозонд систематически давал ее ниже, чем иностранные радиозонды. Возможно, причиной этого является то, что при обработке данных советских радиозондов учитывается радиационный нагрев терморезистора солнцем, а в результате иностранных систем радиационные поправки не вводятся. В то же время в обоих случаях не учитывается охлаждение терморезистора за счет собственного излучения. Таким образом, в данном случае вопрос о правильности результатов измерения температуры различными радиозондами требует дальнейшего выяснения.

Кроме данных о высотах изобарических поверхностей, температуре и влажности сравнивались ветровые данные, полученные разными методами. Результаты сравнений показали хорошую сходимость данных о ветре, полученных радиолокационным способом, и в то же время позволили выявить, что метод использования системы навигационных станций для определения ветра еще недостаточно отработан и часто дает нереальные данные о ветре. В табл. 4.2 приведены средние значения отклонений ($\Delta\bar{X}$) в измерениях основных параметров атмосферы зондами РКЗ-2 и зондами «Омега» (Ω) и VLF, вычисленные по результатам сравнений, выполненных в эксперименте АТЭП-74 ($\Delta\bar{X} = X_{\text{РКЗ}} - X_{\Omega/\text{VLF}}$). На рис. 4.26 даны вертикальные профили метеорологических величин, измеренных разными радиозондами.

Другим видом сравнений являются сравнения так называемых образцовых радиозондов между собой и сравнения обычных радиозондов с образцовыми. Образцовыми являются специальные конструкции радиозондов, обладающие повышенной точностью измерения давления или температуры. Проблема создания образцового чувствительного элемента для измерений влажности до сих пор еще не решена.

В образцовых радиозондах для измерения температуры большей частью используют проволоочные термометры, свободные от радиационных погрешностей и имеющие малую инерцию. Комиссия по приборам и методам радиозондовых наблюдений

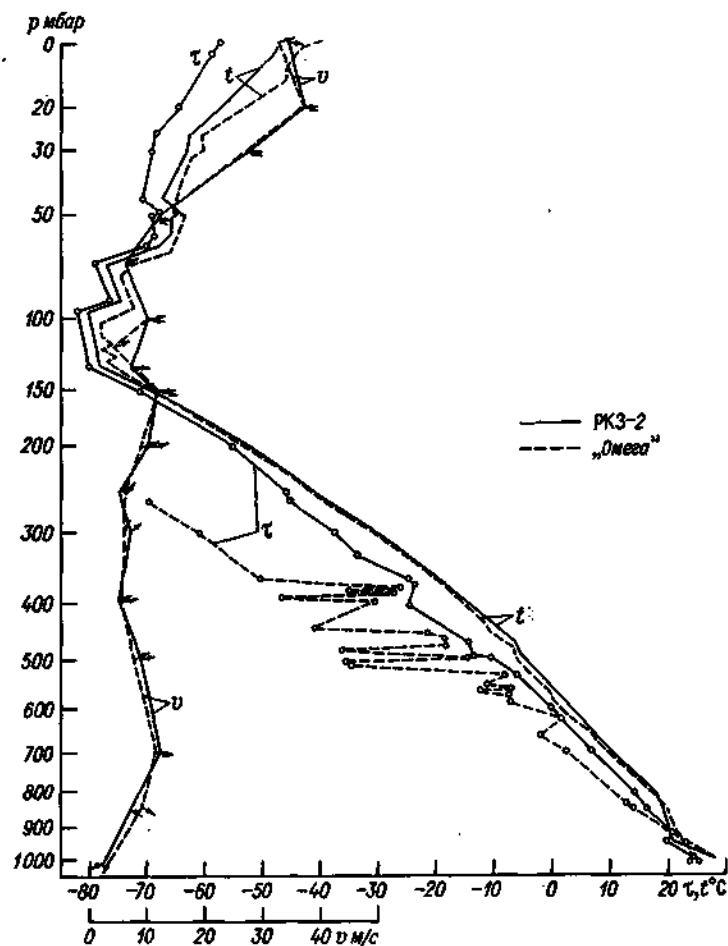


Рис. 4.26. Вертикальные профили метеорологических величин, измеренных радиозондами СССР (РКЗ-2) и США («Омега») в АТЭП-74. Стрелками показано направление ветра.

ВМО рекомендовала к использованию пять образцовых радиозондов: Финляндии, Франции, ФРГ, Японии и СССР. В мае 1968 г. были проведены сравнения образцовых радиозондов ФРГ и Финляндии. Общая разность между температурами этих радиозондов при давлении от 600 до 10 мбар оказалась равной $-0,11^\circ\text{C}$.

ТАБЛИЦА 4.2

Этап	Слой, мбар	H км	T°С	T _d °С	Ветер	
					град.	м/с
I	1000—500	—0,5	—0,2	0,3	7	—6
	500—100	—0,8	0,9	—1,3	11	—4
	100—30	—3,1	—3,5	—	—	—
II	1000—500	—2,1	—1,1	0,3	2	—1
	500—100	—3,2	1,1	2,5	—6	—2
	100—30	—5,4	—2,3	—	5	—5
IIA	1000—500	—1,1	—0,7	0,9	3	—3
	500—100	0,6	0,2	0,1	6	—3
	100—30	—2,0	—3,2	—	7	—2
IIB	1000—500	—0,1	0,0	—1,1	4	—3
	500—100	—0,1	0,4	—2,4	—12	—1
	100—30	—2,2	—0,1	—	—15	0

Более широкие и представительные сравнения образцовых радиозондов были проведены в Японии летом 1972 г. Эти сравнения также показали хорошую сопоставимость показаний различных образцовых радиозондов. От СССР на эти сравнения был представлен образцовый радиозонд НИИ ГМП (конструкции Ю. А. Юрчука), в котором для измерения температуры используется платиновая проволока. В СССР существует еще один образцовый радиозонд обсерваторского типа — РКЗ-3, в котором узлом температуры является трехкомпонентный бусинковый терморезистор.

Сравнения обычных сетевых радиозондов с эталонными образцовыми радиозондами дают возможность оценить точность измерения температуры обычным методом. К сожалению, образцовые радиозонды в настоящее время измеряют с большой точностью только температуру воздуха. Радиозонда, который мог бы измерять с большой точностью все необходимые параметры, в настоящее время пока нет. Поэтому оценка точности информационных результатов зондирования в настоящее время производится на основе детальных исследований инструментальных ошибок радиозондов.

5 СПЕЦИАЛЬНОЕ РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ

Развивающиеся в последние годы исследования в области физики свободной атмосферы кроме данных о состоянии полей температуры, влажности, давления и ветра в свободной атмосфере, требуют также сведений о ряде дополнительных параметров атмосферы, к которым относятся радиация, озон, аэрозоль и углекислый газ. При этом знаний об общем содержании их в атмосфере или вблизи земной поверхности недостаточно — необходимы данные о вертикальном распределении этих параметров в свободной атмосфере, а также о зависимости их от состояния атмосферы.

Массовые измерения вертикальных профилей указанных выше параметров возможны только на радиозондах. В соответствии с задачами измерений различают радиозонды актинометрические, озониметрические и др. Поскольку эти радиозонды в отличие от обычных измеряют кроме температуры, давления и влажности еще тот или иной дополнительный параметр, они получили общее название *специальных радиозондов*, а радиозондирование в целом — *специальное зондирование*. Наибольшее распространение из всех известных пока видов специального зондирования в мире получили актинометрическое и озониметрическое радиозондирование.

5.1. Актинометрическое радиозондирование атмосферы

Актинометрическое радиозондирование атмосферы является одним из основных направлений в развитии специального зондирования и позволяет экспериментальным путем измерять вертикальные профили потоков и радиационного баланса длинноволновой радиации в свободной атмосфере до высоты 30—35 км. Изучение процессов переноса радиации (коротковолновой и длинноволновой) в атмосфере необходимо в первую очередь в связи с тем, что без учета радиации невозможно построить

сколь угодно корректную схему численного прогноза погоды. Наиболее сложным в системе уравнений циркуляции атмосферы является учет неадиабатичности атмосферных процессов. Успешному решению этой задачи препятствует большая сложность процессов переноса излучения в свободной атмосфере.

Коротковолновая (КВ) радиация поступает к Земле от Солнца. Длинноволновая (ДВ) радиация — это тепловое излучение Земли и атмосферы в диапазоне длин волн 4—40 мкм, свойственное телам, имеющим температуру от +50 до —90°C. Длинноволновая радиация является одной из причин трансформации воздушных масс, потому что атмосфера получает свою энергию от Земли именно путем поглощения ее теплового излучения. Солнечная радиация сравнительно мало поглощается атмосферой, и в отсутствии облачности большая часть солнечной радиации достигает поверхности земли, поглощается ею и уже в виде теплового излучения подстилающей поверхности воспринимается атмосферой. Необходимость развития экспериментальных методов изучения длинноволновой радиации в свободной атмосфере была вызвана отсутствием простых и достаточно точных методов расчета потоков радиации.

Для измерения потоков длинноволновой радиации в свободной атмосфере в США и ФРГ с 1956 г., а в СССР с 1961 г. проводится актинометрическое радиозондирование атмосферы.

Актинометрическое радиозондирование атмосферы позволяет изучать поле радиации при помощи дешевых и достаточно точных актинометрических радиозондов (АРЗ), состоящих, как правило, из стандартных аэрологических радиозондов и актинометрических приставок (радиометров). На принципе сопряжения датчиков радиации с сетевыми радиозондами основаны практически все конструкции АРЗ, так как при этом используется сетевая приемная аппаратура и сохраняется стандартная аэрологическая информация.

В настоящее время существует много типов АРЗ, однако широкое распространение получили только три типа радиозондов (СССР, США, Япония), измеряющие длинноволновую радиацию в ночное и дневное время. Наибольшее распространение получили ночные актинометрические радиозонды, так как в ночное время в атмосфере присутствует только длинноволновая радиация и осуществить ее измерение с технической точки зрения проще.

В результате обработки данных актинометрического радиозонда получают следующую информацию: температуру и влажность воздуха, направление и скорость ветра, восходящий поток ДВ радиации $Q^{\uparrow}$, нисходящий поток ДВ радиации $Q^{\downarrow}$, эффективное излучение системы Земля—атмосфера F , представляющее собой разность восходящего и нисходящего потоков радиации. Величины $Q^{\uparrow}$, $Q^{\downarrow}$ и F измеряются в кал/(см²·мин) или

в Вт/м² (1 кал/см²·мин=698 Вт/м²). Разность эффективных излучений на границах слоя ΔH определяет собой приток длинноволновой радиации к этому слою. Слой выхолаживается, если эффективное излучение на верхней границе слоя F_2 больше, чем на нижней границе F_1 , и нагревается, если $\Delta F = F_2 - F_1$ отрицательно. Радиационный приток тепла позволяет вычислить скорость радиационного изменения температуры воздуха dT/dt в °С/ч, т. е. то изменение температуры, которое вызывается процессами поглощения или излучения длинноволновой радиации.

5.1.1. Актинометрический радиозонд АРЗ-1

В 1960 г. по инициативе В. Г. Кастрова в Центральной аэрологической обсерватории Г. Н. Костяной начал разработку актинометрического радиозонда. При разработке нового радиометра были учтены достоинства и недостатки не только радиометров, предназначенных для измерений радиации в свободной атмосфере при помощи радиозондов, самолетов и аэростатов, но также ряда наземных актинометрических приборов. Новый актинометрический радиозонд был сконструирован в 1961 г. и назван АРЗ-ЦАО (ныне АРЗ-1).

Принцип измерения и общая теория радиометра. В большинстве приборов, измеряющих радиационные потоки, используется эффект теплового воздействия радиации. В *термоэлектрических* радиометрах и балансомерах в результате теплового воздействия радиационных потоков на их верхние и нижние поверхности вырабатывается электродвижущая сила, пропорциональная разности этих потоков. Мерой интенсивности падающей радиации в *термометрических* радиометрах является температура приемной поверхности, которая возрастает при увеличении падающего на эту поверхность радиационного потока. Приемная (чувствительная) поверхность стремится прийти в тепловое равновесие с окружающей средой. Радиометр актинометрического радиозонда АРЗ-1 имеет две приемные поверхности: верхнюю и нижнюю. В полете радиозонда измеряется температура обеих поверхностей. Для того чтобы определить величину потока радиации, падающего на приемную поверхность, надо составить уравнение ее теплового баланса.

Обозначим основной падающий поток как $Q_{осн}^{\downarrow}$. Кроме него на приемную поверхность может сверху попадать поток излучения от корпуса радиозонда, несущей оболочки, фильтров и т. п., которое мы будем считать экранирующим $Q_{эк}^{\downarrow}$. Эти два потока составляют приток тепла к приемной поверхности. Сама приемная поверхность, имеющая температуру $T_{пов}$, будет терять тепло путем излучения. Излучение прismatic поверхности согласно закону Стефана—Больцмана пропорционально четвертой

степени ее температуры $\beta\sigma T_{\text{пов}}^4$, где β — коэффициент излучения поверхности, σ — постоянная Стефана—Больцмана. В состоянии теплового равновесия уравнение теплового баланса в простейшем виде будет иметь следующий вид:

$$Q_{\text{осн}}^{\downarrow} + Q_{\text{экp}}^{\downarrow} = \beta\sigma T_{\text{пов}}^4, \quad (5.1)$$

откуда

$$Q_{\text{осн}}^{\downarrow} = \beta\sigma T_{\text{пов}}^4 - Q_{\text{экp}}^{\downarrow}. \quad (5.2)$$

Таким образом, из этого уравнения следует, что для того, чтобы определить величину падающего потока радиации, доста-

точно измерить температуру приемной поверхности и определить экранирующее излучение. На самом деле полное уравнение теплового баланса приемной поверхности значительно сложнее, так как в нем должно учитываться экранирующее излучение не только сверху, но и снизу, а также коэффициенты поглощения

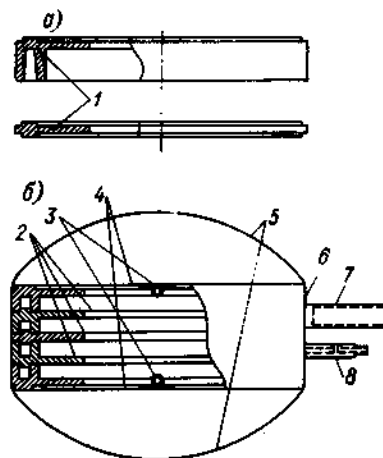


Рис. 5.1. Схема устройства радиометра радиозонда АРЗ-1.

а) крепление приемных поверхностей и промежуточных экранов; б) радиометр в разрезе.

приемной поверхности и нагрев терморезистора измерительным током. Аналогичным образом кроме потерь тепла за счет собственного излучения должны учитываться потери за счет конвективной и кондуктивной теплопроводности.

Общие сведения о радиозонде АРЗ-1 и правила его эксплуатации изложены в методических указаниях ЦАО «Методика эксплуатации актинометрического радиозонда».

Устройство радиометра. Радиометр актинометрического радиозонда предназначен для измерения в ночное время восходящего и нисходящего потоков длинноволновой радиации Земли и атмосферы. Устройство радиометра показано на рис. 5.1.

Радиометр представляет собой цилиндр 6 диаметром 140 мм и высотой 30 мм, внутри которого находятся две приемные пластины 4 и три промежуточных экрана 2 из алюминиевой фольги толщиной 10—12 мкм. Фольга крепится на кольцах 1 шириной 10 мм. Для измерения температур приемных поверхностей пластин используются полупроводниковые терморезисторы ММТ-1 3, которые крепятся с внутренней стороны к каждой приемной пластине с помощью накладки из фольги. Внешние стороны

приемных пластин вместе с опорными кольцами чернятся смесью сажи, шеллака и клея БФ, коэффициент поглощения черного покрытия близок к единице. С целью защиты приемных поверхностей от естественного обдува к корпусу балансомера привариваются полиэтиленовые экраны 5. Эти экраны имеют выпуклую форму благодаря постоянному избыточному давлению внутри прибора (20—50 мбар). Перед стартом радиометр поддувается воздухом через специальный клапан-ниппель 8. Избыточное давление сохраняется благодаря герметичности корпуса, клапан-ниппель автоматически регулирует избыточное давление и позволяет воздуху выходить во время подъема радиозонда, тем самым предохраняя экраны 5 от разрыва. Радиометр крепится на штанге при помощи держателя 7. Внутри на распорных кольцах сделаны отверстия для того, чтобы воздух, вытекающий из корпуса радиометра, омывал эти кольца и тем самым уменьшал влияние корпуса на температуру приемной поверхности.

Блок-схема радиозонда АРЗ-1 и принцип его работы. Общий вид радиозонда АРЗ-1 показан на рис. 5.2. Радиозонд состоит из следующих основных частей (рис. 5.3): 1) радиоблока (измерительный генератор с опорным сопротивлением, модулятор, передатчик СВЧ), 2) узла температуры (терморезистор), 3) узла влажности, 4) актинометрической приставки (радиометр), 5) коммутатора, 6) комплекта питания.

Актинометрический радиозонд представляет собой обычный сетевой радиозонд типа РКЗ, оснащенный дополнительной актинометрической приставкой — радиометром и коммутирующим устройством. Радиозонд предназначен для совместной работы с радиолокационной станцией «Метеор-1».

Сведения о температуре и влажности воздуха и о температуре приемных поверхностей радиометра передаются радиозондом автоматически в виде кодированных сигналов. Данные пеленга радиозонда по угловым координатам и наклонной дальности используются для вычисления высоты подъема радиозонда, а также направления и скорости ветра на различных высотах. Для измерения наклонной дальности до радиозонда и автоматического сопровождения его по дальности используются радиосигналы ответчика радиозонда.

Основные характеристики зонда:

Актинометрические	
Эффективное излучение земли и атмосферы	от —0,100 до 0,500 кал/(см ² ·мин)
Потоки длинноволновой радиации	от 0,000 до 0,700 кал/(см ² ·мин)

Технические	
Масса радиозонда без батареи питания	не более 900 г
с батареями	не более 1800 г
Время передачи одного параметра	от 12 до 20 с
Интервал в передаче каждого параметра	от 60 до 80 с

Остальные технические характеристики радиозонда те же, что у обычного радиозонда РКЗ-2.

Коммутатор служит для поочередного подключения узла температуры, узла влажности, терморезисторов верхней и нижней приемных поверхностей радиометра и опорного сопротивления к радиоблоку.

Вращение коммутатора осуществляется с помощью микродвигателя. Коммутатор помещен в пенопластовую или пластмассовую коробку. Питание коммутатора осуществляется от двух секций батарей типа КБС, соединенных последовательно.

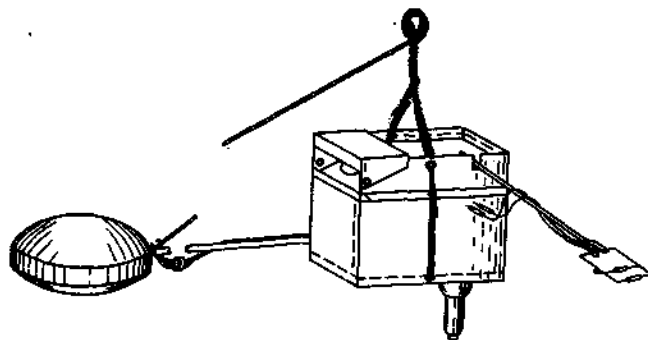


Рис. 5.2. Общий вид радиозонда АРЗ-1.

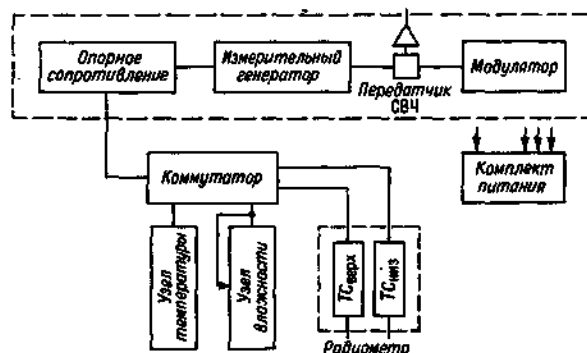


Рис. 5.3. Блок-схема радиозонда АРЗ-1.

Графики градуировки радиозонда АРЗ-1 по температуре и влажности полностью аналогичны графикам градуировки радиозонда РКЗ-2, описанным в предыдущей главе. Помимо указанных графиков в комплект актинометрического радиозонда входят градуировочные графики терморезисторов верхней и нижней поверхностей радиометра, построенные в координатах $R-t$ (сопротивление—температура) (рис. 5.4). В левой части графика написано «верх» или «низ». После предварительной проверки радиоблока и радиометра делается сопряжение терморезисторов радиометра с радиоблоком АРЗ-1. Для этого с градуировочного графика терморезистора по сопротивлению ($R-t$) снимаются значения температуры для опорных точек 1—16, которые на графике обведены кружками. Затем эти значения температуры переносятся на градуировочный график радиоблока ($Y-t$), на котором через все 16 точек

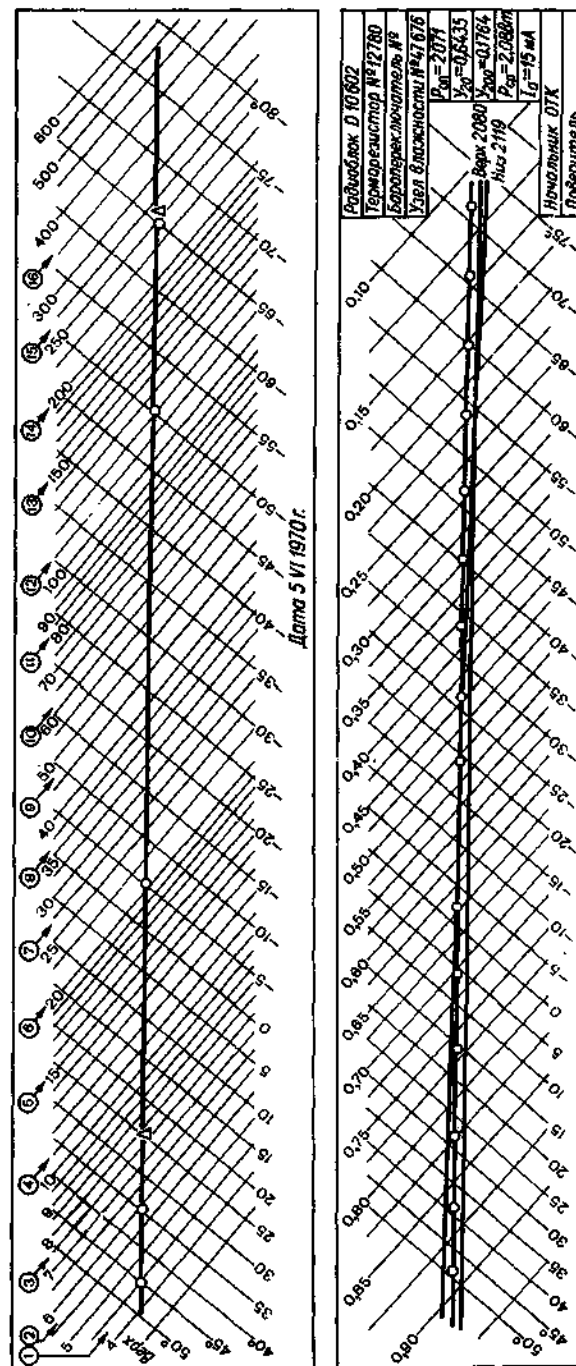


Рис. 5.4. Градуировочный график терморезистора верхней приемной поверхности радиометра (вверху).
Рис. 5.5. Подготовленный к работе градуировочный график радиозонда АРЗ-1 (внизу).

проводится кривая $t_{\text{верх}}$ или $t_{\text{низ}}$. При этом на градуировочном графике обязательно следует писать номер терморезистора. Следует отметить, что точки 20 и 200 кОм на графике $R-t$ имеют номера 6 и 14, а на графике $Y-t$ обведены чернилами (все остальные карандашом). На рис. 5.5 показан градуировочный график радиозонда АРЗ-1, подготовленный к работе.

Подготовка к выпуску и выпуск радиозонда АРЗ. Актинометрические радиозонды упакованы по 10 штук в ящике, причем радиометры уложены отдельно. При вскрытии ящика необходимо осмотреть партию радиозондов, проверить комплектность каждого радиозонда, а также соответствие номеров терморезисторов и радиоблока номерам на градуировочных графиках.

Как было показано выше, актинометрический радиозонд АРЗ-1 представляет собой обычный сетевой радиозонд РКЗ-2 с актинометрической приставкой — радиометром. Поэтому при эксплуатации этого радиозонда все операции, которые касаются общих принципов подготовки, проверки и эксплуатации системы радиозондирования «Метеорит» — РКЗ-2, выполняются в строгом соответствии с «Наставлением гидрометеорологическим станциям и постам», вып. 4. За, 1973, и «Методическими указаниями ЦАО».

Поскольку узлы температуры и влажности актинометрического радиозонда аналогичны узлу температуры и узлу влажности радиозонда РКЗ-2, подготовка их к выпуску производится так же, как в радиозонде РКЗ-2.

Перед сборкой актинометрического радиозонда производится внешний осмотр радиометров и проверка их на герметичность. Обращение с радиометром должно быть осторожным, брать его можно только за держатель. При внешнем осмотре следует обращать внимание на то, чтобы на его приемных поверхностях не было трещин, чернение фольги было ровным, без просветов. Для проверки корпуса радиометра на герметичность его необходимо поддуть через ниппель с помощью резиновой пульверизаторной груши и оставить на несколько минут. Поддув производится до исчезновения складок на полиэтилене. При хорошем ниппеле полиэтиленовый экран не должен опадать. Если в полиэтиленовом экране обнаружится свищ, его надо заклеить липкой полиэтиленовой лентой. Если ниппель плохой, надо сменить на нем резину, вырезав кусочек из латексной оболочки. Полиэтиленовый экран, загрязненный снаружи, надо протереть спиртом.

Подготовленный к выпуску радиометр можно хранить на аэрологической станции в течение месяца. Сопряжение терморезисторов радиометра с проверенным радиоблоком производится после его проверки.

Для работы актинометрического радиозонда очень большое значение имеет коммутатор, который поочередно включает в цепь радиопередатчика измерительные узлы радиозонда. Для

проверки качества работы коммутатора нужно иметь омметр и батарею питания 2,5—3 В. Батарея подключается к коммутатору таким образом, чтобы минус шел на корпус мотора. Далее к штырькам, идущим от общей ламели и корпуса, подключается омметр. К остальным разъемам коммутатора вместо измерительных узлов подключаются терморезисторы. При движении щетки по ламелям при хорошем контакте стрелка омметра должна оставаться совершенно неподвижной. Если при движении щетки по ламели стрелка омметра дрожит, то ламель необходимо подчистить тонкой наждачной бумагой.

Перед сборкой радиозонда не менее чем за 30 мин до выпуска необходимо вынести и установить в будке узел влажности и радиометр, последний помещается в приспособление для выдержки.

Сборку радиозонда следует производить за 1—1,5 ч до выпуска на специальной подставке после того, как подготовлены все его узлы (без подключения батарей питания).

Сборка радиозонда производится в следующем порядке:

1) в отверстия в боковой стенке кожуха вставляются держатели, с помощью которых штанга крепится к кожуху;

2) вынутый из кожуха радиоблок вставляется в малый отсек кожуха так, чтобы провода, выходящие из паза в крышке футляра радиоблока, оказались на стороне большого отсека кожуха;

3) кронштейн с терморезистором закрепляется в специальной скобе на верхней кромке кожуха;

4) отформованная батарея питания вставляется в большой отсек кожуха так, чтобы ее четырехштырьковая вилка оказалась против левых четырех гнезд радиоблока;

5) коммутатор вставляется на место баропереклювателя таким образом, чтобы провода для включения мотора и провода к радиометру выходили со стороны штанги;

6) производится электрическое соединение коммутатора с радиометром, узлом влажности, узлом температуры и радиоблоком, а радиоблок в свою очередь соединяется с батареей питания;

7) закрывается крышка кожуха таким образом, чтобы провода включения мотора коммутатора и провода, идущие к радиометру, остались снаружи; провод для подключения радиометра следует закрепить на штанге, подвязав его шпагатом или изоляционной лентой.

Контрольная поверка радиозонда делается в вентилируемой будке перед выпуском его в полет. Радиозонд АРЗ-1 располагается в будке аналогично радиозонду РКЗ-2 (рис. 5.6). Поверка в будке производится обычно без штанги, штанга вставляется при окончательной сборке радиозонда.

Поверку можно начинать через 10—15 мин после того, как радиозонд вынесен в будку. Вначале делается поверка

градуировки радиоблока по контрольным сопротивлениям (КС) 20 и 200 кОм. Контрольные сопротивления подключаются к коммутатору вместо радиометра с помощью переходной трехштырьковой вилки. После подключения КС включается коммутатор и производится запись сигналов в течение 2—3 циклов (цикл — полный оборот коммутатора от опорной частоты до опорной). Порядок записи следующий: $f_{оп}$, f_{20} , f_{200} (или, наоборот, f_{200} , f_{20} , $f_{оп}$) и $f_{и}$.

Если радиоблок годен по КС, производится проверка всех узлов радиозонда по температуре и влажности. Для этого



Рис. 5.6. Размещение АРЗ-1 в будке при выполнении контрольной проверки.

вместо КС подключается радиометр, который должен быть помещен в приспособление для выдержки балансомера и стоять вертикально. Производится запись сигналов в течение 2—3 циклов. Порядок передачи данных следующий: $f_{оп}$, $f_{верх}$, $f_{низ}$, $f_{возд}$, $f_{и}$. После вычисления всех трех температур и влажности

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ

Станция Чарджоу 38—687

Высота над уровнем моря 190 м

ТАБЛИЦА ВЫПУСКА № 1

Число 10 Месяц 10 Год 1970. Время выпуска (Московское) 17 30

Широта 39° 05' с. Долгота 63° 36' в. Местное ср. солнечное 18 44

Радиозонд АРЗ № Д-10602. Термистор РКЗ-1А 12780.

Узел влажности № 47676. Коммутатор № Терморезисторы балансомера: верхний № 2080, нижний № 2149

Выдержка перед выпуском

	ТС верх	КС 20	КС 200	ТС низ	КС 20	КС 200	ТС возд	КС 20	КС 200	и%
t_c	18.3	-4.6	-61.0	18.3	-2.4	-61.4	18.3	-2.8	-59.8	40
t_b	17.3	4.9	-61.0	17.3	-2.8	-61.5	17.3	-3.0	-59.8	40
$\Delta t_{св}$	1.0	0.3	0	1.0	0.4	0.1	1.0	0.2	0	0
Δt	0.8	0.2	0.3	0.8	0.2	0.3	0.8	0.1	0.2	Годен
	$\Delta t_{КС}$	$\Delta t_{КС}$	$\Delta t_{КС}$	$\Delta t_{КС}$	$\Delta t_{КС}$	$\Delta t_{КС}$	$\Delta t_{КС}$	$\Delta t_{КС}$	$\Delta t_{КС}$	

Наблюдения в момент выпуска (исправленные значения)

Температура, °С		Влажность и%	Давление, мм рт.ст.	Температура поч-вы, °С	Эффективное излучение, кал/(см²·мин)	Ветер		Облачность, атмо-сферные явления	Состояние по-стилающей по-верхности
сухой	смоченный					направление, град.	скорость, м/с		
18.3	11.7	40	999.5	19.8	-0.130	ССВ	1—2	0/0	Сухая

Характеристика приема сигналов (в начале и конце) хорошая

Причина прекращения приема лопнула оболочка

Дата проверки прибора на заводе 30.6.70

Дата подготовки узла прибора:

РКЗ-2 Балансомера Коммутатора

Прибор готовили

Сигналы обрабатывали

Проверил

заполняется таблица «Выдержка перед выпуском» и определяется годность радиозонда.

Таблица «Выдержка перед выпуском» размещена на титульном листе таблицы ТАЭ—АРЗ (образец 2). Заполняется она следующим образом. В строке t_c в графах $ТС_{\text{верх}}$, $ТС_{\text{низ}}$, $ТС_{\text{возд}}$ записывается значение температуры воздуха, отсчитанное в будке по психрометру; в графах $КС_{20}$ и $КС_{200}$ — значения температур для 20 и 200 кОм, снятые по соответствующим кривым градуировочного графика $Y-t$, в графе u % — значение относительной влажности по данным психрометра.

Значения в строке t_b (выдержка) представляют собой результаты поверки по $КС$ и поверки всех датчиков в будке. В строке $\Delta t_{\text{св}}$ записываются в каждом столбце разности $\Delta t_{\text{св}} = t_c - t_b$, т. е. из значения температуры, записанного в строке t_c , вычитается значение температуры в строке t_b . Далее вычисляются следующие величины:

$$\begin{aligned} \Delta t_{20} &= t_{20 \text{ зав}} - t_{20}; & \Delta t_{\text{возд}} &= t_{\text{психр}} - t_{p/z}; \\ \Delta t_{200} &= t_{200 \text{ зав}} - t_{200}; & \Delta t_1 &= \Delta t_{\text{возд}} - \Delta t_{20}; \\ \delta t_{\text{КС}} &= \Delta t_{20} - \Delta t_{200}; & \Delta t_2 &= \Delta t_{\text{возд}} - \Delta t_{200}; \\ \Delta t_{\text{ср}} &= \frac{\Delta t_{20} + \Delta t_{200}}{2}; & \Delta u &= u_{\text{психр}} - u_{p/z}. \end{aligned} \quad (5.3)$$

Величины $\Delta t_{\text{возд}}$, Δt_1 , Δt_2 , Δt_{20} , Δt_{200} , $\delta t_{\text{КС}}$ и $\Delta t_{\text{ср}}$ определяются отдельно для каждого терморезистора радиозонда (верх, низ и возд). Система терморезисторы—радиоблок годна к выпуску при следующих условиях:

$$\begin{aligned} \text{а) } |\Delta t_{20}| &\leq 2^\circ\text{C}; & \text{б) } |\Delta t_1| &\leq 1^\circ\text{C}; & \text{в) } |\Delta u| &\leq 20\%; \\ |\Delta t_{200}| &\leq 2^\circ\text{C}; & |\Delta t_2| &\leq 1^\circ\text{C}; \\ \delta t_{\text{КС}} &= |\Delta t_{20} - \Delta t_{200}| \leq 0,6^\circ\text{C}; \end{aligned}$$

Величина $\Delta t_{\text{ср}}$ вводится с соответствующим знаком в виде поправки при дальнейшей обработке сигналов $t_{\text{верх}}$, $t_{\text{низ}}$ и $t_{\text{возд}}$. Величина Δu является поправкой к отсчетам значений влажности, если $\Delta u > 1\%$.

Значения температур и влажности определяются так же, как и в радиозонде РКЗ-2. После окончания поверки заполняется титульная страница таблицы ТАЭ—АРЗ: все графы должны быть аккуратно заполнены, обязательно указывается местное среднее солнечное время, широта, долгота станции. В таблице «Выдержка перед выпуском» должны быть вычислены все значения и указана годность радиозонда к выпуску и подпись аэролога. В таблице «Наблюдения в момент выпуска» значения температуры должны быть записаны с точностью до $0,1^\circ\text{C}$, давление — с точностью до 0,1 мбар (записывается давление, не приведенное к уровню моря).

Выпуски радиозонда АРЗ-1 производятся только в ночное

время при высоте солнца не более чем -8° . После окончания поверки радиозонда наполняется оболочка № 150 или 200 (подъемная сила 2900—3100 г) и производится окончательная сборка радиозонда:

а) радиометр поддувается до исчезновения складок на экранах и вставляется в штангу верхней приемной поверхностью вверх, закрепляется винтом таким образом, чтобы приемные поверхности были расположены горизонтально;

б) проверяется надежность всех электрических соединений радиозонда, после чего завязывается кожух;

в) для того чтобы в полете радиометр располагался горизонтально, система радиометр—радиозонд уравнивается следующим образом. К штанге около радиометра подвешивается (перед фиксирующим винтом) один конец шнура или шпагата длиной 100—120 см, а другой его конец связывается со шнуром, который служит для завязывания кожуха радиозонда. Система уравнивается на руке так, чтобы радиометр располагался горизонтально относительно поверхности земли, точка равновесия закрепляется путем завязывания петли на шнуре. За эту петлю радиозонд подвешивается к оболочке.

В собранном виде радиозонд выдерживается перед выпуском в течение 5—10 мин. В это время производится нулевой отсчет его показаний. Для этого АРЗ-1 подвешивают на петлю поблизости от места выпуска на высоте около 1,5 м. Рабочая выдержка радиозонда перед выпуском («нулевая точка») крайне важна для всей дальнейшей обработки радиозонда, так как в это время устанавливается радиационное равновесие приемных поверхностей радиометра.

В морских условиях эта выдержка выполняется так: собранный и подготовленный к выпуску радиозонд ставят на планшир судна таким образом, чтобы радиометр располагался над водой.

После того как проведены все три выдержки, радиозонд выпускается в полет.

Длина шнура должна быть не менее 30 м. Категорически запрещается укорачивать подвес радиозонда, так как длинный подвес уменьшает экранирующее действие оболочки.

Для выпуска радиозонда в сильный ветер и с небольших площадок используются вспомогательные приспособления.

Время выпуска записывается на ленте и в таблице ТАЭ—АРЗ. В момент выпуска производятся метеорологические и актинометрические наблюдения: определяются температура, влажность, давление воздуха, направление и скорость ветра, количество облаков и их форма, баланс длинноволновой радиации (по балансомеру Янишевского), температура почвы, а также отмечаются метеорологические явления и состояние подстилающей поверхности по коду, приведенному в Методических указаниях ЦАО по эксплуатации радиозонда АРЗ.

Прием и обработка сигналов радиозонда АРЗ-1. Прием сигналов радиозонда АРЗ осуществляется с помощью РЛС «Метеорит», образец записи сигналов показан на рис. 5.7. Частоты метеоданных печатаются на ленте в последовательности, определенной коммутатором: опорная частота ($f_{оп}$), частота температуры верхней приемной поверхности радиометра ($f_{верх}$), частота температуры нижней приемной поверхности ($f_{низ}$), частота температуры воздуха ($f_{возд}$) и частота влажности (f_u). Эти частоты определяют один оборот коммутатора или цикл измерения. На ленте проводят короткие линии через точки, соответ-

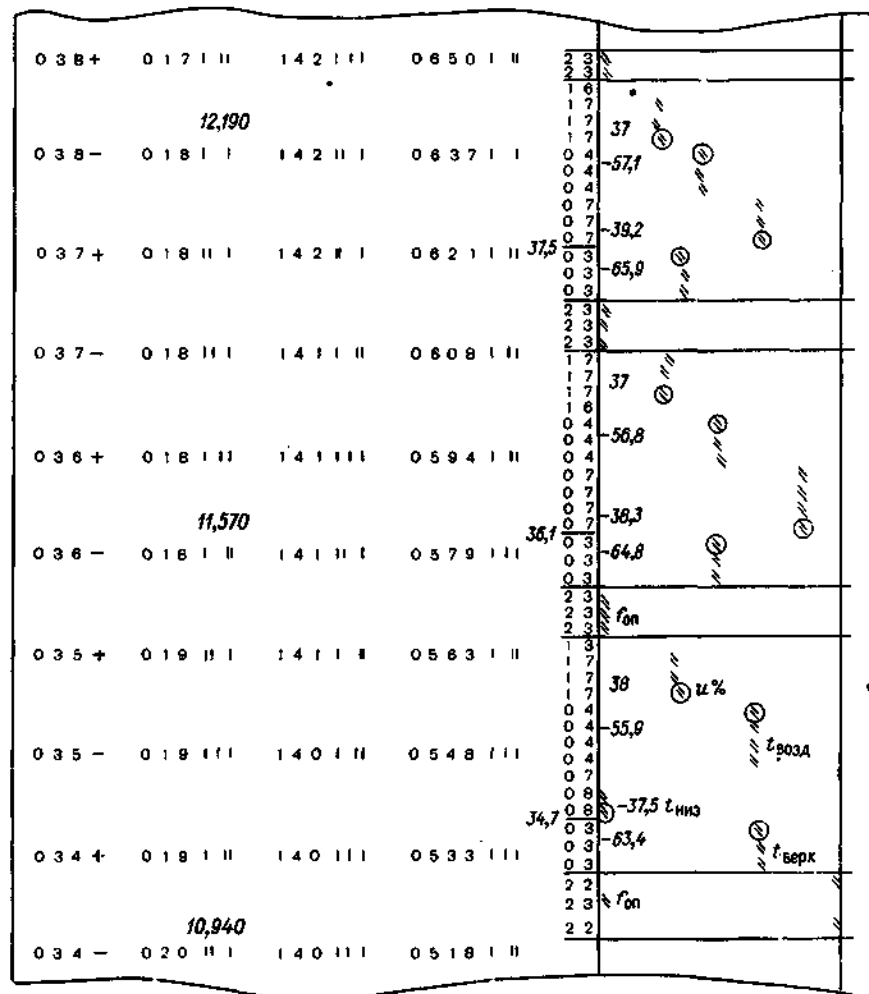


Рис. 5.7. Лента записи сигналов радиозонда АРЗ-1.

ствующие только одному датчику в каждом цикле (лучше карандашами разного цвета). Обработка ленты производится в следующей последовательности:

1. Вычисляется высота подъема радиозонда по наклонной дальности и углу места.

2. Определяются значения температур $t_{верх}$, $t_{низ}$, $t_{возд}$ и влажности и записываются на ленте. Отмечается время перехода с $t_{верх}$ на $t_{низ}$. Значения температуры и влажности воздуха при этом являются средними для слоя ΔH между соседними значениями $t_{верх}$ или $t_{низ}$.

3. Обработка радиоветровых наблюдений производится так же, как для всех радиозондов системы РКЗ. После окончания обработки для высот, указанных в таблице ТАЭ—АРЗ, интерполируются направление и скорость ветра.

4. Результаты актинометрического радиозондирования заносятся в таблицу ТАЭ—АРЗ, а также наносятся на график распределения параметров по высоте: $t_{верх}$, $t_{низ}$, $t_{ор}$ слоя и u .

Дальнейшая обработка результатов актинометрического радиозондирования производится на ЭВМ по формулам:

толщина слоя в метрах

$$\Delta H_i = H_{i+1} - H_i;$$

градиент температуры в $^{\circ}\text{C}/100 \text{ м}$

$$\gamma_i = \frac{T_i + T_{i+1}}{\Delta H_i};$$

давление воздуха в миллибарах

$$p_i = p_{i-1} \cdot e^{-\frac{g}{R} \frac{\Delta H_i}{T_{i \text{ ср}}}}; \quad \Delta p_i = p_i - p_{i-1};$$

восходящий поток в $\text{кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$

$$Q_i^{\uparrow} = Q_1(T_{i \text{ низ}}) - Q_2(T_{i \text{ верх}}) - Q_3(T_{i \text{ возд}});$$

нисходящий поток в $\text{кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$

$$Q_i^{\downarrow} = Q_1(T_{i \text{ верх}}) - Q_2(t_{i \text{ низ}}) - Q_3(T_{i \text{ возд}});$$

$$Q_i (i=1, 2, 3) = a_i T^4 + b_i T^2 + c_i T;$$

эффективное излучение в $\text{кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$

$$F_i = Q_i^{\uparrow} - Q_i^{\downarrow}; \quad \Delta F_i = F_{i+1} - F_i;$$

скорость радиационного изменения температуры в $^{\circ}\text{C}/\text{ч}$

$$\frac{dT_i}{d\tau_i} = -245 \frac{\Delta F_i}{\Delta p_i}.$$

5.1.2. Актинометрический радиозонд АРЗ-1М

Актинометрический радиозонд АРЗ-1М (модернизированный) представляет собой модификацию радиозонда АРЗ-1, предназначенную для работы с РЛС «Метеорит-2». Другими словами, этот радиозонд представляет собой радиозонд РКЗ-5 в комплекте с радиометром.

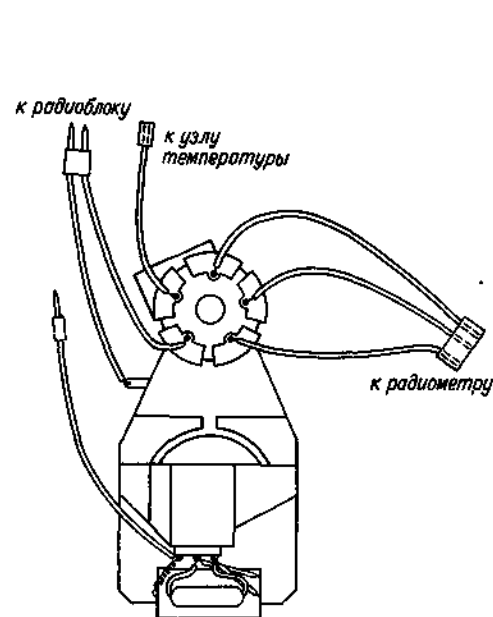


Рис. 5.8. Схема коммутатора радиозонда АРЗ-1М.

Для радиозонда АРЗ-1М существенно был изменен коммутатор, его схема дана на рис. 5.8. Питание коммутатора осуществляется от накальной секции 6,1 В батареи 200-ПМХМ-2ч, т. е. так же, как у радиозонда РКЗ-5. Несколько изменена схема подключения измерительных узлов радиозонда к радиоблоку, она показана на рис. 5.9. В остальном радиозонд АРЗ-1М такой же, как радиозонд АРЗ-1. Методика его эксплуатации ничем не отличается от описанной выше.

Радиозонд АРЗ-1М предназначен для использования на станциях, оборудованных РЛС «Метеорит-2».

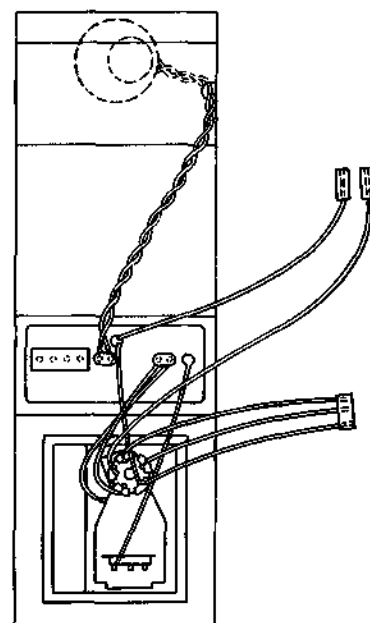


Рис. 5.9. Схема подключения измерительных узлов радиозонда АРЗ-1М к радиоблоку.

5.1.3. Результаты актинометрического радиозондирования атмосферы

Как уже указывалось выше, актинометрический радиозонд АРЗ позволяет измерять вертикальные профили температуры, влажности, получать распределение давления воздуха с высотой, а также вертикальные изменения длинноволновой радиации в атмосфере. На рис. 5.10 приведены результаты выпуска АРЗ, произведенного в Петропавловске-Камчатском 11 апреля 1967 г.

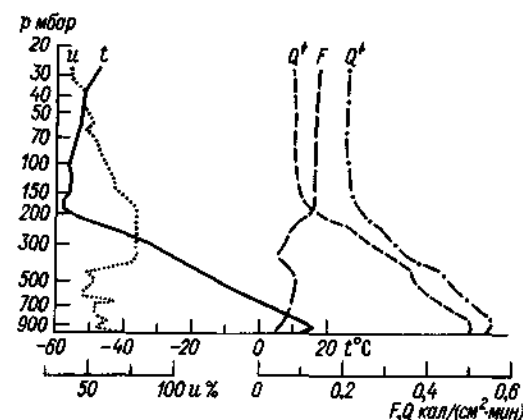


Рис. 5.10. Результаты актинометрического радиозондирования атмосферы. Петропавловск-Камчатский, 11 апреля 1967 г.

Материалы актинометрического радиозондирования позволяют изучать меридиональные и широтные изменения поля радиации в свободной атмосфере, временную изменчивость поля радиации, а также влияние различных климатических факторов на эффективное излучение системы Земля—атмосфера.

В основном за счет длинноволнового излучения система Земля—атмосфера охлаждается, теряя тепло в мировое пространство. Однако во многих случаях в атмосфере в отдельных слоях наблюдается радиационное нагревание. Чаще всего это подоблачный слой, потому что облака обладают хорошей излучательно-поглощательной способностью в длинноволновой области и поэтому существенно увеличивают встречное излучение атмосферы. На рис. 5.11 видно, как под слоем облаков S_c уменьшается эффективное излучение. В отдельных случаях при очень мощных облаках под ними могут наблюдаться отрицательные значения эффективного излучения.

5.1.4. Дневное актинометрическое радиозондирование

Описанные выше актинометрические радиозонды позволяют измерять радиационные потоки только в ночное время, однако для задач исследования физики свободной атмосферы совершенно необходимо знать потоки радиации и днем.

Измерять потоки суммарной радиации в атмосфере на радиозондах очень трудно из-за раскачивания прибора на подвесе и сложности учета изменяющейся относительно прибора высоты солнца. Поэтому первоочередной пока является задача измерения потоков длинноволновой радиации в дневное время, т. е. измерения длинноволновой радиации на фоне коротковолновой радиации.

Задача эта чрезвычайно сложна прежде всего из-за того, что баланс длинноволновой радиации в дневное время не поддается непосредственному измерению, поскольку создание достаточно чувствительного приемника радиации, неселективного в инфракрасной области спектра и практически не чувствительного к коротковолновой солнечной радиации, представляет достаточно сложную задачу. Проблема может быть решена путем применения соответствующих фильтров. Однако любой из фильтров сам является источником длинноволнового излучения. Это нежелательное излучение будет изменяться с изменением температуры фильтра и, следовательно, коротковолновой радиации, которую поглощает фильтр.

Кроме того, при полете прибора в свободной атмосфере исключительно сложным является учет влияния теплообмена внутри прибора на точность измерения потоков или баланса длинноволновой радиации. Поэтому при разработке актинометрических приборов применительно к зондированию атмосферы необходимо исследовать поведение в воздушной среде не одного чувствительного элемента, а всего прибора в целом. В этом не последнее место занимает корректное сопряжение чувствительного элемента со вторичным преобразователем и положение прибора по отношению к летательному аппарату с целью исключения влияния последнего на показания прибора.

Наконец, для надежного определения радиационного притока тепла с погрешностью не меньше 10% необходимо производить измерения потоков $Q^{\uparrow}$ и $Q^{\downarrow}$ — величин порядка $0,5 \text{ кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$ — с погрешностью не более $0,001 \text{ кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$, что является исключительно сложной задачей.

В дополнение к перечисленным, возникают трудности технического характера, связанные с необходимостью удовлетворения ряда противоречивых требований относительно массы прибора, высокой надежности, малой потребляемой мощности, стоимости — всего того, что в конечном итоге определяет экономичность системы в целом и массовость применения актинометрического датчика на радиозонде.

В ночное время с помощью современных методов и приборов определение длинноволнового баланса производится достаточно удовлетворительно.

В дневное время баланс длинноволновой радиации определяется по показаниям трех приборов — пиранометров и балансомера Янишевского. Эти приборы не приспособлены для использования на самолетах и аэростатах.

В последнее время для измерения длинноволновых потоков в дневное время используются разработанные Б. П. Козыревым высокочувствительные многослойные радиационные термоэлементы (РТЭ) с фильтрами из специального стекла КРС-5. Однако специальные исследования этих термоэлементов показали, что основным источником ошибок прибора является чувствительность его к солнечному излучению. При падающей прямой солнечной радиации примерно $1 \text{ кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$ ошибка измерения составляет около $0,10 \text{ кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$. Вследствие изменчивости потока солнечной радиации поправку на ее влияние трудно ввести достаточно точно. Дополнительный источник ошибок — влияние теплового излучения фильтра на показания приемника, которое при измерениях не учитывается.

Таким образом, применение любых фильтров для измерения длинноволновой радиации днем не дает необходимых результатов, так как практически

невозможно выделить полезный сигнал на фоне помех от коротковолновой радиации, излучения фильтра и температурных градиентов. Отсюда очевидно, что необходимо изыскивать другие физические способы измерения длинноволновой радиации на фоне коротковолновой радиации Солнца.

В течение 1965—1968 гг. В. И. Шляховым, В. И. Куракиным и М. Б. Фридоном были сконструированы самолетные радиометр и балансомер, а также актинометрический радиозонд, позволяющие производить измерения длинноволновой радиации в атмосфере в присутствии коротковолновой солнечной радиации.

Разработанный способ измерения длинноволновой радиации на фоне коротковолновой радиации основан на использовании в актинометрических приборах двух материалов, имеющих высокую отражательную способность в области коротковолновой части спектра и резко различную излучательную (поглощательную) способность в длинноволновой области.

Спектрометрическое исследование большой группы материалов позволило подобрать пару с указанными выше свойствами — эмаль белая типа ВЛ-548

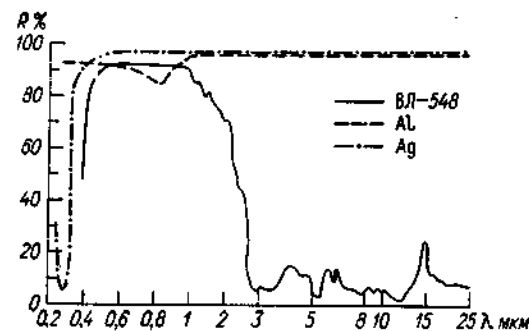


Рис. 5.11. Спектральные характеристики различных материалов.

и серебро или алюминий. Спектральные характеристики (коэффициенты отражения R) этих материалов представлены на рис. 5.11.

Как видно на рисунке, указанные материалы имеют высокую и практически равную отражательную способность в области спектра $0,4-2,5 \text{ мкм}$ — около 95%. Небольшое различие в коэффициентах отражения материалов можно устранить, зачернив некоторую часть одной из приемных поверхностей или зашунтировав одну из термобатарей, если прибор термоэлектрический.

Таким образом, включенные навстречу друг другу термобатареи, покрытые различными материалами (ВЛ-548 — алюминий), позволяют измерить баланс длинноволновой радиации. Такой радиометр используется в актинометрическом радиозонде АРЗ-2.

Радиозонд актинометрический АРЗ-2 предназначен для измерения вертикальных профилей температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра, а также длинноволнового радиационного баланса днем и ночью в тропосфере и стратосфере. Он работает совместно с наземной радиолокационной установкой «Метеорит».

Радиозонд построен на базе радиозонда РКЗ-2 и состоит из отдельных узлов температуры, влажности, радиоблока, преобразователя с коммутатором и балансомера.

Баланс длинноволновой радиации в радиозонде АРЗ-2 измеряется с помощью балансомера, чувствительным элементом которого является термоэлектрическая батарея, представляющая собой круглый диск и содержащая около 2000 термопар серебро—константан (рис. 5.12). Измерение длинноволновой радиации атмосферы на фоне коротковолновой радиации Солнца

обеспечивается применением двух покрытий (алюминий и эмаль белая типа ВЛ-548), имеющих высокую отражательную способность в области коротковолновой части спектра и резко отличную степень черноты в длинноволновой области спектра. Для исключения влияния ветра и атмосферных осадков на

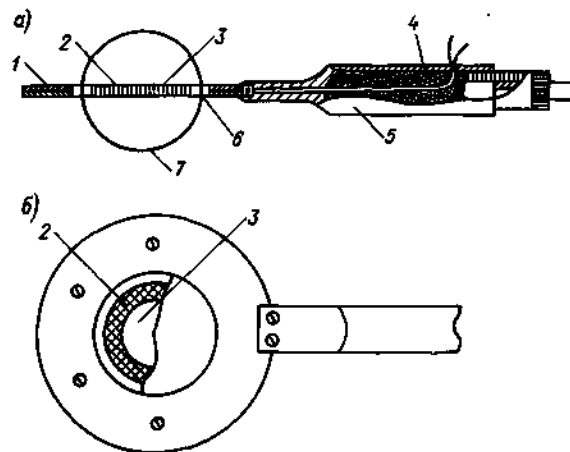


Рис. 5.12. Балансер актиметрического радиозонда АРЗ-2.

а — вид сбоку, б — вид сверху; 1 — корпус балансера, 2 и 3 — термобатареи, 4 — колая ручка балансера, 5 — силнкагель, 6 — опорное кольцо из плексигласа, 7 — полиэтиленовый экран.



Рис. 5.13. Общий вид радиозонда АРЗ-2.

1 — радиозонд РКЗ; 2 — штанга; 3 — балансер.

показания балансера применяются полусферические полиэтиленовые экраны, обладающие достаточной прозрачностью в рабочем диапазоне длин волн.

Вырабатываемое термобатареей постоянное напряжение поступает на вход усилителя постоянного тока, представляющего из себя преобразователь, собранный на двух транзисторах П-13, поляризованном реле типа РПС11/5, трансформаторе и двух радиолампах типа 1Ж29Б или 2С14Б.

Входные сигналы от различных датчиков подаются на вход преобразователя и радиоблок через коммутатор, выполненный на реле — искателе типа РС-4. Питание преобразователя, коммутатора и радиоблока производится от одной батареи 200-ПМХМ-2ч. Общий вид радиозонда АРЗ-2 показан на рис. 5.13.

На рис. 5.14 показаны результаты измерений баланса длинноволновой радиации системы Земля—атмосфера, выполненные днем в г. Рыльске.

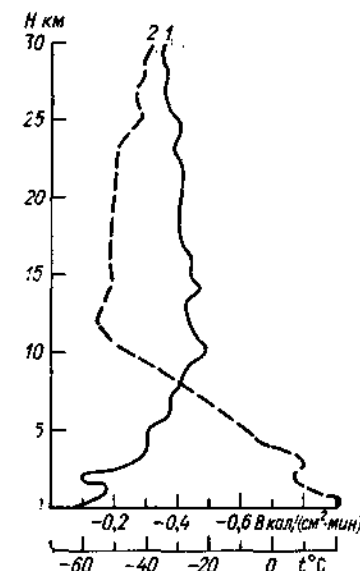


Рис. 5.14. Результаты выпуска радиозонда АРЗ-2. г. Рыльск, 17 июня 1971 г.

1) $B \text{ кал/см}^2 \cdot \text{мин}$; 2) $t^\circ\text{C}$.

5.1.5. Зарубежные конструкции актиметрических радиозондов

В настоящее время экспериментальные методы исследования поля радиации в свободной атмосфере получили широкое распространение во многих странах. Это вызвано тем, что, как мы уже говорили выше, численный эксперимент пока не может быть использован достаточно надежно в большинстве реальных случаев. Актиметрическое радиозондирование атмосферы, кроме СССР, проводят еще США, ФРГ и Япония. Различные конструкции радиометров показаны на рис. 5.15.

Все зарубежные конструкции АРЗ одинаковы, т. е. к стандартному сетевому радиозонду добавляется актиметрическая приставка — радиометр. Однако конструкции радиометров весьма различны.

Радиометр США имеет две черные приемные поверхности (верхнюю и нижнюю), температура которых измеряется с помощью терморезисторов. Принцип измерения и теория радиометра аналогичны принципу и теории советского радиометра АРЗ-1. При передаче сигналов метеопараметров к сигналам температуры и влажности добавляется температура верхней и нижней приемных поверхностей. Черные поверхности защищены тонкими плоскими полиэтиленовыми экранами. Корпус радиометра выполнен из пенопласта, размер его примерно в два раза больше, чем радиометра АРЗ-1. Крепится радиометр непосредственно к корпусу радиозонда, и с целью исключения влияния корпуса радиозонда на показания радиометра стенка радиозонда, к которой крепится радиометр, покрыта отражающей алюминиевой фольгой.

Радиометр Японии разделен на две части. В каждой части в квадратную рамку из пенопласта, покрытую алюминированной пленкой типа «Майлар»,

вставлены три кольца ($d=100$ мм) из материала, похожего на текстолит. На одном внешнем кольце крепится полиэтиленовая пленка, на втором — майла-

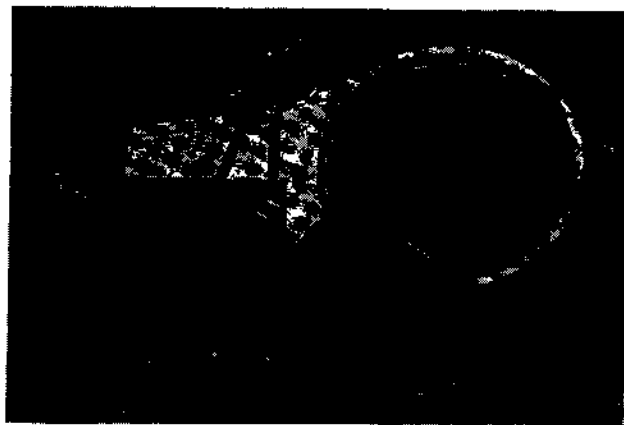


Рис. 5.15. Различные конструкции радиометров актинометрических радиозондов.

1 — СССР; 2 — США; 3 — ФРГ; 4 — Япония.

ровская пленка с бусинковым терморезистором в центре для измерения ее температуры. На среднем кольце также крепится майларовская пленка с бусинковым терморезистором. Сторона этой пленки, обращенная к полиэтилену, чернится и служит приемной поверхностью. Расстояние между пленками 7 мм. Два таких радиометра, один обращенный черненой стороной вверх, а другой — вниз, крепятся по обе стороны радиозонда на расстоянии от него около 15 см и служат для измерения нисходящего $Q^{\downarrow}$ и восходящего $Q^{\uparrow}$ потоков длинноволновой радиации.

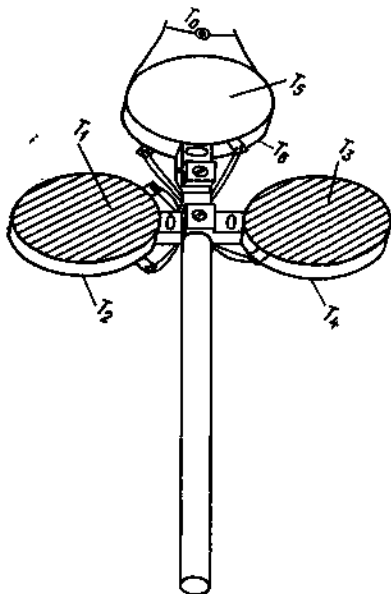


Рис. 5.16. Радиометр ФРГ.

Радиометр ФРГ имеет самую сложную конструкцию (рис. 5.16). Он состоит из трех дисков, укрепленных на тонкой трубке. Каждый диск состоит из кольца (поливинилхлорид) шириной 3 мм и высотой 6 мм, на котором с противоположных сторон крепятся две пластинки, состоящие из трех слоев каждая. Алюминиевая фольга толщиной 0,15 мм, черненная или полированная, крепится на алюминиевом кольце шириной 3 мм и высотой 0,7 мм. Внутри второго, выполненного из эпоксидной смолы, размещена спираль для подогрева пластинки электрическим током. Третий слой представляет собой также алюминиевую фольгу, температура которой измеряется бусинковым терморезистором. Четыре внешние поверхности

($T_1—T_4$) зачернены, две ($T_5—T_6$) — отполированы. Пластины T_1 , T_4 и T_6 подогреваются электрическим током (равные резисторы подогревателей включены последовательно). Температура шести приемных поверхностей и температура воздуха t передаются на наземное регистрирующее устройство. Решив шесть уравнений с шестью неизвестными, можно определить восходящий и нисходящий потоки длинноволновой радиации.

Актинометрические радиозонды различных стран, так же как и обычные радиозонды, неоднократно сравнивались между собой. Первые сравнения были организованы в марте—апреле 1965 г. в США. Результаты сравнения показали, что кривые распределения потоков радиации по высоте изменяются до уровня 100 мбар почти подобно. Разброс значений составляет в тропосфере $\pm 10\%$, но в стратосфере он больше.

Сравнения АРЗ проводились и позже. Так, на американском судне «Дискаверер» в мае 1970 г. сравнивались АРЗ США, Японии и ФРГ. Все четыре радиозонда сравнивались в Японии (Токио и Татено), в марте 1971 г. К сожалению, результаты сравнений показывают, что пока расхождения разных актинометрических радиозондов превышают требуемую точность измерений, поэтому создатели этих радиозондов работают над устранением обнаруженных недостатков, уточняют теорию радиометров и улучшают методику эксплуатации. После первых сравнений в США Г. Н. Костяной (ЦАО) произвел тщательную проверку теории радиометра АРЗ-1, были выполнены специальные градуировочные выпуски АРЗ. В результате этой работы были уточнены расчетные константы в уравнениях теплового баланса радиометра. Сопоставление результатов, полученных актинометрическим радиозондом АРЗ-1, с результатами теоретических расчетов и независимых измерений тех же параметров ($Q^{\downarrow}$ и $Q^{\uparrow}$) в нижних слоях показывает, что данные советского АРЗ являются физически более достоверными и реальными.

5.2. Озонометрическое радиозондирование атмосферы

Исследование атмосферного озона — интенсивно развивающаяся сейчас область физики атмосферы — связано с широким кругом проблем этой отрасли науки, в частности с проблемами изучения состава воздуха, поглощения и излучения радиации, распределения температуры в верхней атмосфере и, наконец, динамики и общей циркуляции атмосферы.

Вместе с тем исследование озона атмосферы имеет большое значение для ряда вопросов биологии и загрязнения атмосферы.

Несмотря на малое содержание озона в атмосфере, его значение для жизни на Земле чрезвычайно велико. Максимум содержания озона расположен в стратосфере. Озон поглощает ультрафиолетовую радиацию Солнца с длиной волны менее 0,290 мкм, избыток которой вредно отражается на развитии живых организмов.

Возросший в последнее время интерес к атмосферному озону обусловлен тем обстоятельством, что выяснилась реальная возможность непреднамеренного воздействия на толщину озонового слоя. Выхлопные газы стратосферной авиации, содержащие окислы азота, а также загрязнение атмосферы соединениями хлора и фтора в результате промышленной деятельности представляют опасность для озона. Все перечисленные вещества обладают свойствами катализаторов разрушения озона.

Актуальность озонной проблемы очевидна, особенно в связи с отмечающейся в наше время общей заботой об охране окружающей среды. Однако существуют и другие причины, вынуждающие заниматься исследованиями атмосферного озона. Достаточно указать, что озон определяет термические свойства стратосферы и служит здесь ключевым элементом в фотохимических и химических реакциях.

5.2.1. Единицы измерения озона

Содержание озона в воздухе, как мы уже знаем, невелико и в то же самое время очень изменчиво. Общее количество озона в атмосфере выражается обычно через толщину (в сантиметрах) того слоя, который образовал бы весь озон атмосферы, собранный отдельно и приведенный к нормальному давлению 760 мм рт. ст. и нормальной температуре 0°C.

Содержание озона в воздухе в данном слое, кроме того, можно описать с помощью следующих характеристик:

1) плотность (парциальная плотность) озона ρ_{O_3} , иногда обозначаемая через ν и выражаемая обычно в мкг/м^3 . При этом $1 \text{ мкг/м}^3 = 10^{-6} \text{ г/м}^3$;

2) парциальное давление озона p_{O_3} , которое выражается, например, в нанобарах ($1 \text{ нб} = 10^{-9} \text{ бар}$);

3) отношение смеси, т. е. отношение плотности озона к плотности воздуха.

5.2.2. Озонозонды

Исследования озона в настоящее время ведутся экспериментальными и теоретическими методами. Мировая озонометрическая сеть включает около 130 станций, из них 35 — советские, которые проводят ежедневные измерения общего содержания озона в вертикальном столбе воздуха по наблюдениям с земли. В некоторых странах созданы сети станций (США, Индия) или отдельные станции (Швейцария, Италия) для систематических измерений распределения озона по высоте. Измерения выполняются озонными зондами, поднимаемыми на воздушных шарах до высоты 30—40 км. В последние годы все большее развитие получают спутниковые и ракетные измерения озона.

Озонозонды — приборы, применяющиеся для наблюдений за озоном непосредственно в верхней атмосфере, получившие большое распространение в последнее десятилетие. Они поднимаются на оболочке, наполненной водородом или гелием, и передают радиосигналы о количестве озона на Землю. Как и актинометрические, их обычно объединяют с сетевым радиозондом, что позволяет сопоставлять наблюдаемую стратификацию озона с температурой.

В соответствии с принятыми методами измерения озона озонозонды разделяются на оптические, электрохимические и хемо-

люминесцентные. В оптических зондах общее содержание озона в атмосфере, расположенной над радиозондом, определяется по ослаблению солнечной радиации в полосах поглощения озона. В электрохимических озонозондах измеряется эффект химического воздействия озона на раствор чувствительного к озону вещества. В хемолуминесцентном радиозонде концентрация озона измеряется по эффекту возбуждения люминесцирующего слоя, который под воздействием озона начинает светиться.

Оптические озонозонды. Они основаны на принципе измерения интенсивности ультрафиолетовой радиации, поступающей к прибору от Солнца. Все оптические озонозонды измеряют общее количество озона, находящегося в данный момент над прибором, достигшим высоты z ; общее количество озона обозначается как $x(z)$. Затем путем численного дифференцирования $x(z)$ по z может быть вычислена плотность озона $\rho_{O_3}(z)$.

Один из первых в мире оптический озонозонд был создан в 1958 г. А. Васси. В 1963—1965 гг. А. С. Бригаев и В. А. Изенас разработали и испытали советскую модель оптического озонозонда, принципиальная схема которого показана на рис. 5.17. Прибор представляет собой автоматический ультрафиолетовый фотометр, выделяющий при измерениях радиацию в полосе поглощения ($\lambda_1 = 0,310 \text{ мкм}$) и вне полосы ($\lambda_2 = 0,369 \text{ мкм}$) поглощения озона. Датчик озона состоит из светоприемника 1; светофильтра 2, отсекающего видимую часть спектра; передвижной обоймы со светофильтрами и заглушкой 3; модулятора 4, детектора излучения 5, миниатюрного электродвигателя 6, механизма переключения экспозиций 7 и механизма связи вала двигателя с модулятором 8.

Светоприемник выполнен из кварцевого стекла и снабжен специальным осесимметричным экраном, обеспечивающим постоянство освещенности входного зрачка прибора при изменениях угла падения лучей от солнца. Монохроматическая радиация, выделяемая светофильтрами, попадает на детектор — фотосопротивление, обладающее достаточной чувствительностью к ультрафиолетовой радиации. Фотосопротивление через согласующее устройство и коммутатор подключается к измеритель-

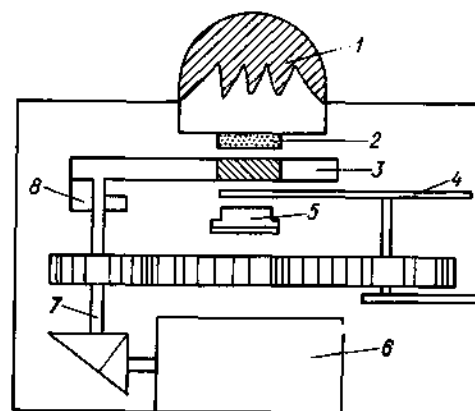
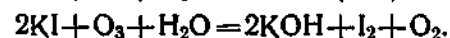
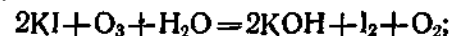


Рис. 5.17. Принципиальная схема оптического озонозонда.

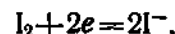
ному генератору радиозонда типа РКЗ. Общее содержание озона в слое выше уровня z рассчитывается по ослаблению интенсивности радиации в полосе поглощения озона (λ_1), которое определяется путем сравнения с интенсивностью радиации вне полосы (λ_2).

Электрохимические озонозонды. Другая группа озонозондов основана на применении электрохимического метода.

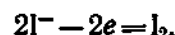
В Великобритании Брюэр и Мильфорд предложили два варианта химического озонозонда. Идея их метода заключалась в том, что из раствора иодистого калия (KI) озон выделяет свободный иод:



Если в раствор погрузить два электрода, к которым приложено небольшое напряжение (десятые доли вольта), то при отсутствии озона и иода тока не будет. При появлении иода его молекулы у катода образуют ионы



которые затем двигаются к аноду. Близ последнего иод восстанавливается:



и если так или иначе помешать возвращению его в массу раствора, то текущий ток (переносимый заряд) будет пропорционален количеству озона, реагирующего с раствором. Возможно применение других электролитов для определения концентрации озона, но принцип работы во всех случаях аналогичен описанному. Общим недостатком радиозондов такого типа является необходимость строгого контроля количества воздуха, протекающего над электролитом, который технически осуществить очень сложно и не всегда возможно.

На рис. 5.18 показана принципиальная схема электрохимического озонозонда, которая справедлива практически для любой конструкции. Датчик озона состоит из следующих основных узлов: кулонометрической ячейки концентрации озона 2, воздухозаборной трубки 1, воздушного фильтра 3, регулятора расхода воздуха 4, насоса 5, усилителя 10, коммутатора 7, источников электропитания насоса 6 и усилителя 9, радиоблока 8.

Действие ячейки основано на химической реакции озона, находящегося в воздухе, с соответствующим раствором. Снимаемый с электродов ячейки потенциал пропорционален количеству озона, находящегося в воздухе. Воздух через ячейку прокачивается микронасосом. Электрические сигналы, снимаемые с электродов ячейки концентрации озона, усиливаются, преобразуются и через коммутирующее устройство поступают в цепь радиоблока.

В качестве иллюстрации приведенной выше принципиальной схемы электрохимического озонозонда на рис. 5.19 изображена электрохимическая ячейка озонозонда США модели ЕСС-2А, разработанная В. Д. Комиром. В этой ячейке элементом, чувствительным к изменению озона, является блок 1, состоящий из двух камер — катодной и анодной. В качестве электролита используется раствор иодистого и бромистого калия, причем концентрация бромистого калия в обеих камерах одинакова, а иодистого калия — различна. Различная концентрация иодистого калия возбуждает начальный ток в начале реакции, поэтому в данном случае не требуется дополнительной электродвижущей

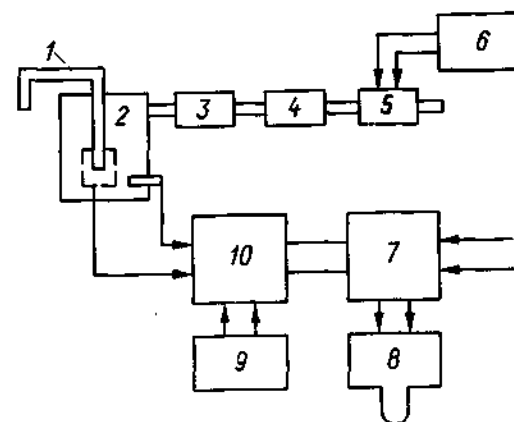


Рис. 5.18. Принципиальная схема электрохимического озонозонда.

силы. Electroды изготавливаются из платины, корпус камер, трубка для подачи воздуха 4 и корпус насоса 2 изготавливаются из материала типа тефлона, потому что тефлон инертен по отношению к озону и не вызывает изменений в концентрации озона при прохождении воздуха через ячейку. Обе камеры соединены вместе так называемым ионным мостиком, представляющим собой плотный фитиль из хлопковых волокон. Этот фитиль служит проводником ионов и замедляет перемешивание электролитов катодной и анодной камер, тем самым сохраняя концентрацию электролитов в камерах.

Описанная озонная ячейка используется в комплекте со стандартным зондом США VIZ № 1292. С помощью коммутирующего устройства 8 озонная ячейка включается в цепь радиопередатчика на 3,5 с. В радиозонде предусмотрена возможность градуировки телеметрической системы в полете путем подачи сигналов «ноль озона» и «градуировка озона». С целью введения поправок на температуру, при которой происходит реакция, измеряется температура внутри озонной ячейки. Сохраняется

информация о температуре, влажности и давлении. Размер озонной ячейки $7,9 \times 7,9 \times 13,3$ см, общий вес зонда с батареями около 1000 г.

Хемолюминесцентные озонозонды. На совершенно ином принципе основан распространенный в Америке хемолюминесцентный зонд Регенера. В нем применяются вещества (люминал, родамин и др.), люминесцирующие под действием озона

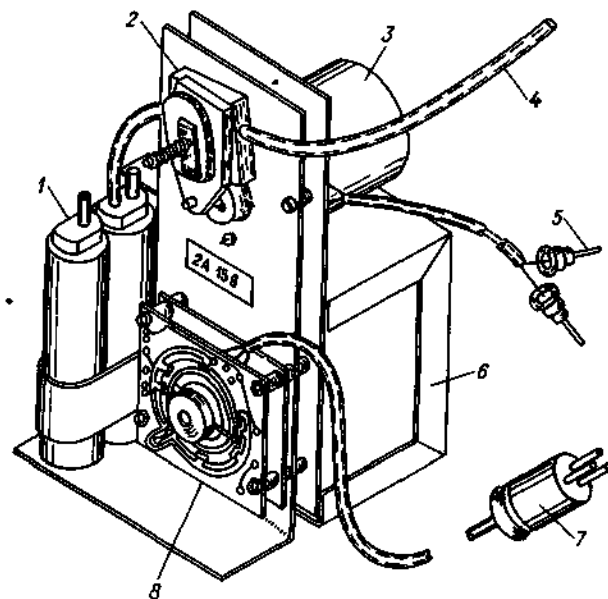


Рис. 5.19. Кулонометрическая электрохимическая ячейка концентрации озона озонозонда ECC-2A.

1 — чувствительный элемент озона; 2 — насос; 3 — мотор; 4 — воздухоподводящая трубка; 5 — выводы для подключения батарей; 6 — контейнер для устройства связи; 7 — вилка для подключения ячейки к радиоблоку; 8 — коммутирующее устройство.

тем сильнее, чем выше концентрация озона в воздухе. Схема такого озонозонда изображена на рис. 5.20.

Сильфонный насос 5, в котором удается избежать контакта воздуха с поверхностями различного состава или со смазкой обычных насосов и пр., втягивает воздух, делая четыре движения в 1 мин. В момент всасывания выходное напряжение, создаваемое в зонде, подключается к контуру передатчика радиозонда. Всасываемый во входную трубку 1 внешний воздух проходит изогнутую и зачерненную снаружи стеклянную трубку 7 (устроенную так, чтобы через нее не проникал в прибор свет) и попадает в экспозиционную камеру 10, дно которой составляет покрытый люминесцирующим веществом плексигласовый

диск 11. Над диском установлен фотоумножитель 8 и 9. Ток последнего усиливается усилителем постоянного тока и далее модулирует сигнал передатчика радиозонда со звуковой частотой 100 Гц при отсутствии озона в воздухе и 200 Гц при наибольшем его возможном количестве. На выходе озон воздуха разрушается, проходя через ловушку 3, наполненную стальной ватой.

Чувствительное вещество готовится путем смешивания водного раствора родамина В с силикагелем и затем с гуммиарабиком при 200°C . При такой обработке люминесценция родамина В не зависит от влажности воздуха и главное родамин не обнаруживает усталости при длительных экспозициях.

Родамин В нелетуч, яркость его люминесценции с большой точностью пропорциональна количеству озона в проходящем

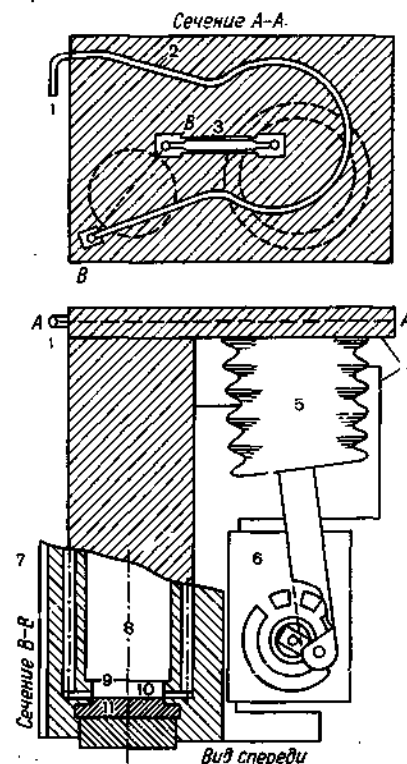


Рис. 5.20. Схема хемолюминесцентного озонозонда Регенера.

1 — забор воздуха; 2 — ловушка света из пайрексовой трубки в черной оболочке; 3 — ловушка для озона (разрушение озона); 4 — приборные доски (печатные схемы); 5 — сильфонный насос; 6 — последовательное переключение; 7 — пайрексковый воздуховод; 8 — фотоумножитель; 9 — окно фотоумножителя; 10 — экспозиционная камера; 11 — плексигласовый диск с люминесцирующим покрытием.

над ним воздухе, и он быстро реагирует на изменения концентрации озона. К таким примесям воздуха, как NO_2 , SO_2 и Cl , родамин, по-видимому, нечувствителен, что является тоже большим преимуществом хемолюминесцентного метода. Вес озонозонда вместе с батареями около 1 кг.

Озонозонд перед выпуском калибруется в воздухе, содержащем определенное количество озона. Небольшая продолжительность измерительного цикла позволяет делать пять-шесть измерений на 1 км подъема.

Полученная таким образом кривая зависимости $\rho_{\text{O}_3}(z)$ довольно подробна, причем отдельные точки обнаруживают небольшой случайный разброс. На рис. 5.21 представлен пример такого зондирования в Форт-Коллинзе (США). На рисунке

видны четыре перелома кривой $\rho_0(z)$, соответствующие каждый раз переломам температурной кривой — небольшим инвер-

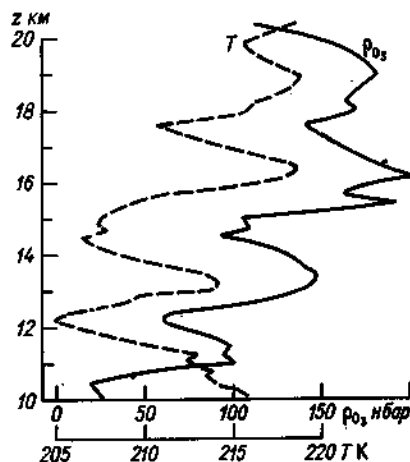


Рис. 5.21. Профиль вертикального распределения озона ρ_{O_3} и температуры воздуха T . Форт-Коллинз, США, 27 марта 1963 г.

сиям в стратосфере. Такое соответствие между кривыми $\rho_0(z)$ и $T(z)$ является независимым доказательством удовлетворительной работы зонда.

5.3. Перспективы развития специальных видов радиозондирования

Современное состояние науки и практики требует измерения новых дополнительных параметров атмосферы. Это особенно важно в связи с необходимостью усиления контроля за состоянием окружающей среды и борьбы с загрязнением атмосферы.

Атмосферные загрязнения связаны с попаданием в атмосферу первичных загрязняющих компонентов и вторичных продуктов, возникающих в результате различных химических и фотохимических реакций. Главными газовыми компонентами загрязнения являются соединения серы (SO_2 и SO_3), азота (NO , NO_2 и NH_3), углерода (CO_2 и CO), углеводородные соединения и др. В табл. 5.1 приведены данные, характеризующие примерные концентрации загрязняющих компонентов в условиях чистой и загрязненной атмосферы (в десятичных долях процента).

ТАБЛИЦА 5.1

Газовые компоненты	Концентрация	
	чистая атмосфера	загрязненная атмосфера
SO_2	10^{-3} — 10^{-2}	0,02—2
CO	1	5—200
CO_2	310—330	350—700
Окислы азота	10^{-3} — 10^{-2}	10^{-2} — 10^{-1}
Углеводородные соединения	1	1—20

Из таблицы видно, что концентрация окиси углерода и углекислого газа превосходит суммарную концентрацию всех других компонентов. Углекислый газ занимает особое место среди газовых компонентов загрязнений атмосферы. Причиной являются не только относительно большое содержание углекислого газа в атмосфере, но и особенности влияния его на перенос излучения в атмосфере. Углекислый газ обладает интенсивными полосами поглощения в инфракрасной области спектра, вследствие чего тепловое излучение атмосферы, обусловленное углекислым газом, возвращает земной поверхности большое количество лучистой энергии. Изменение его концентрации влечет за собой изменение противозлучения атмосферы, а это приводит к изменению радиационного баланса подстилающей поверхности и соответствующим изменениям теплового режима атмосферы. Оценка количественного эффекта изменения температуры атмосферы вследствие изменения концентрации CO_2 сопряжена с большими трудностями и пока остается спорным вопросом, но, по мнению многих исследователей, концентрация CO_2 непрерывно повышается вследствие бурного развития промышленности.

Исходя из вышесказанного, совершенно необходимы оперативные методы измерения концентрации CO_2 в атмосфере, которые должны быть реализованы на радиозондах. В настоящее время уже созданы самолетные газоанализаторы CO_2 и ведутся работы по созданию радиозонда.

Помимо газовых компонентов большую роль в загрязнении атмосферы играет твердый аэрозоль (пыль), который может быть как естественного (вулканический), так и индустриального происхождения. По данным самолетных измерений, содержание пыли в атмосфере увеличивается. Присутствие твердых аэрозолей оказывает большое влияние на перенос радиации в атмосфере, что опять-таки играет первостепенную роль при изменении погоды и климата. Аэрозоли, как ядра конденсации, являются главным фактором фазовых преобразователей воды в атмосфере. В настоящее время имеются приборы для измерения концентрации аэрозоля в атмосфере (пылевые зонды), но они громоздки и тяжелы и поднимаются на самолетах и аэростатах. Необходимо поэтому создание специального аэрозольного радиозонда, который позволит осуществлять измерения концентрации аэрозоля быстро и оперативно.

Мы упомянули здесь несколько видов специального зондирования, которые уже используются или находятся в стадии разработки. Однако этим не исчерпываются возможности измерений новых параметров состояния атмосферы, поэтому в будущем появятся новые оригинальные конструкции специальных радиозондов.

6 АЭРОЛОГИЧЕСКАЯ СЕТЬ СССР

Зондирование атмосферы, осуществляемое с помощью принятой в стране системы зондирования, состоящей из наземных радиолокационных средств и серийно выпускаемых радиозондов, носит название стандартных аэрологических наблюдений. В отличие от специальных аэрологических наблюдений, оно производится по унифицированной методике, определяемой соответствующими методическими пособиями (наставлениями, руководствами и методическими указаниями), обязательными для всей сети аэрологических станций страны. Если зондирование производится не по стандартной методике, результаты выпусков радиозондов получаются неоднородными и не сравнимыми друг с другом.

Аэрологической сетью называется система аэрологических станций, размещенных по территории страны в соответствии с планом построения сети, разработанным на научно-обоснованных принципах.

Аэрологическая сеть обеспечивает прогностические органы достаточной и достоверной информацией для целей прогноза погоды и оперативного обслуживания народного хозяйства страны. Аэрологическая информация должна включать в себя физические величины, характеризующие состояние атмосферы на различных высотах по всей территории страны.

6.1. Организация сети аэрологических станций

Первый выпуск радиозонда в Советском Союзе состоялся 30 января 1930 г., однако для того, чтобы результаты произведенного зондирования атмосферы могли оперативно использоваться Службой прогнозов, понадобилось около 10 лет. Разработка метода радиозондов, как оказалось, заключалась в создании не только пригодной конструкции выпускаемого в полет прибора, но и методов его градуирования и контрольных поверок, в создании рациональных методов обработки данных и способов оперативной передачи их в прогностические центры.

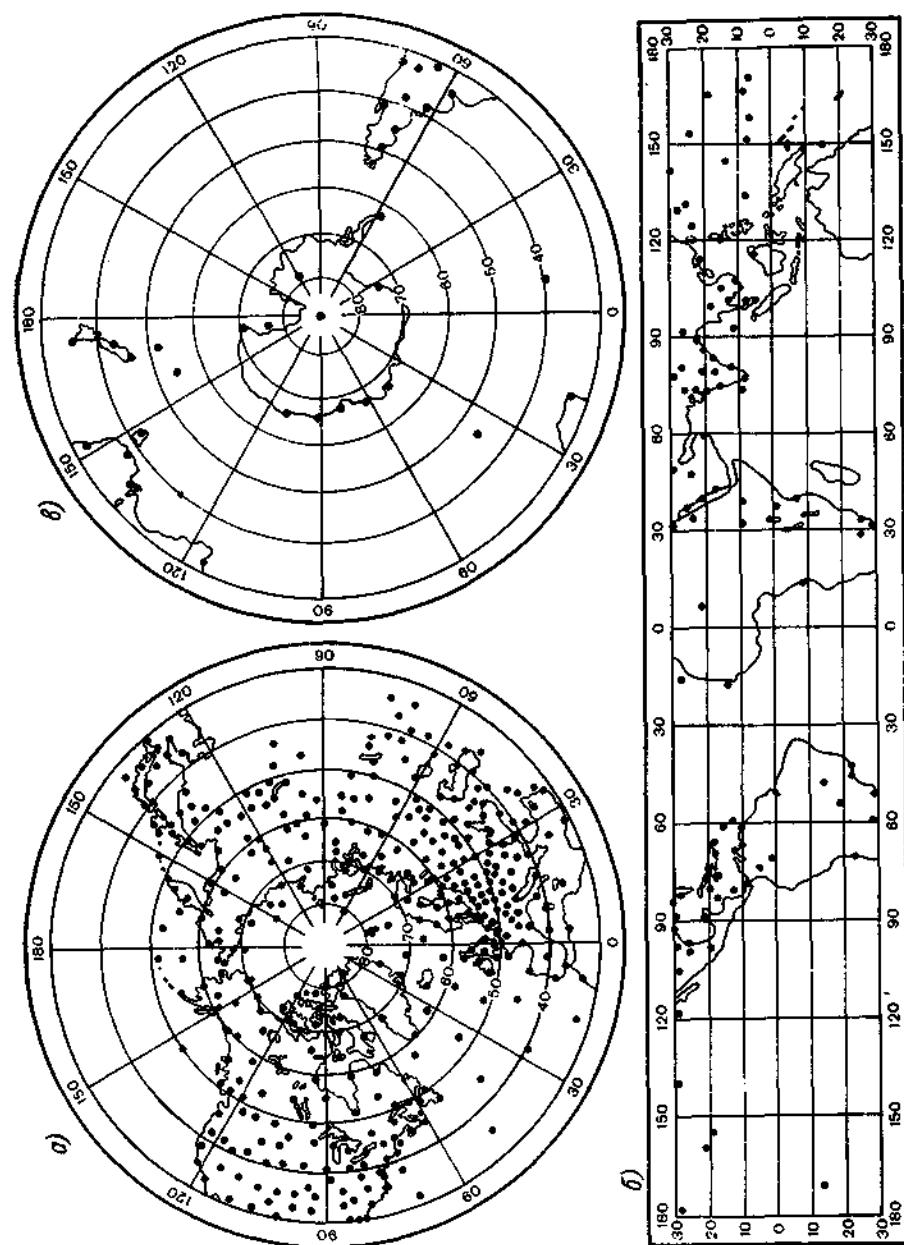
Массовое производство радиозондов Молчанова началось в 1934 г., в 1937 г. радиозонд был оснащен гигрометром, и примерно с этого времени начались регулярные выпуски радиозондов с нескольких пунктов зондирования на ЕТС. Одним из первых районов, где началось регулярное зондирование атмосферы, является Арктика. К началу Великой Отечественной войны численность аэрологических станций на территории нашей страны достигла нескольких десятков. Война нанесла огромный ущерб сети аэрологических станций, поэтому основной задачей в последние военные и первые послевоенные годы было восстановление аэрологической сети, а затем и расширение ее. Радиозонды Молчанова (РЗ-043, затем РЗ-049) выпускались до 1958 г.

В период 1956—1965 гг. произошло техническое переоснащение сети аэрологических станций СССР. Были внедрены новый кодовый радиозонд А-22-III, а затем его модификации — радиозонды А-22-IV и А-22-VII, обеспечивающие более высокую точность измерения метеорологических элементов, чем РЗ-049. В 1961—1962 гг. на сеть была внедрена система «Метеорит — РКЗ-1А», в 1968 г. радиозонд РКЗ-1А был заменен радиозондом РКЗ-2, а с 1972 г. на сеть начинают поступать радиолокационные станции «Метеорит-2» и радиозонды РКЗ-5. С 1963 г. проводится регулярное актинометрическое радиозондирование радиозондом АРЗ-1.

В течение всех этих лет росла и развивалась аэрологическая сеть страны, открывались новые станции. С 1957 г. регулярное радиозондирование атмосферы проводится в Антарктиде и с 1961 г. на океанах с научно-исследовательских судов.

Аналогичным образом развивалось радиозондирование атмосферы в других странах, и поэтому несколько лет назад Всемирная метеорологическая организация поставила перед учеными разных стран задачу создания Всемирной службы погоды (ВСП). В систему ВСП входят сеть наземных сухопутных и морских метеорологических станций, буйковые станции, глобальная система телесвязи и мировая аэрологическая сеть. На рис. 6.1 показано размещение на земном шаре действующих сейчас аэрологических станций. Общее число пунктов зондирования на земном шаре в настоящее время достигло 800, из них 700 расположено в северном полушарии. Нетрудно видеть, что плотность сети на территории земного шара далеко не одинакова, что естественно, так как большая часть его территории покрыта океанами, а полярные районы являются весьма труднодоступными. Поэтому одной из насущных задач дальнейшего развития аэрологической сети является расширение числа станций.

Здесь сразу следует отметить, что плотность аэрологической сети, охватывающей большие территории, непосредственно определяет стоимость информации.



Вопрос о плотности сети аэрологических станций должен решаться в соответствии с характерными размерами элементов атмосферной циркуляции. Характерные размеры крупномасштабных возмущений в полях метеорологических элементов составляют 500 км для малых возмущений, 1000—2000 км для больших и 2500—3000 км для очень больших. Отсюда следует, что оптимальные расстояния между аэрологическими станциями должны быть 250—300 км.

Сроки зондирования атмосферы обуславливаются тем, какие атмосферные процессы во времени и с какой подробностью требуется осветить аэрологической информацией. При прогнозе погоды наибольший интерес представляют крупномасштабные синоптические процессы, имеющие период 4—7 дней. На основе временных размерностей полупериодов интенсивных колебаний давления и температуры в атмосфере определено, что для достаточного освещения процессов колебаний давления и температуры с периодом 2—4 дня достаточен интервал зондирования, равный 12 ч, в соответствии с этим сроки 3 и 15 ч московского времени являются основными для гидродинамических и синоптических прогнозов. Для прогноза опасных явлений возникает необходимость зондирования через 6 ч в сроки 9 и 21 ч.

6.2. Современное состояние аэрологической сети СССР

Температурно-ветровое радиозондирование. Аэрологическая сеть Советского Союза в настоящее время имеет более 220 аэрологических станций, включая научно-исследовательские дрейфующие станции «Северной Полюс» и научные станции в Антарктиде. Аэрологические станции на территории СССР образуют региональные группы (областные, республиканские и др.), которые подчиняются соответствующему управлению гидрометеорологической службы (УГМС). В 1976 г. на 58 станциях производилось четырехразовое и на 112 — трехразовое температурно-ветровое зондирование, при этом для получения сведений только о ветре на 165 аэрологических станциях выпускались не только передатчики-ответчики А-35 (применение которых в настоящее время не отвечает требованиям по высоте и качеству наблюдений), но и радиозонды.

В течение последних лет было разработано несколько модификаций уголковых отражателей для ветровых наблюдений. Испытания показали, что зона захвата уголкового отражателя (до автосопровождения) даже при визуальной наводке составляет

Рис. 6.1. Мировая аэрологическая сеть.

а — северное полушарие выше 20° с. ш., б — экваториальная зона; в — южное полушарие выше 20° ю. ш.

1 км и более, а дальность сопровождения — около 60—70 км, что вызывает потери информации о ветре в приземном слое и ограничивает высоту наблюдений при значительных удалениях отражателя (при сильных ветрах). Таким образом, применение уголковых отражателей для получения сведений о ветре дает малый эффект, а при ограниченной видимости — затруднено.

В настоящее время разработан радиолокационный ответчик А-28. Ответчик представляет собой часть радиоблока радиозонда РКЗ, предназначенную для автоматического измерения и регистрации параметров ветра совместно с РЛС «Метеорит» и «Метеорит-2».

Высота радиоветровых наблюдений с помощью системы «Метеорит—ответчик А-28» значительно увеличивается и определяется практически только высотой разрыва оболочек. Дальность сопровождения обуславливается шкальной дальностью системы, в частности, для РЛС «Метеорит-2», она составляет 300 км, что очень важно для обеспечения высотной авиации информацией о струйных течениях в тропосфере и нижней стратосфере.

Проведенные испытания опытной партии ответчиков А-28 на ряде аэрологических станций (в Белоруссии и на Дальнем Востоке) показали значительные преимущества системы радиоветровых наблюдений «Метеорит—ответчик А-28» как по высоте наблюдений, так и качеству информации. Средняя высота радиоветровых наблюдений по 83 выпускам, проведенным при испытаниях, составила 31 км. В ряде УГМС уже начаты регулярные радиоветровые наблюдения с применением ответчиков А-28.

Радиолокационные системы «Метеорит» в настоящее время оснащено около 90 пунктов. В 1972 г. в Белорусском управлении гидрометеорологической службы с помощью комплекса ОКА-3 впервые была осуществлена полная автоматизация аэрологических наблюдений, в 1977 г. комплекс ОКА-3 использовался в пяти УГМС и на семи НИС. В ближайшие годы этой системой будет оснащена часть пунктов аэрологической сети.

Актинометрическое радиозондирование. Актинометрическое радиозондирование атмосферы в Советском Союзе было начато в феврале 1961 г. В 1961—1962 гг. выполнялись пробные выпуски АРЗ на базе ЦАО, а также в городах Минске, Ростове-на-Дону, Свердловске. Результаты этих выпусков подтвердили работоспособность прибора, простоту его обслуживания.

С целью получения материалов измерений параметров поля длинноволновой радиации в различных географических зонах и в разные сезоны в 1963 г. была создана экспериментальная сеть актинометрического радиозондирования атмосферы, состоящая из 8 пунктов. В 1965 г. число пунктов было увеличено до 15 (рис. 6.2), в этом же году организовано актинометрическое зондирование на судах погоды ДВНИГМИ «Ю. М. Шокальский» и «А. И. Воейков» в Тихом океане. В конце этого же года впервые было осуществлено зондирование атмосферы в Атлантическом океане на д/з «Обь», а с 1966 г. зонды АРЗ-1 выпускались на антарктической станции Молодежная. В настоящее время выпуски АРЗ-1 производятся на наземных аэрологических станциях территории СССР, на научно-исследовательских судах и в Антарктиде.

Выпуски АРЗ на наземных станциях производятся регулярно в течение года, однако на станциях, расположенных за полярным кругом, — только во время полярной ночи. На судах погоды программа актинометрического зондирования зависит от продолжительности и предполагаемого района рейса, но в большинстве случаев выпуски АРЗ производятся ежедневно во время выполнения пространственно-временных широтных или меридиональных разрезов в океане, а также во время многосуточной станции в какой-либо точке Мирового океана.

Уместно упомянуть о том, что сеть регулярного актинометрического радиозондирования атмосферы существует только в Советском Союзе и США.

В других странах, имеющих АРЗ (ФРГ и Япония), зондирование осуществляется эпизодически в одном или двух пунктах. Таким образом, массовый материал актинометрического радиозондирования, пригодный для статистической обработки, получают только в двух странах.

В 1963—1967 гг. выпуски АРЗ на сети СССР производились два раза в неделю — во вторник и пятницу. С 1968 г. программа работы была изменена, с целью уменьшения дискретности во времени станции выполняют четырехмесячные серии ежедневных выпусков АРЗ: январь, апрель, июль и октябрь. Радиозонды АРЗ выпускаются в ночной срок вместо обычного радиозонда РКЗ-2 или РКЗ-5.

Научно-исследовательские суда погоды. Самыми первыми судами погоды в СССР являются «А. И. Воейков» и «Ю. М. Шокальский». Водоизмещение этих судов составляет 3,5 тыс. т, они оборудованы аэрологическим и ракет-

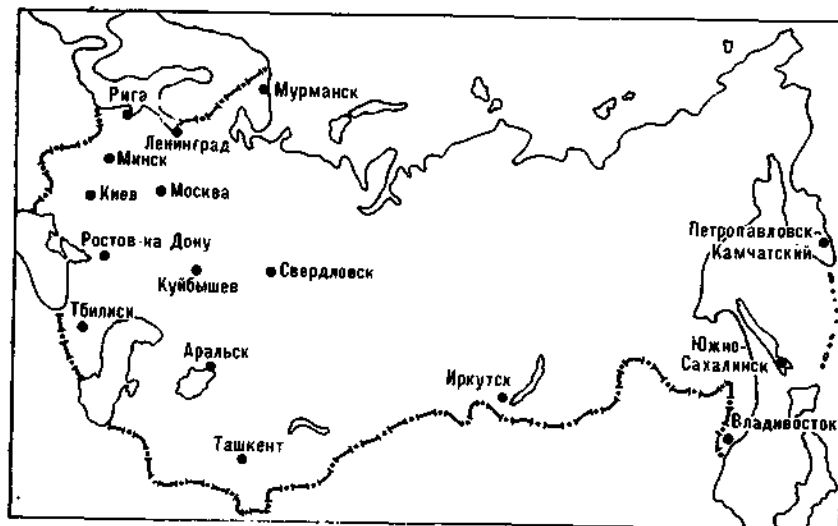


Рис. 6.2. Сеть актинометрического радиозондирования СССР.

ным комплексами. В настоящее время для Советского Союза на верфях Польши и ГДР строятся типовые суда по специальным проектам, предусматривающим особенности гидрометеорологических наблюдений на море.

Суда научно-исследовательского флота Гидрометеослужбы, оборудованные аэрологическим комплексом, по своему назначению делятся на две группы. Это научно-исследовательские суда (НИС) и научно-исследовательские суда погоды (НИСП). К научно-исследовательским судам относятся суда проекта «Муссон», построенные в ГДР. Этим судам присвоены названия в честь выдающихся ученых и академиков («Академик Королев», «Профессор Зубов» и др.), они имеют водоизмещение 6,9 тыс. т, оборудованы аэрологическим и ракетным комплексом и имеют усилители качки.

К научно-исследовательским судам погоды (НИСП) относятся суда проекта «Пассат»: «Виктор Бугаев», «Эрнст Кренкель», «Валериан Урываев», «Океан» и др. Эти суда имеют водоизмещение 4,5 тыс. т, оборудованы аэрологическим комплексом и приспособлены к оснащению ракетным комплексом.

Аэрологические наблюдения на судах осуществляются аэрологическим отрядом, штатный состав, техническое оснащение и оборудование которого должны обеспечивать производство комплекса аэрологических наблюдений в соответствии с оперативно-производственным планом ГУГМС и программой экспедиционных исследований судна, обработку результатов наблюдений и

оперативную передачу их в соответствующие органы гидрометеослужбы и другие ведомства.

Общий объем работы аэрологического отряда определяется утвержденной программой экспедиционных исследований конкретно для каждого судна, в которой указываются маршрут и продолжительность рейса, а также сроки аэрологических наблюдений.

Стандартные радиозондовые наблюдения на НИС и НИСП в соответствии с оперативно-производственным планом ГУГМС производятся в два срока: 0 и 12 ч гринвичского времени. Дополнительные выпуски радиозондов производятся в соответствии с утвержденной программой экспедиции и должны быть обеспечены дополнительным штатом наблюдателей. Радиозонды выпускаются по маршруту следования судна только за пределами территориальных вод.

Арктические и антарктические станции. Помимо постоянно действующих аэрологических станций в Арктике обычно работают несколько дрейфующих станций «Северный Полюс» (СП), на которых также ведется радиозондирование атмосферы с помощью системы «Малахит—А-22». Данные станций СП дают ценнейшую информацию о состоянии атмосферы в труднодоступных районах Арктики. На большинстве научных станций в Антарктиде также регулярно ведется зондирование атмосферы, здесь более половины станций уже оснащено системой «Метеорит-РКЗ». На антарктической станции Молодежная на базе ЭВМ «Минск-32» оборудован центр сбора и обработки данных зондирования, поступающих со всех советских станций в Антарктиде. На Молодежной внедрен комплекс ОКА-3.

6.3. Система сбора и хранения аэрологических данных

Для долговременного хранения аэрологической информации во Всесоюзном научно-исследовательском институте гидрометеорологической информации (ВНИИГМИ—МЦД) разработана система сбора и хранения аэрологических данных.

До 1978 г. сбор материалов зондирования осуществлялся следующим образом. На станциях зондирования результаты наблюдений в виде телеграмм, закодированных по коду КН-04 (для температурно-ветрового зондирования) или по коду КН-03 (для радиоветрового), заносились на перфоленду. Телеграммы перфорировались на телетайпах Т-51 на узкую перфоленду в коде МТК-2. Эти перфоленды отправлялись в региональные центры обработки, где они вводились в ЭВМ. С помощью ЭВМ осуществлялись следующие операции: раскодирование данных, вычисление характеристик влажности и высот особых точек, контроль данных и расчет средних месячных значений.

К 1978 г. в Среднеазиатском региональном научно-исследовательском гидрометеорологическом институте (САРНИГМИ) были завершены работы по созданию автоматизированной подсистемы сбора, контроля, обработки и накопления аэрологической информации. Эта подсистема позволяет вводить аэрологические данные в ЭВМ «Минск-32» непосредственно с каналов связи. Она имеет ряд преимуществ перед прежней подсистемой обработки режимной информации и позволяет исключить ручное перфорирование данных на станциях, прекратить исследова-

ние перфоленд на ЭВМ, сократить число людей, занятых на обработке и контроле аэрологических данных, а также уменьшить машинное время обработки аэрологических телеграмм. Существенно, что подсистема позволяет автоматизировать накопление и обработку зарубежной аэрологической информации, которая поступает только по каналам связи.

Автоматизированная подсистема вводится в практику работы аэрологических станций с 1 июня 1978 г. Одновременно отменяется подготовка и занесение аэрологической информации на перфоленду и ручное составление телеграммы КЛИМАТ-ТЕМП. При этом значительно повышаются требования к качеству передачи четырех частей оперативной телеграммы с аэрологической информацией в каналы связи.

Центры приема и обработки данных создаются в САРНИГМИ и во ВНИИГМИ—МЦД. Здесь аэрологические данные после контроля и обработки заносятся на магнитофильм (магнитную ленту). На выходе ЭВМ помимо магнитофильма выдаются на печать таблицы с результатами подъемов ТАЭ-16, таблицы и телеграммы КЛИМАТ-ТЕМП, а также информация о сомнительных данных.

Основные материалы радиозондирования (таблицы ТАЭ-3, ТАЭ-4а или ТАЭ-4б, а в случае необходимости и ленты регистрации сигналов радиозондов) отправляются в гидрометеорологические обсерватории (ГМО) или УГМС, где производится их критический контроль с учетом сомнительных данных, выявленных при обработке на ЭВМ. Все исправления, которые делаются в ГМО после критического контроля, с соответствующими пояснениями направляются в центры обработки для исправления информации на магнитофильме.

Проверенная и исправленная аэрологическая информация хранится во ВНИИГМИ—МЦД на долговременных носителях (микрофильмы или магнитные ленты). ВНИИГМИ—МЦД производит обмен аэрологическими данными с международными центрами данных. Аналогичным образом производится архивация аэрологических данных, поступающих с научно-исследовательских судов.

6.4. Методическое руководство и инспекция аэрологических станций

Общее руководство работой сети аэрологических станций осуществляет ЦАО, где создаются новые и совершенствуются существующие виды аэрологических наблюдений, готовятся Методические указания, совершенствуются методы обработки данных зондирования. Кроме этого, ЦАО постоянно осуществляет контроль за качеством работы аэрологических станций. Эта работа проводится обычно с помощью отделов техники и техни-

ческой инспекции гидрометеорологических обсерваторий (ГМО) или УГМС. Надзор за техническим состоянием систем зондирования и качеством обработки данных осуществляется обычно путем регулярно организуемых инспекций аэрологических станций.

Как указывалось выше, в настоящее время автоматизируются многие разделы аэрологических наблюдений. Система «Метеорит—РКЗ» в комплексе с приставкой ОКА-3 обеспечивает автоматический прием и автоматическую регистрацию и обработку данных зондирования. В Территориальных гидрометеорологических центрах (ТГМЦ) и во ВНИИГМИ—МЦД автоматизированы процессы обработки режимной информации и составления ежегодников. Внедрение автоматизации позволило сократить время обработки информации, а отсюда повысить оперативность обслуживания народного хозяйства. Однако необходимая точность приборов и средств, составляющих систему зондирования, обеспечивается только при условии строгого выполнения правил их установки, настройки и эксплуатации.

Опыт проверки работы сети показывает, что наиболее ответственным звеном в системе «Метеорит» — РКЗ является радиолокационная станция. На аэрологических станциях необходимо тщательно выполнять операции по подготовке РЛС к работе: горизонтирование, ориентирование, выставление нулей шкал дальности и углов и др. Несоблюдение этих правил приводит к значительному снижению точности, а иногда и к браку результатов зондирования.

Машинный контроль результатов зондирования, осуществляемый в ТГМЦ при составлении таблиц ТАЭ-16А, не выявляет ошибок, вызванных неправильной установкой РЛС или ее неудовлетворительным техническим состоянием. Для выявления ошибок такого рода ежемесячно осуществляется критический просмотр и проверка подлинных (первичных) материалов зондирования (ленты регистрации, таблицы выпуска, графики обработки, книжки КАЭ-3). Методика проведения критического контроля изложена в соответствующих разделах Наставления. Обычно критический просмотр материалов зондирования проводится выборочно в объеме 10% общего количества наблюдений в месяц. Рекомендуется включать в этот объем в первую очередь результаты таких зондирований, которые вызывают сомнения. Особое внимание нужно уделять анализу ленты регистрации, так как плохое качество сигналов (разброс) свидетельствует о плохой работе станции. Внимательный анализ кривой высоты дает возможность выявить ошибки в измерении вертикального угла и наклонной дальности. Большую помощь при критическом просмотре результатов зондирования оказывает сравнение высот изобарических поверхностей и тропопазы над проверяемой станцией и над соседними пунктами за те же сроки. При обнаружении ошибок немедленно организуется внеочередная инспекция с целью проверки и ликвидации неисправностей на месте. Результаты критического просмотра материалов зондирования служат основой при оценке качества наблюдений аэрологической станции.

Методическое руководство работой сети аэрологических станций, осуществляемое ГМО, УГМС и ЦАО, в основном сводится к следующему:

- внедрение на сети новых методов наблюдений, наставлений, методических указаний и др.;
- проведение методических инспекций аэрологических станций, рекомендуется совмещать методическую и техническую инспекции;

— критический просмотр первичных материалов зондирования с целью выявления методических ошибок и контроля технического состояния средств зондирования;

— организация и проведение регулярного контроля за качеством данных температурно-ветрового зондирования по картам барической топографии в бюро погоды;

— участие в подготовке режимной информации, взаимодействие с ТГМЦ по вопросам анализа забракованных результатов наблюдений, а также по вопросам эксплуатации комплекса ОКА-3;

— оценка качества наблюдений по станциям, составление методических писем, ведение разъяснительной переписки по методическим вопросам, составление обзора работы аэрологической сети по полугодиям;

— проведение стажировок инженеров-аэрологов и обучение их новым методам зондирования;

— контроль и участие в обеспечении аэрологических станций необходимыми приборами и расходными материалами;

— контроль и участие в организации своевременной поверки табельных приборов (контрольно-измерительных, метеорологических и аэрологических).

6.5. Перспективы развития аэрологической сети СССР

Бурное развитие народного хозяйства в нашей стране предъявляет все более высокие требования к гидрометеорологической информации, в частности к аэрологическим наблюдениям. Повышаются требования к точности измерения основных параметров атмосферы (давления, температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра), а также к оперативности получения аэрологической информации и передачи ее прогностическим органам.

Для успешного решения этих задач Гидрометеорологическая служба нашей страны в настоящее время перешла к осуществлению технической реконструкции и созданию комплексной автоматизации службы.

Тщательный анализ изменчивости метеорологических параметров позволяет ставить вопрос о регулировании частоты сроков зондирования атмосферы в зависимости от пространственно-временной изменчивости метеозадающих элементов, изученной на основе многолетних наблюдений.

Очень важной, но еще не вполне решенной проблемой является увеличение высоты, достигаемой радиозондами. В настоящее время прогностические органы требуют сведения о температуре и ветре до высот не менее 30 км. Результаты проверки показали, что летом необходимой высоты радиозонды достигают лишь примерно в 30%, а зимой и того меньше — в 23% случаев. Для повышения высоты необходимо совершенствовать организацию и методы работы на аэрологических станциях, а также добиваться повышения качества оболочек.

В перспективе предполагается решить задачу о дальнейшем повышении точности измерения температуры и влажности. Это можно осуществить, уменьшив массу радиозонда и его энерго-

питание на базе применения современных микрополупроводниковых элементов (микрозонд). Уменьшение массы и размера радиозонда связано с самой перспективой существования метода в связи с повышением загрузки воздушного пространства авиацией. Одновременно возникает возможность повышения быстродействия зондирования за счет подъема малогабаритного зонда на скоростных шарах.

В настоящее время в ЦАО разработаны макеты микрозондов, которые проходят лабораторные и полевые испытания, и образцы кулонометрических и оксидно-алюминиевых датчиков влажности.

В заключение можно отметить, что задача классической аэрологии — измерение температуры, давления, влажности и ветра в свободной атмосфере — решается сейчас вполне успешно. В то же время непрерывно растущие требования науки и народного хозяйства вынуждают совершенствовать методы и средства аэрологических наблюдений, расширять число измеряемых параметров (озон, аэрозоль и др.).

Неизбежное усложнение, а значит, и удорожание современных технических систем указывают на необходимость изыскания возможных путей снижения стоимости наблюдений без снижения качества и уменьшения объема информации. Научно обоснованный подход к решению этой проблемы состоит в разработке автоматизированной сети с управляемой частотой и плотностью наблюдений. Устранение при этом избыточной информации приведет также к значительному экономическому эффекту.

7 ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ АЭРОСТАТОВ

Аэростаты — летательные аппараты легче воздуха, к ним относятся свободные аэростаты, привязные аэростаты и дирижабли. Особую группу составляют автоматические дрейфующие аэростаты, широко используемые для исследования высоких слоев атмосферы.

Отличительной и важнейшей чертой свободных аэростатов является их перемещение вместе с воздушной массой. Это позволяет исследовать движущийся воздух в течение длительного времени.

Начало использования аэростатов для исследования атмосферы относится к прошлому веку, однако широкое развитие научное воздухоплавание получило только в последние годы. Из работ, проводившихся в этом направлении, нужно выделить экспериментальные исследования, выполненные на свободных аэростатах ЦАО. За период 1940—1952 гг. аэростаты ЦАО совершили около 150 полетов, большинство из которых проходило в нижней тропосфере. Основной целью полетов было проведение исследований зависимости трансформации воздушных масс от термодинамических и радиационных факторов, изучение структуры и эволюции атмосферных фронтов и физико-синоптических условий образования облаков и осадков. Экспериментальные полеты свободных аэростатов с экипажами создали предпосылки для разработки конструкций автоматических аэростатов различного типа, использующихся для исследования атмосферных процессов в настоящее время.

7.1. Основные сведения об аэростатах

Аэростатом называется летательный аппарат, подъемная сила которого создается за счет аэростатического принципа, основанного на законе Архимеда. Для получения подъемной силы оболочку аэростата наполняют газом, удельный вес которого

меньше удельного веса воздуха. Свободная подъемная сила аппарата Y определяется выражением

$$Y = A - G, \quad (7.1)$$

где A — архимедова сила, равная весу вытесненного воздуха и направленная снизу вверх; G — вес всей системы аэростата.

Условием подъема аэростата является неравенство действующих на него сил: $A > G$. Аэростат поднимается до высоты, где его вес становится равным весу вытесненного им воздуха. Таким образом, равенство $A = G$ служит условием «плавания аэростата» на каком-либо уровне. Если необходимо подняться выше, с аэростата сбрасывают балласт. Для спуска аэростата из его оболочки выпускают газ.

Конструктивная схема аэростатов следующая: оболочка, подвесная система, гондола или приборный контейнер.

Оболочка выполняет роль резервуара для подъемного газа и одновременно является основным силовым элементом конструкции, воспринимающим статические и динамические нагрузки.

Конструктивно оболочка аэростата может быть открытой, закрытой или полужакрытой. В первом случае внутренний объем оболочки сообщается с атмосферой через так называемый пилотажный аппендикс, служащий для выпуска избытка газа.

Во втором случае оболочка закрыта, и внутри нее создается определенное сверхдавление. В оболочках полужакрытого типа величину сверхдавления можно регулировать с помощью газового клапана. Во всех случаях оболочка наполняется газом через аппендикс.

Техническая эффективность аэростата, т. е. его способность достичь определенной высоты и совершить дрейф заданной продолжительности с полезным грузом определенного веса, во многом зависит от материала оболочки.

Особое значение имеют прочностные, весовые и оптические характеристики материала оболочки. В настоящее время оболочки изготавливаются из нерастяжимых пленочных материалов типа полиэтилена или полиэтилентерефталата, имеющих небольшой удельный вес и высокую прочность.

Некоторые характеристики пленочных материалов представлены в табл. 7.1.

ТАБЛИЦА 7.1

Характеристика	Полиэтилен		Полиэтилен-терефталат
	низкого давления	высокого давления	
Плотность, г/м ³	0,94—0,96	0,92—0,93	1,93
Теплостойкость, °C	—	—	150
Температура плавления, °C	120—139	108—110	265
Морозостойкость, °C	ниже —70	ниже —70	ниже —60
Прочность при разрыве, кг/см ²	220—450	120—160	2500
Диэлектрическая постоянная	2,1—2,4	2,1—2,4	3,0—3,2

Толщина пленок, используемых для оболочек, колеблется в пределах 15—60 мкм для полиэтилена и 6—25 мкм для полиэтилентерефталата.

Важны оптические свойства материала оболочки, влияющие на перегрев ΔT газа, содержащегося в оболочке, в процессе дрейфа аэростата:

$$\Delta T = T_r - T_v, \quad (7.2)$$

где T_r — температура газа, T_v — температура окружающего воздуха.

Передача тепла в системе оболочка—подъемный газ идет от оболочки, изменение температуры которой определяется уравнением вида

$$c_{006} g_{006} \frac{dT_{006}}{dt} = Q_1 + Q_2 - Q_3 - Q_4 - Q_5, \quad (7.3)$$

где c_{006} — теплоемкость материала оболочки; g_{006} — масса 1 м² оболочки; S — площадь поверхности оболочки, соприкасающейся с газом; T_{006} — температура оболочки; t — время; Q_1 — приток тепла в результате поглощения солнечной радиации; Q_2 — приток тепла вследствие поглощения длинноволновой радиации; Q_3 — расход тепла за счет излучения оболочки; Q_4 — расход тепла в результате теплоотдачи в окружающий воздух; Q_5 — расход тепла за счет теплоотдачи газу в оболочке.

Уравнение (7.3) показывает, что температура оболочки зависит от теплового баланса и теплофизических характеристик материала оболочки. Чем меньше перегрев газа в оболочке, тем более благоприятны условия для дрейфа аэростата.

Аэростатные пленки в зависимости от толщины пропускают 50—90% энергии в длинноволновой части спектра и 95—98% энергии в видимой части спектра. Селективность пропускания радиации имеет весьма существенное значение при оценке влияния внешних условий в разное время суток на дрейф и летно-технические характеристики аэростатов.

Сохранение свободной подъемной силы зависит также от газопроницаемости материалов оболочек, т. е. от способности пленки пропускать газ, имеющий различное парциальное давление по обе стороны пленки, в направлении от большего парциального давления к меньшему. Если оболочка аэростата наполнена водородом или гелием, то в окружающую среду уходит подъемный газ, а внутрь оболочки поступает атмосферный воздух. Данные о водородопроницаемости пленочных материалов за сутки при температуре 15°C приведены в табл. 7.2. Из таблицы видно, что газопроницаемость пленочных материалов, обусловленная диффузией газа, очень небольшая. Значительно важнее потеря газа через микроотверстия в оболочке вследствие ее механических повреждений или дефекта производства. В этом случае не представляется возможным указать среднее значение для утечки газа, скорость которой пропорциональна сверхдавлению в оболочке.

ТАБЛИЦА 7.2

Толщина, мкм	Водородопроницаемость, л/(м ² ·сут)	Толщина, мкм	Водородопроницаемость, л/(м ² ·сут)
Полиэтилен		Полиэтилентерефталат	
30	12,5	10—12,5	3,4
40	8,5	20—25	1,5—2,0
60	6,2		

Наличие микроотверстий приводит к изменению объема газа и вследствие этого к нарушению статического равновесия аэростата и уменьшению высоты дрейфа. Учет возможной утечки через микроотверстия приобретает решающее значение при оценке максимальной продолжительности дрейфа аэростатов, особенно аэростатов с закрытыми оболочками.

Свободные аэростаты разделяются на две группы: аэростаты, предназначенные для полетов в тропосфере, и субстратостаты — для полетов в нижней

части стратосферы. Конструкции аэростатов и субстратостатов несложны, их различие в основном заключается в объеме оболочек. Схема свободного аэростата приведена на рис. 1.2.

Оболочки аэростатов изготавливаются сферической формы, чтобы при наименьшей поверхности, а следовательно, и наименьшем весе они имели наибольший объем.

Оболочки аэростатов для подъема с наблюдателем раньше изготавливались из специальных баллонных материй, которые, обладая высокими прочностными характеристиками, отличались малой газопроницаемостью и достаточной легкостью. В настоящее время оболочки аэростатов изготавливаются главным образом из синтетических пленок, некоторые характеристики которых были приведены выше.

Гондола присоединяется к оболочке аэростата с помощью подвесной системы. Существует несколько типов подвесных систем. В первых конструкциях подвеска гондолы аэростата осуществлялась при помощи сети, надеваемой на верхнюю часть оболочки. От сети шли спуски и стропы к гондоле аэростата. Преимуществом такой подвесной системы является равномерное распределение нагрузки на верхнюю часть оболочки. Ее неудобства — сложность старта, особенно при сильном ветре, а также значительный вес.

В более поздних конструкциях аэростатов подвеска гондолы осуществляется при помощи параболического пояса и системы спусков и строп. Верхняя часть параболического пояса пришивается к оболочке аэростата на расстоянии $\frac{1}{3}$ от ее нижней точки. Нижняя часть пояса представляет собой ряд сходящихся параболических вырезов, по периметру которых в материи заделан стальной трос. В местах пересечения параболических вырезов трос пропускается в металлические кольца, к которым присоединяются тросовые спуски, переходящие далее в подвесные стропы, а к ним крепится гондола.

Стратостаты, применявшиеся для полетов с людьми, существенно не отличаются по своей конструкции и летным качествам от обычного свободного сферического аэростата, за исключением объема оболочки и конструкции гондолы.

Герметическая гондола стратостата представляет собой изолированное от внешней среды помещение, в котором размещается экипаж, научное оборудование и органы управления механизмами стратостата. Конструкция гондолы обеспечивает герметичность и безопасность полета на любых высотах, проведение наблюдений и измерений в полете, а также надежность работы механизмов управления стратостатом.

Все гондолы, которые применялись ранее для полетов стратостатов, имели шаровую форму, которая является наименее выгоднейшей для сосудов, имеющих избыточное внутреннее давление.

Одной из основных характеристик стратостатов является их высотность. Для достижения больших высот вес стратостата должен быть как можно меньшим. Уменьшение веса может быть достигнуто за счет изготовления оболочки из легких материалов, снижения запаса прочности, обеспечения спуска без посадочного балласта и проведения полета без людей. Наиболее полно удовлетворяют этим условиям автоматические стратостаты.

7.2. Автоматические стратостаты

Автоматическим стратостатом называется стратостат, управление полетом и работой аппаратуры которого осуществляется автоматически.

Управление полетом автостратостата (т. е. его подъем на заданную высоту, полет), научные измерения и регистрация их результатов тем или иным способом, а также спуск приборов на землю производятся при помощи устройств, расположенных на борту стратостата и работающих автоматически по заданной

программе или управляемых с земли. Применение радиолокационных средств и самолетов для сопровождения автостратостатов во время полетов обеспечивает нахождение приборов после спуска их на землю и позволяет применять приборы, результаты измерений которых пока не могут быть переданы по радио. К таким измерениям относятся: исследование космических лучей, состава атмосферы путем забора проб воздуха, оптических характеристик стратосферы и др.

К преимуществам эксплуатации автостратостатов следует отнести хорошие высотные характеристики при значительном весе полезного груза и меньшую стоимость по сравнению с другими средствами исследования атмосферы. Это обеспечило широкое использование автостратостатов в СССР и за границей.

Автостратостаты можно разделить на два основных типа: 1) с оболочкой постоянного объема, 2) с оболочками переменного объема.

Один из вариантов автоматических стратостатов первого типа был разработан по проекту М. И. Волкова. Оболочка автостратостата объемом 28400 м^3 была изготовлена из легкой шелковой материи весом 60 г/м^2 . Во время полета в заданный момент времени при помощи клапанных устройств газ из оболочки выпускался в атмосферу. За счет скоростного напора воздуха во время спуска автостратостата оболочка при помощи стягивающей системы превращалась в парашют и вместе с аппаратурой опускалась на землю. Впервые полет автоматического стратостата был осуществлен в 1948 г.

В последние годы вместо матерчатых оболочек для автоматических стратостатов стали применять оболочки из пластических материалов, которые значительно легче и дешевле. В качестве такого материала широко используют полиэтилен, а в последнее время — майлар. В автостратостатах с оболочками из пластических пленок спуск аппаратуры на землю осуществляется на матерчатых парашютах. Отцепка от автоматического стратостата аппаратуры с парашютами в заданный момент времени производится либо при помощи специальных устройств, находящихся на борту автостратостата, либо при помощи устройств, управление которыми осуществляется с земли.

Автостратостат второго типа был разработан в ЦАО по предложению Г. И. Голышева, Т. М. Кулинченко, А. С. Масенкиса. В этом типе автостратостата вместо матерчатой оболочки используются растягивающиеся латексные оболочки (рис. 7.1).

Латексные оболочки гроздьями крепятся к центральной стропе с помощью специальных стропок. Расстояние между гроздьями выбрано с таким расчетом, чтобы на максимальной высоте полета расширившиеся оболочки не повредили друг друга. В аппендиксы оболочек устанавливаются клапаны, ко-

торые на избранной высоте полета выпускают избыток газа из оболочек и переводят стратостат в горизонтальный полет. Если полет проводится на максимальную высоту, клапаны в оболочки не ставятся. Разрушение части оболочек во время подъема приводит к уменьшению свободной подъемной силы, и этот процесс происходит до тех пор, пока не прекратится

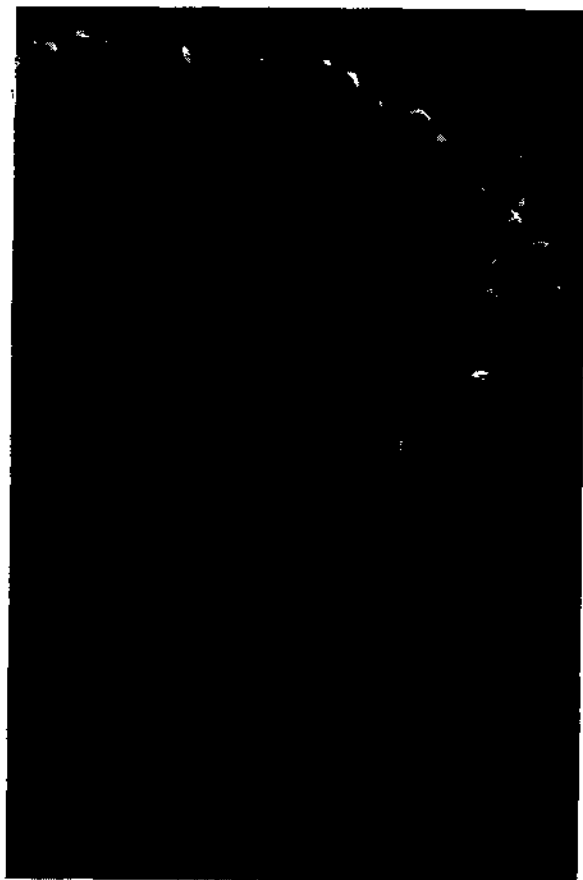


Рис. 7.1. Автоматический стратостат системы ЦАО в полете.

подъем. Во время подъема автостратостатов днем в стратосфере температура газа в оболочке будет всегда выше температуры окружающего воздуха. При подходе автостратостата к зоне равновесия вследствие уменьшения скорости подъема перегрев газа возрастает, что создает условие устойчивого равновесия автостратостатов в стратосфере. Уравновешивание автоматического стратостата во время полета производится при помощи балластосбрасывающих устройств. Отделение аппаратуры с парашютом от подвесной системы производится специальными

приспособлениями. На рис. 7.2 показана предстартовая подготовка автоматического стратостата ЦАО.

Выбор того или иного типа автостратостата определяется программой научно-исследовательских задач полета и необходимым для этого режимом полета. Наряду с применением зондирующих систем в последние годы для изучения воздушных течений на различных высотах производятся запуски автоматических аэростатов постоянного объема. Их траектория про-

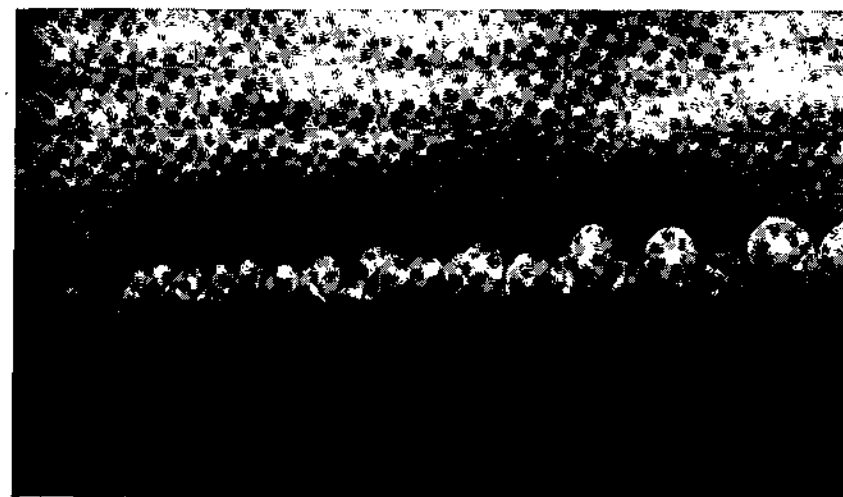


Рис. 7.2. Предстартовая подготовка автоматического стратостата ЦАО.

слеживается с помощью спутников. Дрейфующие аэростаты запускаются главным образом в южном полушарии и дают сведения о ветре над океанами, где аэрологические данные практически отсутствуют. Большим достоинством автоаэростата постоянного объема является его способность длительно дрейфовать на приблизительно постоянном уровне (до месяца и более).

7.3. Привязные аэростаты

Для подъема научных приборов и наблюдателей с целью исследований ряда характеристик нижнего слоя атмосферы используют привязные аэростаты (рис. 7.3).

Преимуществом этого метода исследований является возможность длительных измерений на нескольких уровнях от земли до высоты подъема аэростата. Привязные аэростаты позволяют проводить детальные исследования нижнего слоя атмосферы. В зависимости от объема аэростаты применяются для подъема приборов или для подъема наблюдателей с научным оборудованием. На привязном аэростате с наблюдателями про-

водятся исследования особенно низких облаков и туманов, дальности видимости и др.

В отличие от свободного аэростата, перемещающегося вместе с воздушным потоком, привязной аэростат удерживается при помощи троса, и воздушный поток обтекает его. Кроме подъемной силы, создаваемой газом в оболочке аэростата, т. е. статической подъемной силы, на привязной аэростат действует динамическая сила, возникающая за счет потока воздуха. Для того чтобы уменьшить силу лобового сопротивления, оболочки привязных аэростатов изготавливают удобообтекаемой формы. Устойчивость аэростата достигается благодаря стабилизаторам и системе подвески к тросу. Если продольная ось аэростата будет параллельна воздушному потоку, то возникает дополнительная аэродинамическая подъемная сила. Величина аэродинамической подъемной силы зависит от угла атаки, т. е. от угла между продольной

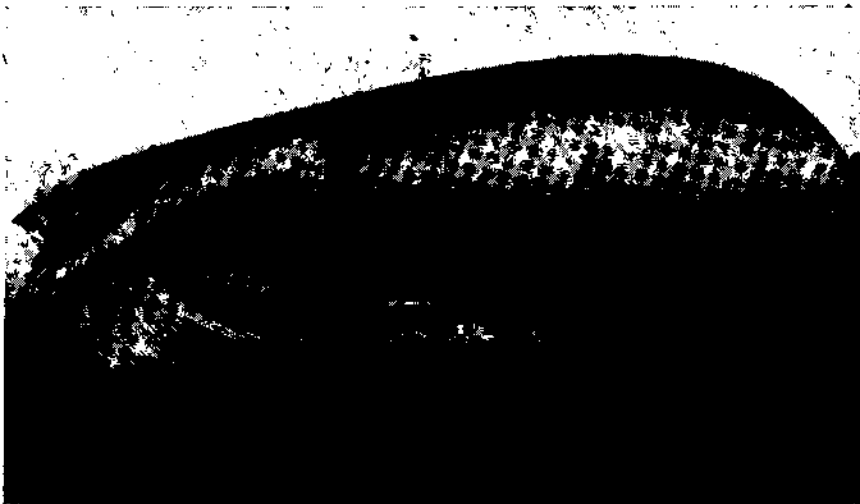


Рис. 7.3. Привязной аэростат.

осью аэростата и горизонтом. Наибольшей величины аэродинамическая подъемная сила достигает при углах атаки, равных $5-7^\circ$. При дальнейшем увеличении углов атаки аэродинамическая сила растет меньше, чем сила лобового сопротивления, т. е. горизонтальная составляющая, в связи с чем увеличивается снос аэростата и высота подъема уменьшается.

Важной характеристикой привязных аэростатов является сохранение удобообтекаемой формы. Сохранение формы аэростата во время подъема и спуска при изменении температуры газа и скорости ветра является сложной задачей и достигается путем применения стягивающих систем и воздушных баллонетов. При помощи привязных аэростатов производятся детальные исследования температуры, давления, влажности воздуха, скорости и порывистости ветра, их изменений во времени, процессов распада инверсий и др. Регистрация указанных основных метеорологических элементов обеспечивается аэростатным метеорографом. Аэростатный метеорограф подвешивается на стропе на достаточном удалении от оболочки или на тросе, удерживающем аэростат.

В последние годы были разработаны приборы для забора облачных капель, измерения водности облаков, вертикальных порывов ветра, применение которых значительно расширяет использование привязных аэростатов для научно-исследовательских целей.

Самолет предоставляет широкие возможности для осуществления разнообразных исследований атмосферы. Важность самолетных измерений в наши дни состоит в том, что современный самолет является комплексной летающей лабораторией, оснащенной разнообразной измерительной аппаратурой. На таком самолете появляется возможность одновременно производить измерения ряда характеристик атмосферы. В оперативности получения результатов измерений самолет уступает радиозонду, но значительно превосходит его по информативности результатов зондирования.

8.1. Применение самолетов для зондирования атмосферы

В связи с широким распространением метода радиозондирования самолетное зондирование атмосферы для оперативных целей не производится. Сеть самолетного зондирования прекратила свое существование около 20 лет назад. В наши дни самолет используется для исследования атмосферы в качестве летающих лабораторий, работающих по специальной программе. Особенное значение имеет самолет для изучения облачных систем, инверсий, зон турбулентности и других особых явлений в тропосфере. Зачинателем комплексных исследований атмосферы с помощью самолета является Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, который организовал на самолете Ил-14 первую в нашей стране комплексную летающую лабораторию. В течение нескольких лет, начиная с 1948 г., на таких самолетах производились исследования состояния тропосферы полярных районов как в Арктике, так и в Антарктике.

В настоящее время в Советском Союзе и за рубежом в качестве летающих лабораторий используются разнообразные

самолеты. В СССР кроме самолетов-лабораторий Ил-18 ГГО и ЦАО для исследования атмосферы используются самолеты Ил-14, принадлежащие Украинскому научно-исследовательскому гидрометеорологическому институту (УкрНИГМИ). Обычно летающие лаборатории бывают специализированными по профилю института, например, Ил-18 ЦАО в большей степени предназначен для исследования облаков, газового состава, радиации и турбулентности атмосферы, а Ил-18 ГГО — для интегральных и спектральных радиационных исследований.

Характерными объектами для самолетных исследований могут явиться атмосферные образования различных масштабов, от отдельных облачных образований до систем, связанных с тропосферными фронтами и циклонами.

Разнообразные задачи исследований требуют проведения самолетных измерений в различных режимах полета. При этом возможны одиночные полеты, выполняемые одним самолетом, и парные, выполняемые двумя самолетами — летающими лабораториями, а также многосамолетные операции.

Одиночный полет самолета состоит из нескольких этапов с различными режимами полета: подлет к месту работы, вертикальное зондирование в намеченном районе работы, полет к аэропорту базирования. При подлете к району зондирования и на обратном пути к аэропорту базирования выполняются измерения на одном или двух горизонтальных эшелонах. При этом желательно, чтобы набор высоты до намеченного эшелона и снижение при посадке занимали наименьшее количество времени. Вертикальное зондирование выполняется с целью получения вертикальных профилей измеряемых параметров атмосферы, при этом самолет летит ступенями, т. е. делает площадки на различных уровнях. Начальный этап вертикально-горизонтального зондирования может проходить или у земной поверхности, или на максимальной высоте полета, т. е. зондирование может вестись или снизу вверх, или сверху вниз. Оптимальное время работы на площадке составляет 10 мин, оптимальный шаг высоты 500—1000 м, т. е. 100, 500, 1000, 1500, 2000 м и далее через 1000 м до максимальной высоты.

Для проведения вертикально-горизонтального зондирования двумя самолетами необходимо, чтобы оба самолета имели одинаковые скорости и дальности полета. Обычно при выполнении парных полетов самолеты совершают облеты исследуемого района и выполняют вертикальное зондирование в двух разных точках. При этом желателен следующий порядок работы. Оба самолета совершают подлет к точке 1 зондирования по одному маршруту параллельными курсами на разных эшелонах (например, 5000 и 7000 м). В точке 1 один из самолетов начинает выполнение вертикального зондирования, а второй летит к точке 2 и выполняет зондирование в точке 2 по той же схеме. Первый самолет, закончив зондирование, перелетает в точку 2 и далее

оба самолета возвращаются на базу из точки 2 вновь параллельными курсами на разных эшелонах.

При выполнении координированных полетов двух самолетов по общей программе обязательно должна быть обеспечена сравнимость результатов измерений одних и тех же параметров на разных самолетах. С этой целью проводятся специальные полеты для сравнения аппаратуры. Желательно выбрать для сравнения район с однородной подстилающей поверхностью и наиболее простыми условиями погоды. При выполнении сравнительных полетов самолеты встречаются в намеченном районе и совершают полет параллельными курсами на одной и той же высоте по возможности ближе друг к другу. Оптимальное время полета 20—30 мин.

При наличии достаточно плотной и интересной для исследования облачности в районах зондирования схема вертикального зондирования обычно планируется с учетом выполнения дополнительных площадок на верхней и нижней границах облачного слоя и в облаках. Возможны следующие варианты.

Если в районе зондирования наблюдаются облачные слои, вертикальной протяженностью менее 500 м, самолет выполняет дополнительные горизонтальные площадки на верхней и нижней границах облачного слоя. Если эти уровни отличаются от стандартных уровней зондирования не более чем на 100 м, допускается пропуск соответствующего стандартного уровня. Если в точке зондирования наблюдается мощная фронтальная облачность вертикальной протяженностью более 500 м, зондирование облаков проводится по следующей схеме: площадки на верхней и нижней границах облаков и дополнительные площадки в облаках с шагом по вертикали 500 м. Если дополнительные площадки отличаются от стандартных уровней зондирования не более чем на 100 м, допускаются пропуски соответствующих стандартных уровней.

8.2. Оборудование самолетов — летающих лабораторий

Летающие лаборатории оборудуются комплексом приборов, позволяющих измерять различные параметры атмосферы. В табл. 8.1 приводятся характеристики аппаратуры, установленной на Ил-18 ЦАО. Внешний вид датчиков, прикрепленных к борту самолета, показан на рис. 8.2.

На рис. 8.1 показан салон летающей лаборатории (самолет Ил-18). Дадим краткое описание основных приборов (рис. 8.2).

1. Измерение температуры, давления и барометрической высоты полета. Температура наружного воздуха измеряется с помощью термометров сопротивления различных конструкций. В электрометеорографе ЦАО используется экранированный термометр конструкции Зайцева—Ледоховича, а в центре ЦСВ-1М используется термометр полного торможения П-5.

Тип прибора	Измеряемая величина	Принцип действия	Диапазон измерений	Средняя квадратическая погрешность
Радномыслотмер РБ-17	Высота	Раднотехнический	0—17 000 м	±25 м
Комплекс измерений ветра	Зональная и meridionalная составляющие скорости ветра	Донепровские	0—200 км/ч	±1 м/с
Ретисатор прозрачно-сти обдува	Показатели осадочных ветрового излучения в облаках	Фотоэлектрический базис	3—300 км ⁻¹	5—20%
Фотопаратура (АФА-41)	—	—	—	—
Кухнометрический газ-зоанализатор CO ₂	Концентрация CO ₂	Кухнометрический	0,001—0,1%	±5%
Самолетный гидрометр ЦАО с ОАД и кучомер «Байкал-3»	Влажность	Сорбционный	0,0003—30 г/м ³	±4%
Лазерный локатор-поляриметр	Коэффициенты отражения подстилающей поверхности	Лазерная локация	0,02—1	±10%

Тип прибора	Измеряемая величина	Принцип действия	Диапазон измерений	Средняя квадратическая погрешность
Электрометеорограф	1. Температура 2. Давление 3. Высота 4. Скорость	Термометр сопротивления Манометрический	+40...-60°C 1050—200 мбар 0—10 000 м 250—2500 км/ч	±0,5°C ±1 мбар — —
ЦСВ-1М	Концентрация N и спектр разрывов сверхкрупных частиц с r > 75 мкм	Фотоэлектрический	r = 75...3000 мкм N = 0...12 000 м ⁻³	— —
Метеорологический радиолокатор	Радиолокационные параметры облачности	Пассивная радиолокация	—	—
Аэрозольный комплекс	Концентрация радиационных аэрозолей в воздухе	Отбор проб, определение радиоактивности проб	10 ⁻¹² к/кг по радиону	±10—15%
Радиационный комплекс	Составляющие радиационного поля земля-атмосфера, нисходящие и восходящие потоки	Термометрический	0,3—3,0 мкм 3,0—30,0 мкм	±5%



Рис. 8.1. Салон летающей лаборатории Ил-18 ЦАО.



Рис. 8.2. Крепление датчиков к фюзеляжу самолета.

Измерение температуры основано на использовании зависимости сопротивления металлической нити от температуры. Эта зависимость может быть описана выражением

$$R_t = R_{t_0} [1 + \alpha (t - t_0)], \quad (8.1)$$

где t_0 — начальное значение температуры, t — текущее значение температуры, R_{t_0} — сопротивление нити при t_0 , R_t — сопротивление нити при t , α — температурный коэффициент сопротивления.

Для непрерывного измерения температуры термометр сопротивления включен в одно из плеч неравновесного измерительного моста. Регистрирующие приборы, гальванометрический приемник оптического самописца К4-51 и микроамперметр блока измерительных мостов включены последовательно в диагональ измерительного моста.

Так как $t - t_0 = (R_t - R_{t_0}) / \alpha R_{t_0}$, то при $t_0 = 0^\circ\text{C}$ и $1/\alpha R_{t_0} = \text{const}$ (параметр термометра сопротивления) $t = k(R_t - R_{t_0})$, где $k = 1/\alpha R_{t_0}$.

Датчик температуры смонтирован на выносном кронштейне консольного типа. Кронштейн крепится шестью болтами к дюралюминиевой заглушке иллюминатора. Датчик температуры представляет собой платиновый термометр сопротивления, помещенный в обтекатель конструкции Зайцева—Ледоховича. На крестовидном каркасе намотана платиновая проволока диаметром 50 мкм. Длина рабочей части каркаса 60 мм. Сопротивление термометра 60—90 Ом. Термометр имеет радиационную защиту в виде латунного никелированного цилиндра, одетого на каркас. Вместе с радиационным защитным цилиндром термометр помещен в алюминиевый обтекатель. На обтекатель на расстоянии пяти диаметров от его носика имеются две боковые проточки для забора наружного воздуха. Хвостовик обтекателя выполнен в виде конфузора, что обеспечивает засасывание воздуха через боковые проточки во внутреннюю полость.

Индикаторная воздушная скорость самолета — разность скоростного напора и статического давления — измеряется трубкой Пито и встроенными в самописцы К4-51 манометрическими узлами. В системе ЦСВ вычисляется истинная воздушная скорость самолета. Измеренные значения параметрической высоты, индикаторной скорости полета, курса, скорости подъема и спуска самолета, а также вычисленные значения барометрической исправленной высоты, температуры наружного воздуха, переменной воздушной скорости выводятся на отдельные индикаторы на приборной доске борт-аэролога. В иллюминаторе борт-аэролога установлен блистер, а на столе — пульт системы синхронизации.

2. Измерение влажности. Для измерения влажности в ЦАО разработан оксидно-алюминиевый датчик влажности, позволяющий при температуре от 30 до -60°C измерять влажность воздуха с точностью до 5%. Датчик влажности, как и датчик температуры, смонтирован на выносном кронштейне консольного типа, в его заборнике расположены ОАД и терморезистор типа ММТ-6 для измерения температуры воздуха.

Измерение температуры необходимо для введения поправки к датчику влажности. Датчик влажности перед установкой на самолет градуируется на универсальном генераторе влажности. Регистрация показаний влажности и температуры производится на потенциометре типа КСП-4 или оптическом самописце К4-51.

3. Измерение скорости и направления ветра. Для определения скорости и направления ветра на самолете используется доплеровская навигационная система «Мачта» в комплексе с курсовой системой КС-8, датчиком воздушной скорости ДВС и блоком коммутации БК АНУ.

4. Измерение геометрической высоты полета. Истинная высота полета над земной поверхностью или над уровнем моря (при полетах над морем) измеряется с помощью радиовысотомера больших высот РВ-17. Рабочая частота РВ-17 440 мГц. Частота посылок 150 мГц. Точность отсчета высоты по точной шкале 5 м.

5. Измерение радиолокационной отражаемости облаков и осадков. На самолете Ил-18 ЦАО установлен специализированный метеорологический радиолокатор, предназначенный для измерения радиолокационной отражаемости облаков и осадков между уровнем полета и поверхностью земли. Он имеет неподвижную антенну, установленную в радиопрозрачном обтекателе под фюзеляжем самолета, которая обеспечивает формирование остронаправленного излучения вертикально вниз. Система обработки и регистрации радиолокационной информации позволяет получать распределение отражаемости метеорологических объектов в вертикальной плоскости под самолетом по всей трассе полета. На основе этих данных могут быть определены горизонтальные размеры и вертикальная мощность облаков, зафиксированы осадки и их интенсивность, оценен фазовый состав облаков, из которых выпадают осадки, а также измерены вертикальные сдвиги ветра в зоне осадков.

6. Измерение концентрации и спектра размеров сверхкрупных частиц (в облаках и осадках). Самолетный прибор ИРЧ (измеритель размеров частиц) используется для непрерывной регистрации (в комплексе с многоканальным самописцем) концентрации и спектра размеров частиц осадков и сверхкрупных частиц ($r=75 \dots 100$ мкм) любого агрегатного состояния. Прибор основан на фотоэлектрическом методе ослабления индивидуальными частицами светового пучка, формируемого между двумя узкими оптическими щелями. Принцип его работы и способ регистрации следующий.

При пересечении частицей пространства между щелями на нагрузке фотоэлектрического устройства R_n выделяется импульс, амплитуда которого v связана с размером частицы вдоль щелей соотношением

$$v = I_\phi \cdot R_n \cdot \frac{2r}{l} \cdot k, \quad (8.2)$$

где I_ϕ — контролируемый фототок ФЭУ, l — длина щелей, $k \leq 1$ — коэффициент, учитывающий форму частиц, искажения импульса и пр., причем $k \rightarrow 1$ с ростом r . Анализ распределения частиц по размерам производится с помощью встроенного амплитудного анализатора, каждый канал которого регистрирует частицы размером, превышающим заданное пороговое значение.

Частоты следования импульсов во всех каналах преобразуются в постоянные токи, записываемые одновременно группой гальванометров самописцев. Концентрации частиц с заданным минимальным размером r_i определяются по формуле

$$N_i = N(r > r_i) = \frac{f_i}{vs} \left(\frac{f_i}{v_s} \right), \quad (8.3)$$

где v — истинная воздушная скорость самолета, s — приемная площадь прибора, f_i — частота следования импульсов в данном канале.

7. Измерение прозрачности облаков. На самолете Ил-18 ЦАО производится измерение зональной прозрачности облаков с помощью разработанного в ЦАО регистратора прозрачности РП. Прибор основан на базисном фотоэлектрическом методе измерения направления пропускания слоя среды Φ/Φ_0 . Здесь Φ — световой поток на приемнике, отделенном от осветителя слоем среды толщиной L ; Φ_0 — поток на приемнике в условиях абсолютно прозрачной среды, причем

$$\Phi/\Phi_0 = \exp(-\gamma L), \quad (8.4)$$

где γ — искомый параметр среды (облака) — показатель ослабления направленного излучения.

Прибор РП построен по схеме дифференциального фотометра.

Оптический блок прибора содержит излучатель светового потока и фотоприемник. Зондирующий импульс Φ излучается через коллимационный объектив наружу, проходит через участок пространства длиной $L/2$, частично отражается от призмы, установленной на конце участка, и через ту же среду

возвращается в оптический блок. Другой световой импульс Φ_0 служит опорным, формирует поток сравнения на приемнике. Оба потока прерывисто-периодично направляются на общий фотоумножитель с помощью электромеханического оптического коммутатора. В режиме полета в ясном небе (вне облака) потоки выравниваются между собой, и при измерениях опорный поток выполняет роль потока Φ .

8. Измерение содержания двуокиси углерода в атмосфере. На самолете Ил-18 ЦАО установлен газоанализатор CO_2 . Определение дозы CO_2 в газовой смеси производится электрохимическим методом, основанным на измерении величины рН поглотительного раствора.

Анализируемая газовая смесь с постоянным давлением и скоростью (расход газа 3 л/ч) в течение 5 мин подается компрессором на электрохимическую ячейку, содержащую поглотительный раствор. В качестве поглотительного раствора используется 0,5 моля раствора $\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2$ с предварительным установленным рН=9,5. В результате поглощения электролитом (поглотительным раствором) CO_2 из газовой смеси рН раствора Ba убывает на величину, зависящую от количества поглощенного CO_2 .

При пропускании анализируемой газовой смеси (атмосферного воздуха) через электрохимическую ячейку образуется карбонат бария и рН раствора уменьшается (менее 9,5). До пропускания CO_2 состояние раствора следующее: $\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{OH}^-$, после пропускания CO_2 оно изменяется: $\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2 + \text{OH}^- + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{BaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$.

Восстановление первоначального рН раствора электрохимической ячейки производится без прекращения подачи анализируемой смеси (воздуха) путем генерации ионов OH^- из электролита. При этом регистрируется количество электричества, затраченное на этот процесс. Ток генерации 10 мА контролируется и поддерживается с помощью миллиамперметра и переменного сопротивления. Расход воздуха контролируется и поддерживается реометром. Время генерации фиксируют с помощью электросекундомера, изменения рН фиксируют рН-метром и КСУ-2. Количество электричества (в милликулонах), прошедшее через электрохимическую ячейку, устанавливают по формуле $Q = it$, где i — сила тока в миллиамперах; t — время генерации в секундах.

Количество электричества, необходимое для компенсации изменения рН, вызванного поглощением CO_2 , пропорционально количеству генерируемых гидроксильных ионов и, следовательно, количеству поглощенной двуокиси углерода. Количество CO_2 определялось по закону Фарадея:

$$m = \frac{2it}{F}, \quad (8.5)$$

где m — количество CO_2 в миллиграммах; 2 — эквивалент CO_2 , равный 22; i — ток генерации, равный 10 мА; t — время генерации в секундах; F — число Фарадея, равное 96 500.

Зная расход воздуха Q и время пропускания газовой смеси через поглотительный раствор, можно по массе поглощенного CO_2 определить весовую концентрацию углекислого газа:

$$\rho_{\text{CO}_2} = \frac{m}{Q}. \quad (8.6)$$

Процентное объемное содержание CO_2 связано с весовой концентрацией ρ_{CO_2} следующей формулой:

$$P_v = R \frac{T}{\mu p} \rho_{\text{CO}_2} \cdot 100, \quad (8.7)$$

где R — газовая постоянная, T — абсолютная температура, μ — молекулярный вес CO_2 , p — давление воздуха в кабине самолета.

Расчетная формула имеет вид

$$P_v = 0,1416 \frac{T}{p} p_{CO_2} \text{ или } P_v = c p_{CO_2}, \quad (8.8)$$

где $c = 0,1416 T_c / p_c$, p_c — давление воздуха внутри самолета в миллиметрах ртутного столба, T_c — температура воздуха внутри самолета в кельвинах.

Чтобы определить истинную весовую концентрацию CO_2 за бортом самолета, необходимо знать плотность воздуха $\rho_{возд}$ в атмосфере. Тогда из объемного содержания P_v вычисляется весовое содержание P_m по формуле

$$P_m = \frac{\rho_{CO_2}}{\rho_{возд}} \cdot P_v = 1,52 P_v \quad (8.9)$$

и весовая концентрация ρ_{CO_2} находится по формуле

$$\rho_{CO_2} = \rho_{возд} P_m. \quad (8.10)$$

9. Измерение нисходящих и восходящих потоков длинноволновой и коротковолновой радиации. Радиационный комплекс обычно включает в себя датчики для измерения нисходящих и восходящих потоков радиации в диапазонах 0,3—3,0 и 3,0—30 мкм, а также блок управления и регистрирующую аппаратуру. Датчиками служат стандартные пиранометры, используемые на актинометрической сети СССР, и специально разработанные в ЦАО радиометры, предназначенные для измерения длинноволновой радиации на фоне коротковолнового солнечного излучения.

Во всех датчиках используются термоэлектрические первичные преобразователи. Выделение длинноволновой радиации из общего потока осуществлено путем применения специальных покрытий для приемных поверхностей датчиков.

Радиометры снабжены термометрами для учета теплового состояния приемников излучения.

Датчики в соответствии с назначением размещены на верхней и нижней поверхности фюзеляжа самолета. В качестве регистраторов применены автоматические потенциометры типа КСП-4.

Обработка всех измеряемых параметров атмосферы производится на ЭВМ.

9 МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ РАКЕТНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ

Исследования высоких слоев атмосферы с помощью ракет в СССР начались в 1947 г., когда коллективом научных работников под руководством С. Н. Вернова была запущена ракета для изучения космических лучей на больших высотах. Эти исследования быстро и успешно развивались в двух направлениях. Для первого направления характерно целевое изучение высоких слоев атмосферы на мощных геофизических или исследовательских ракетах, поднимающихся на высоты более 100—150 км. В программу этих исследований входят измерения солнечного и космического излучения, оптических характеристик атмосферы, изучение состава атмосферного воздуха, его электрических и термодинамических характеристик, магнитного поля Земли. Для второго направления характерно изучение менее высоких слоев атмосферы, преимущественно до высот 65—100 км, с помощью метеорологических ракет. Эти два направления в СССР выделились еще в начале 50-х годов.

В 1949 г. в Центральной аэрологической обсерватории по инициативе Г. И. Голышева и В. А. Путохина был создан советский метеорологический ракетный комплекс, предназначенный для систематических измерений температуры, давления и ветра до высот 80—85 км. В основу разработки были положены три главных принципа:

1) аппаратура должна быть возможно простой и доступной для эксплуатации специалистами со средним уровнем подготовки;

2) для вторичного использования ракеты должна обеспечиваться мягкая посадка (спасение) головной части ракеты, а по возможности и всей ракеты;

3) результаты ракетных измерений должны передаваться на Землю по радио.

С учетом этих требований была создана метеорологическая ракета МР-1, которая имела головную часть весом 72 кг,

содержащую вместительный приборный отсек. С помощью жидкостного реактивного двигателя она поднималась на высоту около 80 км. Температура измерялась посредством термометра сопротивления, ветер определялся по дрейфу парашюта, давление — с помощью манометров.

Ракета МР-1 была первой сравнительно дешевой метеорологической ракетой. Парашютная система для спасения головной части и даже двигателя ракеты давала возможность не только проводить ее повторные запуски, но и измерять метеорологические параметры при спуске головной части. Последнее позволяет использовать менее сложную и дорогостоящую аппаратуру, чем на подъеме, в частности такие простые датчики, как проводочный термометр сопротивления. Помимо этого, сравнительная простота методов измерений и регистрации облегчила обработку полученной информации (первоначально до высоты примерно 50 км), а это в свою очередь дало возможность оперативно использовать полученные данные.

К началу 1957 г. вступила в строй малая метеорологическая ракета с высотой подъема 50 км. Она обладала большей оперативностью, была снабжена радиолокационным ответчиком, что позволило заменить оптический метод траекторных измерений радиолокационным. Появилась возможность проводить ракетное зондирование при любых условиях погоды, в различных географических районах и на кораблях. Наблюдения проводились в средних широтах Европейской территории СССР (ст. Волгоград) и на о. Хейса (архипелаг Земля Франца-Иосифа). Станция на о. Хейса до настоящего времени находится на самой высокой широте из всех станций ракетного зондирования в мире.

В период Международного геофизического года (1957—1959 гг.) на д/э «Обь» в 1957—1958 гг. была выполнена большая программа исследования атмосферы южного полушария с помощью метеорологических ракет. Ракетное зондирование проводилось вдоль берегов Антарктиды до 65° ю. ш., а также на других широтах при следовании судна по маршруту.

К началу МГГ ракетные исследования велись уже в ряде стран. С целью измерения температуры акустическим методом в 1956 г. были начаты ракетно-гранатные эксперименты на полигоне Черчилл в Канаде. Во время МГГ там производились также измерения плотности воздуха с помощью акселерометров и трубок Пито, поднимаемых на ракетах. В 1957 г. в Австралии на полигоне Вумера были начаты акустические наблюдения с помощью гранат и изучение структуры ветра с помощью английской ракеты «Скайларк». Запуски японских ракет «Каппа» с применением гранатного метода измерений были произведены в 1958—1961 гг.

В США наряду с запуском метеорологических ракет на полигоне Уайт-Сендс в 1957 г. проводились акустические ракетно-

гранатные измерения ветра и температуры с помощью ракет «Найке-Кеджун» и «Аэробы» на о. Гуам. Во Франции создана большая ракета «Вероника», измеряющая давление с помощью теплового манометра в стратосфере и мезосфере.

Первые эпизодические наблюдения позволили обнаружить существование крупномасштабных процессов в стратосфере и мезосфере. Поэтому для их изучения было необходимо организовать сеть метеорологического ракетного зондирования по примеру радиозондовой сети. Для создания такой сети требовались небольшие и дешевые ракеты, а также упрощенная система наблюдения, которую мог бы обслуживать небольшой персонал.

В создании и развитии сети метеорологического ракетного зондирования можно отметить примерно те же стадии, какие прошла радиозондовая аэрологическая сеть в 30—40-х годах. Осуществляется постепенный переход от разрозненных станций со случайными запусками к сравнительно регулярно действующей сети, предназначенной для синоптических исследований крупномасштабных процессов.

С 1964 г. начато регулярное зондирование с помощью двухступенчатой ракеты М-100, использование которой позволило распространить измерения термодинамических параметров на значительную часть мезосферы. Зондирование с помощью этой ракеты осуществлялось также на о. Хейса и в Волгограде и, кроме того, на научно-исследовательских судах «А. И. Воейков» и «Ю. М. Шокальский».

В 1970 г. ракетный комплекс был установлен также на судах «Академик Королев» и «Академик Ширшов». В 1969 г. вошла в строй станция метеорологического ракетного зондирования Молодежная в Антарктиде.

Важное место в изучении процессов в тропической зоне восточного полушария занимает индийская станция ракетного зондирования Тумба. В конце 1970 г. здесь начали зондирование с помощью ракеты М-100, развивая и дополняя программу исследования атмосферы. С помощью советских ракет М-100 проводится также зондирование на о. Кергелен в Индийском океане. В соответствии с советско-французским соглашением эти наблюдения проводятся в экспедиционном порядке в течение трех месяцев ежегодно.

Данные ракетного зондирования на упомянутых станциях и судах позволяют систематически строить меридиональные разрезы верхней атмосферы от Арктики до Антарктики (приблизительно вдоль меридиана 65° в. д.).

Сравнительно недавно в СССР разработана и испытана новая облегченная метеорологическая ракета ММР-06, предназначенная для температурно-ветрового зондирования до высоты 60—65 км.

9.1. Научно-исследовательская метеорологическая ракета М-100

Метеорологическая ракета М-100 является неуправляемой двухступенчатой ракетой, работающей на твердом топливе. Она предназначена для зондирования стратосферы и мезосферы путем доставки научной аппаратуры до максимальной высоты около 100 км. Общий вес головной части с парашютом и парашютным отсеком превышает 77 кг, вес измерительной аппаратуры 13—14 кг.

Для подъема головной части на заданную высоту служит двигательная установка, которая состоит из двух состыкованных в торец твердотопливных двигателей первой и второй ступеней.

По калибру, стартовому весу системы, по объему и весу полезного груза ракета М-100 значительно превышает малые метеорологические ракеты и относится к классу средних ракет разностороннего метеорологического применения.

Для запуска ракеты М-100 служит пусковая установка, основными частями которой являются лафет с подъемными поворотным и уравнивающими механизмами, а также ствол со стопорными устройствами и спиральными направляющими. При подготовке к запуску ствол устанавливается в горизонтальное положение, а ракету с помощью лебедки — вдоль направляющих пусковой установки. После определения по данным о баллистическом ветре азимута и вертикального угла установка приводится в пусковое положение (рис. 9.1). Обычно вертикальный угол колеблется от 80 до 85°.

Для пуска ракеты нажатием кнопки пульта управления подается электрический импульс на пирозаряды пироузла первой ступени двигателя, и при их срабатывании зажигается пороховой воспламенитель, от которого воспламеняются наружная и внутренняя поверхности пороховых шашек.

Развивающаяся реактивная тяга приводит ракету в движение по направляющим пусковой установки. При этом путем выдергивания стопорных троников приводятся в действие приборы командного блока и пускового блока второй ступени двигателя.

После сгорания пороховых шашек и прекращения работы двигателя первой ступени осуществляется запуск двигателя второй ступени, затем (через 8 с после старта) происходит отделение первой ступени. Через 60 с после старта срабатывает программный механизм сброса защитных створок шпиля, в результате чего термометры (и манометр Пирани) получают контакт с атмосферой. Через 70 с по команде программного механизма происходит отделение головной части. Одновременно освобождается парашют. В результате работы разделительного движка отделившаяся головная часть получает дополнительное ускорение, что уменьшает вероятность повреждения парашюта корпусом ракеты.

Головная часть ракеты вместе с парашютом после отделения от второй ступени продолжает двигаться по восходящей ветви траектории. С высоты 60—55 км (через 70 с после старта) головная часть опускается на парашюте на нисходящем участке траектории. Предполагается, что до этого уровня парашют выполняет роль стабилизатора падения головной части, что имеет существенное значение для измерения термодинамических параметров.

Головная часть состоит из шпиля, приборного отсека, промежуточного отсека с разделительным устройством и парашют-

ного отсека. Размеры головной части вместе со шпилем: длина 1,95 м, наибольший диаметр 0,25 м (рис. 9.2).



Рис. 9.1. Установка для запуска ракеты М-100.

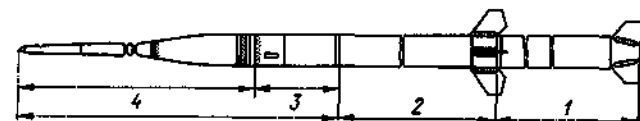


Рис. 9.2. Ракета М-100.

1 — двигатель первой ступени; 2 — двигатель второй ступени; 3 — парашютный отсек; 4 — головная часть ракеты.

На шпиле смонтированы четыре проволочных термометра сопротивления, служащие для измерения температуры атмосферы, и термометр сопротивления для измерения температуры

кронштейна, на котором установлены эти термометры. Находясь под защитными створками, кронштейны располагаются вдоль шпиля. При сбрасывании створок кронштейны ориентируются перпендикулярно оси шпиля. На шпилье установлены также два тепловых манометра Пирани для измерения атмосферного давления с датчиком температуры для измерения температуры стенок манометра.

В приборном отсеке расположены мембранный датчик атмосферного давления (для измерения давления от 250 до 5 мм рт. ст.), механический коммутатор, источники электропитания (батареи и аккумуляторы), передатчик радиотелеметрической системы, радиолокационный ответчик и командный блок.

Подвижные контакты механического коммутатора обеспечивают последовательное подключение диагоналей мостов датчиков ко входу радиотелеметрического передатчика, работающего на принципе манипуляции сигнала на высокой частоте. Частота колебаний при нулевом напряжении на входе передатчика составляет 22,5 МГц. Антенной передатчика служит полуволновой диполь, вмонтированный в одну из строп парашюта. Бортовой радиолокационный ответчик работает в диапазоне частот 1700—1795 МГц. Две антенные головки щелевого типа расположены на противоположных сторонах головной части ракеты.

В качестве наземных установок используются телеметрический приемник с регистратором и радиолокационная станция «Метеорит-Р», в которой в дополнение к режимам работы по сопровождению радиозондов и уголкового отражателя применен дополнительный режим для прослеживания быстро летящих целей. «Метеорит-Р» обеспечивает автоматическое сопровождение цели по угловым координатам и дальности при скоростях цели до 2000 м/с и учащенные интервалы регистрации. Данные о ветре рассчитываются по траекторным данным радиолокационного прослеживания за дрейфом головной части на парашюте. Температура атмосферы рассчитывается по данным температуры нити на основе положений теории теплообмена тела, движущегося в разреженном газе.

Практически обработка результатов измерений состоит в следующем. Во-первых, в расшифровке ленты телеметрического регистратора с помощью оптического дешифратора; расшифровка заключается в переводе отклонения сигнала от нулевой линии в показания приборов. Во-вторых, в переводе показаний приборов в значения параметров атмосферы. Последний этап производится с помощью ЭВМ. В настоящее время разработан способ ввода в машину информации, минуя этап дешифровки.

Перечисленная выше аппаратура составляет стандартный вариант полезного груза ракеты М-100. Однако по объему приборного отсека и некоторым возможностям ракета М-100 явля-

ется многоцелевой. Помимо выполнения программы стандартного варианта возможны следующие измерения:

1) сброс дипольных отражателей и прослеживание их дрейфа с помощью РЛС для получения ветрового разреза в слое 50—90 км;

2) измерение потока корпускул (космических лучей) в мезосфере.

Кроме того, производятся запуски специализированных комплектов аппаратуры головных частей, которые осуществляют: 1) измерение концентрации водяного пара, концентрации атомарного кислорода и озона в стратосфере и мезосфере; 2) измерение концентрации заряженных частиц в стратосфере и мезосфере. Разрабатываются и другие варианты ракеты М-100.

К положительным качествам ракеты М-100 относится отсутствие больших перегрузок, которые могут оказать вредное действие на бортовую аппаратуру. Максимальные перегрузки не превышают 25 g. Спиральные направляющие пусковой установки придают ракете вращение вдоль продольной оси еще при движении в стволе. Вращение ракеты М-100 после схода ее с направляющих пусковой установки поддерживается за счет скоса оперения по отношению к ее продольной оси.

9.2. Метеорологическая ракета ММР-06

Неуправляемая твердотопливная одноступенчатая ракета ММР-06 предназначена для подъема полезного груза до максимальной высоты 60—65 км. Стартовый вес составляет 133 кг, а вес головной части, спускающейся на парашюте, 17 кг. В полете ракета стабилизируется вращением вдоль продольной оси.

Головная часть ракеты состоит из конуса с измерительными приборами и контейнера, где расположена радиотехническая аппаратура с энергетическими источниками питания. В конусе установлены два бусиновых полупроводниковых терморезистора, манометр Пирани и мембранный манометр. Кроме того, на приборном корпусе смонтированы вспомогательные бусиновые терморезисторы, используемые для измерения температуры кронштейнов основных терморезисторов, а также проволочные термометры сопротивления, предназначенные для измерения температуры стенок манометров Пирани и температуры поверхности приборного конуса. Корпус ракеты во время ее полета на восходящем участке траектории закрыт предохранительной защитой, которая раскрывается лишь вблизи вершины траектории.

Контейнер закрывается радиопрозрачной оболочкой, изготовленной из пластмассы АГ-4. В контейнере расположены: радиолокационный ответчик, коммутатор, блок питания и радиопередатчик. В последнее время радиолокационный ответчик

и радиопередатчик заменены совмещенной бортовой аппаратурой с ответчиком. В этом случае всю информацию принимает РЛС «Метеорит-Р» с дополнительной аппаратурой для выделения и регистрации телеметрической информации. Вес аппаратуры, помещенной в контейнере, составляет 5 кг вместе с источниками питания, обеспечивающими непрерывную работу приборов в течение 2 ч.

Параметры атмосферы измеряются на нисходящем участке траектории после отделения головной части от двигателя ракеты. Измерения ветра ведутся путем радиолокационного прослеживания дрейфа головной части ракеты, спускающейся на парашюте.

9.3. Метеорологическая ракета МР-12

Для исследования атмосферы на высотах 100—180 км в СССР начиная с 1965 г. применяется метеорологическая ракета МР-12. Неуправляемая одноступенчатая метеорологическая ракета МР-12 с двигателем, работающим на твердом топливе, способна поднимать полезный груз весом до 50 кг до максимальной высоты 180 км. Устойчивость в полете обеспечивается хвостовыми стабилизаторами и вращением около продольной оси, развиваемым при движении в пусковой установке. Ракета состоит из головной части, двигателя с пороховым зарядом и хвостового отсека с оперением. В зависимости от программы исследования полеты проводятся с отделением и без отделения головной части от ракеты.

Приведем некоторые технические характеристики головной части ракеты:

Масса головной части	135 кг
Полное время полета	6,5—7 мин
Максимальные осевые перегрузки	17 g
Максимальная скорость вращения на участке измерений	300 об/мин
Время подготовки к запуску после доставки к месту старта	2 ч

В программу, выполняемую с помощью ракет МР-12, включаются, например, следующие работы:

- 1) масс-спектрометрические исследования ионного и нейтрального состава верхней атмосферы;
- 2) исследования парциальных концентраций, температур и давлений нейтральных компонентов верхней атмосферы;
- 3) измерение парциальной плотности молекулярного азота и его температуры;
- 4) измерение полного давления, суммарной плотности и температуры в мезосфере и нижней термосфере;
- 5) измерение температуры термосферы, а также коэффициента диффузии и ветра с помощью искусственных светящихся облаков натрия.

10 ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ

10.1. Метеорологическая радиолокация

В период развития радиолокации перед второй мировой войной для обнаружения целей использовались относительно длинные радиоволны. В процессе совершенствования радиолокационной техники добились того, что радиолокационные станции стали работать на более коротких волнах. Вместе с этим выяснилось, что радиолокационные сигналы отражаются не только от так называемых целей (самолетов, кораблей и т. п.), но и от взвешенных в воздухе капель воды и кристаллов льда. Анализ полученных экспериментальных данных позволил, с одной стороны, открыть связь между распространением наиболее коротких радиоволн и метеорологическими условиями, а с другой стороны, выявить реальные возможности наблюдения за явлениями в атмосфере с помощью радиолокационных станций. Это дало в руки метеорологов новый и достаточно совершенный метод исследования.

Преимущества этого метода по сравнению с аналогичными оптическими и акустическими методами в основном выражаются в том, что наблюдения с помощью радиолокационной аппаратуры отличаются большой оперативностью. Они возможны при всякой погоде, в любое время суток и года, а полученные данные относятся непосредственно к моменту наблюдения. Метеорологическая радиолокация позволяет наблюдать различные процессы в атмосфере в радиусе до сотен километров. Без существенного усложнения радиолокационной аппаратуры можно одновременно наблюдать за несколькими объектами, расположенными в одном направлении или в пределах некоторого сектора или окружности, в центре которой находится радиолокационная станция.

С помощью метеорологических радиолокаторов производится обнаружение и исследование облаков и осадков и связанных с ними атмосферных фронтов, турбулентных и конвективных образований атмосферы. Исследования облачных образований стали возможны после освоения сантиметровых, а затем и

миллиметровых волн. При этом с достаточной для практики точностью определяются их координаты, размеры, форма, направление и скорость смещения, а также тенденция в развитии обнаруженных очагов осадков. Знание этих характеристик совершенно необходимо не только для надежного прогноза облаков и связанных с ними явлений, но также и для активных воздействий на них. Одним из важных качеств метеорологического радиолокатора является возможность измерения осадков.

Требования, предъявляемые различными отраслями народного хозяйства к измерениям осадков, весьма разнообразны. Так, для удовлетворения запросов сельского хозяйства требуются в основном сведения о количестве осадков, выпавших за длительные периоды (неделя, декада, месяц), на достаточно больших площадях. Оперативность сбора данных здесь играет второстепенную роль. С другой стороны, для обеспечения нормальной работы многих гидроэнергетических и гидротехнических сооружений, а также для решения ряда гидрологических задач требуются данные о количестве осадков, выпавших за короткие отрезки времени (сутки и даже часы), нередко над относительно небольшими территориями (бассейнами рек в несколько сотен, а иногда и десятков квадратных километров). Важно при этом, чтобы эти данные поступали как можно быстрее, особенно в случае осадков большой интенсивности. Аналогичные сведения, но поступающие с еще большей оперативностью, нужны и для службы оповещения об опасных метеорологических явлениях (внезапных повышении уровня рек и водоемов, наводнениях и т. п.).

Иные требования выдвигает служба прогнозов. Для нее главное — простота и оперативность сбора единовременной информации о количестве осадков с огромных территорий, соизмеримых с территорией страны, за промежутки времени 3—12 ч.

Существующий метод измерения количества осадков с помощью наземной сети осадкомеров и pluвиографов, требующий сотни тысяч измерительных приборов, чрезвычайно неоперативен и, по существу, не поддается автоматизации при сборе, обработке и передаче информации.

В то же время работы, проведенные в СССР под руководством В. В. Костарева и за рубежом, показали принципиальную возможность радиолокационных измерений жидких осадков, очаги которых могут находиться на расстоянии до 100—150 км от радиолокатора. Радиолокационный метод измерения осадков, при котором с одного пункта наблюдения можно получить данные об осадках на площади в несколько десятков тысяч квадратных километров, может дать существенный экономический выигрыш, упростить сбор, передачу и обработку результатов измерений. Кроме того, с помощью радиолокатора получают информацию иного качества, такую, например, как общую кар-

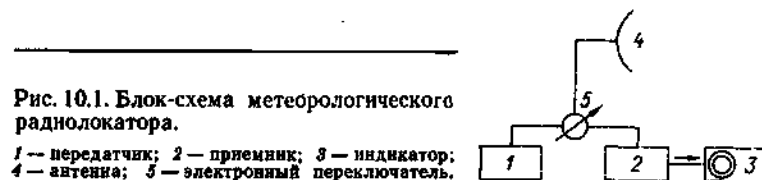
тину распределения осадков на огромных территориях за несколько минут.

В настоящее время в СССР и других странах наряду с пунктами температурно-ветрового зондирования атмосферы существуют радиолокационные пункты штормового оповещения и предупреждения. В СССР эти пункты оснащены радиолокационными станциями типа МРЛ-2, специально созданными для применения в области метеорологии.

10.1.1. Принцип работы метеорологического радиолокатора

Все радиолокаторы построены по схеме, приведенной на рис. 10.1. По этой схеме легче понять принцип работы всего устройства и взаимодействие его основных частей — блоков.

Основной частью радиолокатора является передатчик, который создает импульсы электромагнитных волн. Большинство метеорологических радиолокаторов имеет мощность импульса примерно от 25 до 500 кВт. Излучаемая мощность концентрируется в коротких импульсах, которые следуют друг за другом через сравнительно большие промежутки времени. Обычно радиолокаторы излучают импульсы длительностью 1 мкс с интервалом времени между ними 1000 мкс. Относительно длинный



промежуток времени между импульсами дает возможность отраженному сигналу дойти до приемника раньше, чем будет излучен следующий импульс. Импульс поступает в антенну, которая излучает его в виде узкого луча. Во время излучения созданного передатчиком импульса приемник радиолокатора выключается с помощью электронного переключателя. Если бы приемник не выключался на время передачи импульса, то огромная излучаемая мощность, попадая в приемник, могла бы вывести его из строя. После излучения импульса длительностью около 1 мкс приемник вновь включается, для того чтобы отраженный сигнал, принятый антенной, мог попасть в приемный тракт. Радиолокаторы способны принимать слабые сигналы, мощностью 10^{-12} — 10^{-14} Вт. Для того чтобы такие сигналы были видны на индикаторе, их необходимо многократно усилить. Усиление сигналов составляет одну из главных функций приемника. После усиления сигналы поступают на один или несколько индикаторов в форме, удобной для наблюдений.

Важнейшей характеристикой радиолокационной станции является частота используемых радиоволн. Правильный выбор частоты радиоволн особенно важен, если радиолокационная станция предназначена для наблюдений за облачностью и осадками. Чем выше частота, тем меньших размеров капли может обнаружить радиолокатор. Обычно для метеорологических радиолокаторов используются частоты в диапазоне от 1500 до 30 000 МГц. Зная, что скорость распространения радиоволн составляет $3 \cdot 10^{10}$ см/с, можно легко вычислить, что радиолокаторы, используемые в метеорологических целях, работают в диапазоне волн от 1 до 10 см. Выбор длины волны определяется

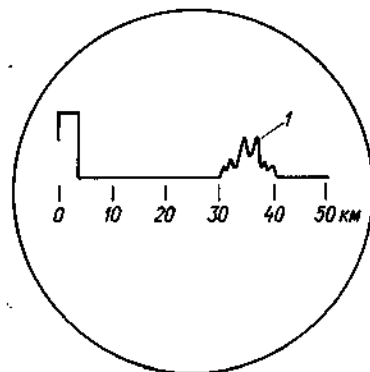


Рис. 10.2. Индикатор типа А.

1 — радиоэх.

задачей исследования. Если необходимо обнаружить мелкие водяные капельки, целесообразно использовать более короткие волны. Если же предметом исследования являются зоны осадков или грозы, можно использовать более длинные волны.

Для наглядного представления расположения очагов облаков и осадков используют специальные радиолокационные экраны, называемые индикаторами. Среди большого многообразия используемых типов индикаторов один из простейших носит название «индикатор типа А» (рис. 10.2). Этот индикатор представляет собой индикаторно-лучевую трубку, на экране которой

имеется одна горизонтальная линия. Эта линия создается перемещающимся пучком электронов, который, ударяясь об экран трубки, вызывает его свечение. Пучок начинает перемещаться горизонтально в тот момент времени, когда передатчик излучает импульс энергии. Часть излучаемой энергии, попадая на индикатор, вызывает вертикальное отклонение пучка электронов, создающего на экране светящийся выброс, называемый первичным всплеском. Скорость перемещения пучка электронов по экрану индикатора выбирается таким образом, чтобы определенное горизонтальное смещение соответствовало заданному расстоянию до цели. Так, на индикаторах, предназначенных для определения расстояния до целей, расположенных, например, на максимальном удалении до 50 км, пучок электронов должен пересекать весь экран трубки за время, равное $(50 \text{ км} \cdot 2) / (3 \cdot 10^8 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1})$, т. е. приблизительно за 330 мкс. Множитель 2 введен потому, что импульс энергии дважды проходит путь до цели. По этой причине экран индикатора размечается цифрами, которые непосредственно указывают расстояние до цели. Как только импульс, отраженный от объекта, достигает радиолокатора, он вызывает вертикальное отклонение электронного пучка, создающего на соответствующем расстоянии светящийся выброс, называемый вторичным всплеском. Расстояние до цели непосредственно определяется по шкале дальности координатами этого всплеска. Вещество, которым покрывается поверхность экрана, светится дольше (секунды), чем подвергается воздействию электронного пучка (микросекунды). Это свойство «послесвечения» радиолокационных индикаторов облегчает наблюдение отраженных сигналов.

Показанный на рис. 10.2 радиолокационный индикатор дает сведения не только о расстоянии до цели. Величина вертикального всплеска, т. е. амплитуда

отраженного сигнала, часто называемого радиоэхом, характеризует мощность сигнала. Когда радиоэх слабое, импульс, отраженный от объекта, небольшой. Если радиоэх сильный, отраженный импульс большой по амплитуде. Для изучения облаков и осадков величина амплитуды играет важную роль, так как мощность радиоэха может быть использована для количественного определения интенсивности осадков.

Кроме индикатора типа А, в радиолокаторах, применяемых для метеорологических целей, широко используются и другие виды индикаторов. Наиболее распространен индикатор кругового обзора (ИКО). Как показывает само название, этот индикатор дает картину распределения радиоэха по кругу в плоскости обзора. На рис. 10.3 приведен индикатор кругового обзора, на котором видно радиоэх от небольшого очага ливневых осадков. Такой тип индикатора позволяет определять не только расстояние до цели, но и направление, в котором она перемещается. В данном случае (рис. 10.3) объект находится на расстоянии 28 км от радиолокатора, азимут 150° .

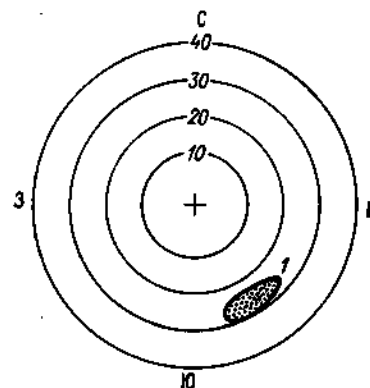


Рис. 10.3. Индикатор кругового обзора.

1 — радиоэх.

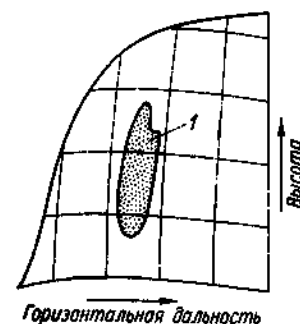


Рис. 10.4. Индикатор «дальность—высота».

1 — радиоэх.

Общая яркостная картина радиоэха на ИКО складывается из множества световых пятен, образующихся в результате последовательного пробега пучка электронов от центра экрана к периферии и его вращения по кругу синхронно с вращением антенны радиолокационной станции. По мере вращения антенны электронный пучок создает изображение светящейся линии, синхронно следует с движением антенны. Когда антенна направлена по азимуту 150° , светящаяся линия на экране ИКО также располагается по азимуту 150° .

Пригодность индикатора кругового обзора для метеорологических наблюдений совершенно очевидна. Так, например, с помощью ИКО можно легко обнаружить ливневые очаги или другие метеорологические явления и определить их координаты.

В метеорологических целях используется также индикатор «дальность—высота» (ИДВ). Как видно из рис. 10.4, на этом индикаторе радиоэх представляется в координатной сетке высота—горизонтальное удаление. Для того чтобы картину радиоэха представить в координатах высота—горизонтальное удаление, антенна радиолокационной станции должна перемещаться в вертикальной плоскости (сканировать). По мере того как она поднимается и опускается по углу места, луч на экране индикатора повторяет ее движения, создавая на нем соответствующую картину радиоэха. Индикатор «дальность—высота» обычно используют в тех случаях, когда требуется непосредственно определить высоту цели. Метеорологи часто применяют такие индикаторы для измерения высот, до которых развиваются грозовые облака.

Как уже было показано, на индикаторе типа А мощность радиоэхо может быть определена по величине амплитуды сигналов. Для индикаторов кругового обзора и «дальность—высота» мощность радиоэхо определяется его яркостью. Чем сильнее отраженный сигнал, тем ярче радиоэхо. Такая зависимость между мощностью радиоэхо и его яркостью сохраняется, однако, только до тех пор, пока изображение на электронно-лучевой трубке индикатора не достигает «насыщения», т. е. некоторого уровня, выше которого яркость свечения уже не меняется даже при возрастании мощности радиоэхо.

10.1.2. Радиолокационные измерения интенсивности осадков

Мощность, отраженная дождевой каплей, как показывают расчеты, слишком мала, чтобы быть обнаруженной обычным радиолокационным приемником. Например, капля диаметром 0,1 см, находящаяся на расстоянии 10 км от станции, создает на входе обычно используемого для метеорологических наблюдений 10-сантиметрового радиолокатора мощность около $6 \cdot 10^{-20}$ Вт. Такая мощность находится за порогом обнаружения сигнала, составляющего для большинства радиолокационных станций 10^{-13} Вт.

В действительности в зоне, облученной радиолокатором, находится не одна, а множество капель. Исследования показали, что обычно число капель в единице объема уменьшается с ростом их диаметра, а абсолютное количество капель меняется в широких пределах. Наиболее часто в 1 м^3 воздуха содержится от 100 до 1000 капель дождя.

Допустим, что радиолокатор имеет симметричный луч шириной 3° и излучает импульсы с пространственной длиной 300 м. Тогда все капли, заключенные в объеме луча антенны с длиной, равной половине пространственной протяженности импульса, смогут одновременно отражать падающую на них мощность в направлении антенны радиолокатора.

Если на расстоянии 10 км луч радиолокатора заполнен дождевыми каплями, концентрация которых равняется 500 м^{-3} , то для расчета общего числа капель, одновременно участвующих в отражении падающей на них мощности, следует умножить их концентрацию на облученный объем. Для наиболее типичного метеорологического радиолокатора с шириной луча 3° и пространственной длиной импульса 300 м общее число таких капель в облученном объеме будет составлять около $2 \cdot 10^{10}$. Если принять, что мощность, отраженная отдельной каплей, равна $6 \cdot 10^{-20}$ Вт, а число таких капель $2 \cdot 10^{10}$, то общая мощность, отраженная от дождя, будет $12 \cdot 10^{10}$ Вт. Величина такого сигнала намного превышает порог обнаружения радиолокатора, поэтому радиоэхо дождя отчетливо видно на индикаторе. Заметим, что в рассмотренном случае мы пренебрегли эффектом ослабления. Такое приближение допустимо, однако только при

использовании радиоволн длиной 10 см и более. В случае применения волн короче 10 см при расчетах общей отраженной мощности должны быть введены соответствующие поправки на ослабление.

Водяные частицы диаметром 0,1 см уже можно рассматривать как капли дождя, так как они, прежде чем испариться, в состоянии пройти путь в несколько тысяч метров. Для обнаружения облаков, состоящих из дождевых частиц, могут быть использованы радиолокаторы, работающие в широком диапазоне волн. Частицы размером от 0,01 до 0,001 см являются облачными каплями. Такие капли не могут быть обнаружены с помощью радиолокаторов, работающих на длине волны более 10 см. В метеорологическом радиолокаторе МРЛ-2 используется длина волны 3,2 см.

Если параметры радиолокатора известны, то величина мощности сигнала определяется формулой

$$P_r = \frac{cZ}{r^2}, \quad (10.1)$$

где P_r — средняя мощность, рассеянная обратно областью дождевых капель диаметром d_i и концентрацией N_i , расположенной

на расстоянии r от радиолокатора; $Z = \sum_{i=1}^n N_i d_i^6$; c — коэффициент, зависящий от параметров радиолокатора.

Можно показать, что существует корреляционная связь между величиной Z , называемой радиолокационной отражаемостью, и интенсивностью дождя I . В этом случае уравнение (10.1) может быть представлено в виде зависимости P_r от I . Если бы все капли имели одинаковые размеры, такое преобразование можно было бы выполнить весьма легко. Известно, что крупных капель в дожде всегда много меньше, чем мелких. Многочисленные измерения показали, что спектр распределения капель по размерам меняется от дождя к дождю и что эти изменения особенно велики при переходе от одного типа дождя к другому. Поэтому значительные вариации в спектрах размеров капель различных дождей затрудняют нахождение корреляционной связи между P_r и I . Однако такая связь все же существует.

Измерения диаметров дождевых капель и интенсивности осадков были выполнены многочисленными исследователями в СССР и за рубежом. Статистический анализ этих данных позволил найти различные корреляционные соотношения между P_r и I .

Сравнительные радиолокационные и наземные наблюдения за количеством осадков проводились в районе Валдая в течение 1964—1965 гг. на нескольких полигонах площадью от 100 до 8600 км². В результате этих исследований было показано, что

для большинства дождей удовлетворительные результаты получаются при использовании следующего уравнения:

$$Z = 230I^{1,5}, \quad (10.2)$$

где Z в мм⁶/м³, а I в мм/ч.

Если теперь подставить уравнение (10.2) в уравнение (10.1), то получим, что

$$P_r = \frac{c_1 I^{1,5}}{r^2}, \quad (10.3)$$

где c_1 — постоянная, равная 230.

Уравнение (10.2) позволяет вычислить интенсивность дождя I , если известны его удаление r и величина отраженной от него мощности P_r . Оба эти параметра можно получить из радиолокационных измерений.

10.1.3. Калибровка метеорологического радиолокатора

Калибровка радиолокатора заключается в определении постоянной C_1 в уравнении (10.3). Обычно для этого используется так называемый метод эталонной цели, заключающийся в том, что определяется сигнал от эталонной цели с заданной эффективной поверхностью рассеяния. Эталонная цель, например шар, подвешивается на аэростате или выпускается в свободный полет. В последнем случае осуществляется сопровождение эталонной цели до предельного расстояния обнаружения. Величина принятого сигнала и расстояние до цели позволяют рассчитать параметр c_1 .

В оперативной практике не часто можно производить калибровку по эталонной цели, находящейся в воздухе. В таких случаях калибровку радиолокатора осуществляют с помощью стандарт-генератора. Сигнал стандарт-генератора заданной мощности подают на вход приемника и по его уровню производят калибровку.

Относительные измерения уровней сигналов, необходимые для локализации объемных целей, таких, как осадки, производят с помощью устройства изоххо. Принцип работы с этим устройством заключается в том, что в волноводный тракт приемника вводятся ступенями известные уровни затухания приемного тракта. В результате на экранах ИКО и ИДВ получают последовательные изображения очагов осадков, границы которых определяются различными уровнями сигналов.

10.2. Метеорологическая лазерная локация

Наряду с метеорологической радиолокацией в последнее время для изучения процессов и измерения параметров атмосферы широко используется метод лазерной локализации.

В локаторах, или лидарах, в качестве передатчика используются оптические квантовые генераторы-лазеры (ОКГ), чаще всего импульсные. Основным достоинством ОКГ, как и МРЛ, является получение информации о состоянии атмосферы за небольшие промежутки времени, когда состояние основных атмосферных параметров не успевает измениться. Огромные мощности современных лазеров позволяют принять на Земле сигнал, обусловленный рассеянием в высоких слоях атмосферы.

Большая частота посылок зондирующего импульса лазера делает возможным прослеживание быстроменяющихся вариаций исследуемых параметров атмосферы, а пространственное разрешение, зависящее от длительности импульса и достигающее в настоящее время долей сантиметра, позволяет детально определить структуру изучаемого метеорологического объекта. Для изучения состава атмосферы с помощью лазерных локаторов используются методы комбинационного и резонансного рассеяния и поглощения излученного импульса в атмосфере. Для исследования движений в атмосфере с помощью лазера создаются доплеровские оптические системы. Наконец, использование волн оптического диапазона в лазерных локаторах позволяет сделать приемно-передающую аппаратуру лидара малогабаритной по сравнению с аналогичными радиотехническими средствами, что немаловажно, например, при конструировании спутниковых лазерных систем.

Все эти возможности лидаров привели к тому, что через несколько лет после создания (1960 г.) возник и стал быстро развиваться новый перспективный метод исследования атмосферы — метеорологическая лазерная локация.

10.2.1. Принцип работы лазера

Электромагнитное излучение есть энергия, передаваемая в пространстве в форме электромагнитных волн. Всякий раз, когда электрический заряд находится в состоянии колебания или ускорения, от него распространяется возмущение в виде электромагнитных полей. Частотный спектр таких волн очень велик, он охватывает радиоволны, инфракрасные, видимые, ультрафиолетовые и рентгеновские лучи и гамма-лучи.

Эйнштейн и Планк показали, что электромагнитная энергия излучается или поглощается порциями, квантами, называемыми фотонами. Энергия фотона пропорциональна частоте излучения ν :

$$E = h\nu \quad (10.4)$$

(h — постоянная Планка).

Атом, находящийся в определенном энергетическом состоянии, может увеличить свою энергию либо потерять ее при взаимодействии с электромагнитной волной или при столкновении

с другими атомами. Он также может самопроизвольно перейти в состояние с более низким энергетическим уровнем путем излучения фотона. Переход на более высокий уровень может произойти только в том случае, когда частота действующего электромагнитного излучения f равна разности энергий двух состояний, между которыми совершается переход, деленной на постоянную Планка, т. е.

$$f = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (10.5)$$

Когда электромагнитное излучение вызывает переход атома на более высокий энергетический уровень, он поглощает энергию, источником которой служит проходящая волна. И наоборот, при переходе на более низкий энергетический уровень атом теряет энергию в виде электромагнитного излучения. Прирост энергии проявляется в образовании одного фотона, когерентного с действующей волной. Описанное явление носит название индуцированного (стимулированного) излучения. Одновременно с индуцированным излучением приблизительно на той же частоте происходит самопроизвольное (спонтанное) излучение.

Когда вещество находится в состоянии энергетического равновесия, его атомы могут иметь различные энергетические уровни. Нижние энергетические уровни атомов распределены более плотно, чем высокие, поэтому при действии электромагнитным излучением будет происходить суммарное поглощение энергии веществом.

Однако если равновесие нарушается таким образом, что на более высоких энергетических уровнях оказывается большее число атомов, то будет происходить усиление мощности электромагнитной волны, падающей на вещество. Это явление используется в лазерах.

В настоящее время по виду активного вещества лазеры делятся на четыре типа, причем работа приборов каждого типа основывается на различном применении изложенных выше принципов. Это лазеры на твердом теле, газовые лазеры, полупроводниковые (инжекционные) и жидкостные лазеры.

Покажем принцип действия ОКГ на примере рубинового лазера.

Для обеспечения возникновения генерации необходим объемный резонатор, в качестве которого применяется кристалл рубина. Торцы цилиндрического стержня, изготовленного из кристалла рубина, посеребрены; один торец представляет собой полностью отражающее зеркало, другой отражает только 98% света, а остальной свет выходит через торцевую грань.

На рис. 10.5. приводится схема энергетических уровней иона хрома в рубине. Основное энергетическое состояние представлено уровнем E_1 , в то время как уровни E_2 и E_3 — возможные энергетические состояния ионов хрома. При облучении кри-

сталла светом лампы-вспышки A энергия некоторых ионов возрастает по линии A до уровня E_3 . Спустя некоторое время часть ионов снова переходит по линии B на уровень E_1 , некоторые — на уровень E_2 . Скорость, с которой осуществляется переход ионов на уровень E_2 , больше скорости перехода в основное состояние. Ионы остаются на уровне E_2 в течение некоторого времени; а затем возвращаются в основное состояние. Скорость, с которой ионы переходят с уровня E_2 на уровень E_1 , меньше скорости, с которой они поднимаются из основного состояния на уровень E_3 . Таким образом, при «оптической накачке» число ионов, обладающих энергией, соответствующей уровню E_2 , больше числа ионов, находящихся в основном энергетическом состоянии. Следовательно, достигается инверсия уровней, необходимая для работы лазера. При возвращении в основное состояние с уровня E_2 ионы хрома излучают фотоны C .

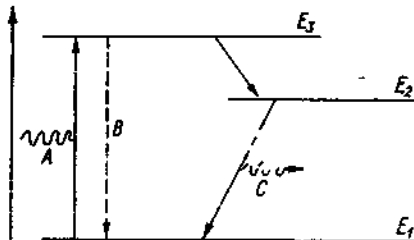


Рис. 10.5. Схема энергетических уровней иона хрома в рубине.

Типичный импульсный рубиновый лазер при температуре около 20°C излучает красный свет с длиной волны 6943 Å. В зависимости от типа прибора энергия импульса может изменяться от долей джоуля до нескольких тысяч джоулей. Средняя мощность импульса довольно низка, однако может быть достигнута очень высокая пиковая мощность при использовании метода, известного под названием «формирование гигантского импульса». Одно из зеркал оптического резонатора можно сделать внешним по отношению к кристаллу, а между зеркалом и рубиновым стержнем поместить специальный затвор, управляемый электрическим током. Тогда момент возникновения индуцированного излучения (лазерный эффект) может быть задержан на время, достаточное для того, чтобы очень большое число ионов успело перейти в возбужденное состояние. Затем затвор открывается и излучается очень короткий импульс, пиковая мощность которого может достигать нескольких сот мегаватт.

10.2.2. Измерение параметров атмосферы с помощью ОКГ

Появление оптических квантовых генераторов привлекает все большее внимание исследователей из многих областей науки, в том числе и метеорологии.

Удобство использования лазера для работы в оптическом диапазоне определяется рядом его качеств, которые очень часто выгодно отличают его от методов прожекторного или радиолокационного зондирования.

Высокая монохроматичность, исключительная когерентность, высокая разрешающая способность, большая мощность в импульсе, возможность излучения поляризованной волны, работа в ближней зоне и другие качества, присущие лазеру, позволяют значительно расширить возможности метеорологических наблюдений, которые трудно осуществить другими средствами зондирования. Метеорологическая информация, которую можно получить с помощью лазера, основывается на трех явлениях: поглощении, рассеянии и интерференции.

Схема устройства лазерного лоатора аналогична схеме метеорологического радиолокатора. Однако использование волн оптического диапазона в лидаре, естественно, требует совершенно иной приемно-передающей аппаратуры.

Лазерные импульсы при рассеивании в атмосфере принимаются оптической антенной и детектируются, например, фотумножителем ФЭУ. Узкополосные интерференционные фильтры, настроенные на длину волны лазерного излучения, ограничивают шумы, вызванные солнечным излучением, светом звезд, свечением звездного неба и т. п.

Мощность отраженного сигнала $P(z)$, обусловленная рассеянием в атмосфере с расстояния z от лоатора, может быть найдена через радиолокационное уравнение применительно к лазерному источнику:

$$P(z) = P_0 \frac{S}{z^2} \frac{c\tau}{2} K_{\text{п}} K_{\text{пр}} \sigma(z) \chi(z) e^{-2\alpha(z) \cdot z}, \quad (10.6)$$

где P_0 — мощность излучения ОКГ, S — площадь приемной антенны, c — скорость света, τ — длительность импульса ОКГ, $K_{\text{пр}}$ — коэффициент пропускания оптики приемника, $K_{\text{п}}$ — коэффициент пропускания оптики передатчика, $\sigma(z)$ — коэффициент рассеяния, $\chi(z)$ — модуль вектора индикатрисы рассеяния для угла 180° , а $e^{-2\alpha(z) \cdot z}$ — экспонента, учитывающая ослабление светового луча в атмосфере на пути лидар — рассеивающий слой — лидар. Коэффициент ослабления $\alpha(z) = \sigma(z) + h(z)$, где $h(z)$ есть поглощение лазерного излучения атмосферными газами.

Информация о свойствах среды заключена в $\sigma(z)$, $\chi(z)$ и $e^{-2\alpha(z) \cdot z}$.

С помощью лидаров можно проводить детальные исследования различных процессов, происходящих в атмосфере, а также получать необходимую информацию о состоянии атмосферы. Укажем на некоторые возможности измерения параметров атмосферы с помощью метеорологических лазерных лоаторов.

1. Определение фазы облаков и туманов по поляризационным характеристикам луча лазера. Этот метод основывается на измерении степени поляризации L рассеянного излучения лазера облачной средой или туманом. Если облако облучать линейно-поляризованным лучом с $L=1$, то в результате рассеяния этого луча происходит изменение L , т. е. рассеянное излучение деполаризуется. Деполаризация получается различной в зависимости от фазового состояния облачной среды. При этом численное значение L определяется по формуле

$$L = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}}, \quad (10.7)$$

где $I_{\parallel}$ и $I_{\perp}$ — интенсивности взаимно-ортогональных компонент, принятых приемниками со скрещенными поляридами.

2. Определение параметров облачности. Этот метод является перспективным. С помощью наземного лидара по коэффициенту рассеяния среды определяют такие важные параметры облачности, как водность и число капель, а также измеряют концентрацию аэрозоля до больших высот.

3. Определение видимости на достаточно больших расстояниях и регистрация изменения прозрачности атмосферы. Обычно для измерения прозрачности атмосферы или связанной с ней метеорологической видимости используются системы, состоящие из источника света и приемника, расположенных в противоположных концах оптического пути. Расстояние, отделяющее источник излучения от приемника, фиксируется по пределу видимости для наиболее плохих атмосферных условий. Это не позволяет регистрировать прозрачность атмосферы на протяженных трассах одним прибором. Другим недостатком таких систем является возможность практических измерений только на горизонтальных трассах.

Деформация импульса ОКГ в рассеивающей среде позволяет использовать этот эффект для измерения метеорологической дальности видимости. Создание лазерных лоаторов, определяющих прозрачность атмосферы, и разработка соответствующих методов измерений позволят производить измерения на любых трассах.

4. Применение лидаров для исследования газового состава атмосферы. Это одна из самых интересных и перспективных задач использования лазеров для изучения атмосферы. В этом случае полностью используются свойства, присущие только ОКГ, — монохроматичность при большой мощности излучения и возможность перестройки частоты лазера.

Лидары, предназначенные для определения газового состава атмосферы, значительно сложнее лидаров, используемых для исследования облаков и аэрозолей, в них применяются новые типы ОКГ.

Зная параметры линии поглощения атмосферного газа и линии излучения ОКГ и измеряя интенсивность отраженного сигнала в линии поглощения и вне ее, можно определить концентрацию этого газа в атмосфере. К достоинству такого метода относится то обстоятельство, что влияние аэрозольного рассеяния на интенсивность отраженного сигнала сводится к нулю, так как оно практически одинаково для двух близлежащих длин волн.

5. Измерения температуры и давления атмосферы лазерным локатором. Для этого необходимо прежде всего зарегистрировать сигнал, обусловленный молекулярным рассеянием, интенсивность которого, по крайней мере в тропосфере, меньше интенсивности аэрозольного рассеяния. Зная параметры приемно-передающей аппаратуры и мощность приходящего сигнала, можно рассчитать плотность рассеивающих молекул, а по ней и температуру.

Несмотря на известные достоинства метеорологической лазерной локации, этот метод имеет ряд существенных недостатков, ограничивающих применение его для получения информации о состоянии атмосферы в нужный момент времени. К этим недостаткам можно отнести, во-первых, невозможность измерения параметров атмосферы до больших высот при наличии сплошной облачности, во-вторых, ограниченность глубины проникновения луча лазера в облако или туман, что существенно снижает эффективность применения лидара для пространственного измерения микроструктуры, водности и т. п. этих объектов.

В связи с этим лазерные методы измерения атмосферных параметров пока не могут конкурировать с методами радиозондирования атмосферы, а также с измерениями с помощью метеорологических ракет.

10.3. Метеорологические спутники

Искусственные спутники Земли открыли новые горизонты в области исследований атмосферы. Впервые появилась возможность непосредственно получать информацию о состоянии атмосферы в глобальном масштабе за короткое время.

Искусственные спутники и космические корабли представляют собой сложные летающие геофизические и астрофизические лаборатории. Они дают возможность изучать состав и строение земной атмосферы до любой высоты, солнечную радиацию, не искаженную рассеянием и поглощением в атмосфере, условия распространения в атмосфере радиоволн, космические лучи и многие другие явления и процессы. Самое же главное, пожалуй, состоит в том, что со спутника можно получать информацию о состоянии атмосферы практически в любой точке земного шара.

Главная задача, стоящая перед метеорологическими спутниками,— получение необходимой первичной информации о метеорологических процессах в планетарном масштабе и разработка методов использования этой информации для прогноза погоды и климата.

Успешное изучение атмосферных процессов и решение проблемы прогноза погоды в большой степени зависят от полноты исходных данных о состоянии атмосферы. В настоящее время исходные данные о состоянии атмосферы получают с помощью сети метеорологических станций и станций радиозондирования. Естественно, что значительная часть земного шара, занимаемая океанами, а также труднодоступные районы суши практически остаются неосвоенными. Поэтому вполне понятен тот большой интерес метеорологов, который был проявлен с их стороны к автоматическим и пилотируемым космическим кораблям. Освоение искусственного спутника Земли как информатора о текущем состоянии погоды и носителя приборов, дистанционно измеряющих метеорологические элементы, позволило решить ряд очень важных проблем, стоящих перед службой получения, сбора и распространения метеоинформации,— глобальность наблюдений, накопление, первичная обработка и сжатие информации, возможность ее «сброса» в специальные центры и непосредственно широкому кругу потребителей.

Однако все же не следует думать, что при помощи аппаратуры, устанавливаемой на спутнике, можно в любой точке земного шара получить такую же точную и подробную информацию о температуре, влажности, давлении и других метеопараметрах, которую получают в настоящее время при помощи датчиков, установленных на радиозондах, самолетах и ракетах. Поэтому возникает необходимость в постановке специальных исследований по выяснению взаимосвязи между различными системами зондирования и их взаимной дополняемости для того, чтобы создать единую систему сбора, обработки и анализа данных.

Первый этап освоения искусственных спутников Земли для получения метеорологической информации завершился в Советском Союзе созданием постоянно действующей метеорологической космической системы спутников «Метеор». В США первые метеорологические спутники носили название «Тайрос», впоследствии эти спутники были заменены более совершенными — спутниками «Эксплорер», «Эсса» и «Нимбус».

Укажем на основные задачи, которые решаются в настоящее время с помощью метеорологических спутников.

1. Наиболее освоенным видом спутниковой информации в настоящее время являются изображения облачного покрова, получаемые по отраженному свету (телевизионное изображение) и по собственному тепловому излучению облаков и подстилающей поверхности (инфра-красные изображения) в области окна прозрачности 8—10 мкм, когда спутник находится на

теневого части планеты. Этот вид информации широко используется в повседневной работе синоптиками, анализ фотографий позволяет оценить текущую синоптическую ситуацию в различных районах земного шара и в первую очередь над слабо освещенными районами. Спутниковые фотографии облачности позволяют своевременно обнаруживать такие опасные явления, как тропические ураганы и циклоны, и проследить их траектории. Большую ценность для морского флота представляют данные о состоянии ледового покрова.

2. Одной из фундаментальных проблем для долгосрочных прогнозов погоды является необходимость учета энергетики крупномасштабных атмосферных процессов. Это требует в первую очередь детальных исследований закономерностей перераспределения тепла за счет радиационных процессов: Земля получает энергию лишь от Солнца, а теряет ее в космос только за счет теплового излучения. В связи с этим важное значение приобретает исследование распределения по поверхности планеты радиационного баланса системы земная поверхность—атмосфера и его составляющих.

Для этих целей на спутниках установлен комплекс актинометрической аппаратуры, позволяющий измерять уходящую отраженную коротковолновую (солнечную) и длинноволновую (тепловую) радиацию системы Земля — атмосфера.

Подобно известным фотоснимкам глобальной облачности, карты уходящей длинноволновой радиации дают новую информацию о состоянии атмосферы глобального и синоптического масштабов. Данные о радиационном балансе и уходящей длинноволновой радиации могут служить для построения и уточнения численных моделей общей циркуляции атмосферы и долгосрочного прогноза погоды.

3. Задача определения вертикального профиля температуры по спектру уходящего теплового излучения в полосе поглощения углекислого газа представляет наибольший интерес с точки зрения практической реализации. Метод термического зондирования (восстановление профиля температуры) атмосферы (метод решения обратных задач) основан на спектральном измерении уходящего излучения в полосе поглощения углекислого газа (15 мкм). Однако для этого необходимо еще знать температуру земной поверхности, которая может быть определена по уходящему излучению в окне прозрачности 8—12 мкм. Существенным недостатком этого метода является значительная погрешность определения профиля температуры при наличии облачности в подспутниковой точке.

С помощью метеорологических спутников можно также проводить измерения общего содержания влаги, озона, аэрозоля в атмосфере и определять зоны осадков по уходящему излучению в субмиллиметровом диапазоне длин волн.

11. МЕТОДЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЛАКА И ТУМАНЫ

Накопление наших знаний об атмосфере приводит к более полному пониманию физических процессов, протекающих в ней и вызывающих образование облаков и осадков. На протяжении всей истории человечества такие неблагоприятные погодные явления, как засуха, наводнения, град, являлись стихийными бедствиями, против которых у человека не было защиты.

Стремительный технический прогресс XX в. не сделал человеческую деятельность полностью свободной от влияния погоды. Более того, усложнение и совершенствование техники подчас делают ее более чувствительной к погодным условиям. Например, туманы препятствуют нормальной работе всех видов транспорта, особенно самолетов. Развитие сверхзвуковой авиации и космонавтики поставило новые задачи защиты летательных аппаратов от гроз и града при полетах в тропосфере. Практически все отрасли народного хозяйства в той или иной мере страдают от неблагоприятных погодных условий, но больше всего от погоды зависит сельское хозяйство, которому засухи и градобития наносят большой ущерб.

С давних времен человечество мечтало стать независимым от влияния неблагоприятных и опасных явлений погоды. История сохранила сведения о попытках человека бороться с засухой, грозой и градом, но эти методы борьбы были очень примитивными вследствие ограниченности знаний и представлений людей того времени о погодных явлениях.

В истории активных воздействий на погоду следует упомянуть американского ученого Дж. Эспая, который в написанной им в 1839 г. статье «Искусственные дожди» впервые приблизился к научному пониманию процесса образования конвективных облаков. В 1931 г. голландский физик А. Ферарти выполнил ряд опытов по рассеянию облаков с помощью твердой углекислоты, но он не сумел достаточно обоснованно объяснить результаты своих опытов, поэтому его работа не получила признания.

В СССР исследования по проблеме активных воздействий были начаты после 1920 г. Этими работами руководили В. Н. Оболенский, С. Л. Бастамов, М. А. Аганин и В. А. Федосеев.

В 1946 г. в США В. Шефер и И. Лэнгмюр провели первые успешные опыты по рассеянию тумана в холодильной камере с помощью твердой углекислоты и удачно повторили опыты Фераарта по рассеянию облаков. С этого времени активные воздействия как целенаправленное вмешательство человека в атмосферные процессы получили признание во всем мире. В 40–50-е годы работы по активным воздействиям в СССР, США, Австралии и других странах были направлены главным образом на искусственное рассеяние облаков и туманов и вызывание осадков. Позднее, в 60-х годах, в Советском Союзе получили развитие исследования по созданию методов предотвращения грозы и града. Работы по активным воздействиям велись под руководством академика Е. К. Федорова. Большой вклад в их развитие внесли советские ученые И. И. Гайворонский, В. Я. Никандров, Н. С. Шишкин, Г. Ф. Прихотько, Л. Г. Качурин, Г. К. Сулаквелидзе и А. И. Карцивадзе.

В настоящее время научно-исследовательские работы по активным воздействиям ведутся в Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО), Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (ГГО), Украинском научно-исследовательском гидрометеорологическом институте (УкрНИГМИ), Институте прикладной геофизики (ИПГ), Институте экспериментальной метеорологии (ИЭМ), Высотном геофизическом институте (ВГИ), Институте геофизики АН ГрузССР (ИГАН), Закавказском НИГМИ (ЗакНИГМИ), Среднеазиатском региональном НИГМИ (СарНИГМИ) и Ленинградском гидрометеорологическом институте (ЛГМИ). Непосредственно активные воздействия и эксперименты, связанные с ними, проводятся в постоянно действующих противогрозовых экспедициях в Молдавии, Крыму, Грузии, Армении, Азербайджане, Узбекистане, Таджикистане и на Северном Кавказе.

11.1. Физические основы активного воздействия на облака и туманы

11.1.1. О механизмах воздействия на облака и туманы

Туманы и грозовые облака являются весьма энергоемкими метеорологическими явлениями — на их образование затрачивается колоссальная энергия. Так, на образование среднего грозового облака расходуется энергия, сравнимая с той, которая высвобождается при взрыве атомной бомбы. Поэтому прямое вмешательство в атмосферные процессы с целью их изменения неразумно, а зачастую и невозможно ввиду ограниченности наших энергетических ресурсов. Однако атмосферные процессы облакообразования, несмотря на большие масштабы и энергетические мощности, имеют при своем развитии слабые, уязвимые места. Такими уязвимыми местами являются состояния неустойчивого равновесия, которые для облаков наблюдаются при отсутствии в них твердой фазы. Вода в облаках может находиться в трех фазах: газообразной (водяной пар), жидкой (вода) и твердой (ледяные кристаллы, крупа, град). Осадки из переохлажденных облаков (в которых температура среды ниже 0°C) выпадают тогда, когда облака состоят из переохлажденных капель и ледяных кристаллов. Такие облака называются смешанными, ледяные частицы в них растут за

счет перехода молекул воды с капель на кристаллы в силу разности упругостей насыщения над каплями и ледяными кристаллами (рис. 11.1). Если же облако состоит только из переохлажденных капель и при этом примерно одинакового размера (что бывает в туманах и слоистых облаках в холодное время года), то осадки из этого облака не выпадут, поскольку отсутствует механизм укрупнения и роста облачных частиц до размеров частиц осадков. Облако в этом случае находится в состоянии неустойчивого равновесия, которое можно нарушить путем искусственного образования в нем ледяных кристаллов. Из теплых облаков (температура которых выше 0°C) осадки могут выпадать только в том случае, если облачные

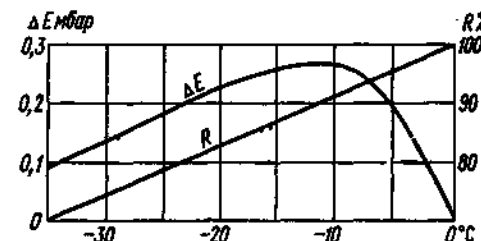


Рис. 11.1. Разность упругостей насыщения над водой и льдом ΔE и относительная влажность при насыщении над льдом R .

капли различны по размеру, что приводит к слиянию и укрупнению их до размеров дождевых капель. Ввиду того что работы по воздействию на теплые облака и туманы не получили до настоящего времени широкого развития, механизмы воздействия на теплые облака и туманы здесь не рассматриваются.

Ледяные кристаллы в облаке можно получить путем введения в него частиц твердой углекислоты, либо распылением в нем так называемых льдообразующих аэрозолей. Твердая углекислота (сухой лед) и льдообразующие аэрозоли в практике активных воздействий называются *реагентами*. Процесс введения реагента в облако обычно называется *засевом*. Действие хладореагента твердой углекислоты (CO_2) сводится к тому, что испарение частиц (гранул) твердой углекислоты в переохлажденном жидкокапельном облаке вызывает резкое охлаждение воздуха (температура поверхности испаряющейся углекислоты -79°C) и большие пересыщения воздуха водяным паром вблизи гранул хладореагента. Это приводит к образованию огромного количества мелких ледяных кристаллов.

Появление искусственных ледяных кристаллов в облаке приводит к развитию процесса перегонки пара с облачных капель на ледяные кристаллы аналогично процессу, который происходит в естественных смешанных облаках. Предполагая, что вся холодопроизводящая способность твердой углекислоты, введенной в облако, затрачивается на охлаждение окружающего воз-

духа до некоторой критической температуры ($t_{кр}$) и на образование ледяных кристаллов, можно оценить максимально возможное количество образованных кристаллов N_{max} по формуле

$$N_{max} = \frac{Q(q_t - q_{t_{кр}})}{\frac{4}{3} \pi \rho_{\text{л}} r_{\text{кр}}^3 c (t - t_{кр}) + L(q_t - q_{t_{кр}})}, \quad (11.1)$$

где $a = 152,8$ кал/г — холодопроизводящая способность твердой углекислоты; q_t и $q_{t_{кр}}$ — количество водяного пара, содержащееся в единице массы воздуха при температуре t и $t_{кр}$ соответственно, г/г; $\rho_{\text{л}}$ — плотность льда, г/м³; $r_{\text{кр}}$ — критический радиус ледяной частицы, м; c — теплоемкость воздуха, кал/г/°C; L — скрытая теплота образования ледяных частиц, кал/г.

Расчеты показывают, что при испарении 1 г хладореагента в облачной среде при температуре ниже -5°C может образоваться 10^{16} ледяных кристаллов.

Введение льдообразующих аэрозолей в переохлажденное облако осуществляется путем их возгонки в специальных генераторах или при горении пиротехнических составов, содержащих активный аэрозоль в виде иодистого серебра (AgI) или иодистого свинца (PbI₂). Иодиды этих двух металлов нашли наиболее широкое применение в активных воздействиях. Их действие основано на кристаллографическом сходстве со льдом, при введении в облако они служат искусственными ядрами кристаллизации. Ледяные кристаллы могут расти на этих ядрах за счет сублимации водяного пара на их поверхности или замерзания облачных капель при столкновении с ними. Льдообразующие аэрозоли характеризуются пороговой и предельной активностью.

Температурный порог образования ледяных кристаллов у AgI и PbI₂ равен $-5 \dots -6^\circ\text{C}$, а выход активных ядер зависит от температуры облачной среды и способа возгонки. Выход активных ядер с 1 г AgI при температуре среды $-10 \dots -20^\circ\text{C}$ изменяется от 10^{13} до 10^{16} , выход активных ядер с 1 г PbI при этих же температурах равен $10^{13} \dots 5 \cdot 10^{13}$. Эти значения близки к предельной активности AgI и PbI₂. Обычно основные характеристики льдообразующих аэрозолей определяют по кривым выхода, построенным в зависимости от температуры. На рис. 11.2 показана температурная зависимость выхода льдообразующих ядер при возгонке AgI и PbI в пиротехнических составах.

Исходя из разности упругостей насыщения над водой и льдом и основных характеристик рассмотренных выше реагентов, можно сделать вывод о целесообразности введения этих реагентов в облака и туманы при температуре ниже -5°C

при прочих благоприятных условиях для воздействия, которые будут рассмотрены ниже.

Изменение фазового состояния облаков или соотношения жидкой и твердой фаз в облаках с помощью льдообразующих реагентов (CO₂, AgI и PbI) является основным механизмом искусственного воздействия с целью рассеяния переохлажденных облаков и туманов, вызывания осадков, предотвращения града, а также является одним из методов предотвращения грозовой активности облаков.

Среди других механизмов воздействия, нашедших применение в разработке методов предотвращения гроз, следует отметить механизм изменения энергетического неустойчивого равновесия конвективных (кучевых) облаков и механизм увеличения электрической проводимости. Первый из них основывается на том, что в определенных стадиях развития конвективных облаков в неустойчиво стратифицированной атмосфере можно искусственно развить нисходящие движения. Второй основан на представлении грузового облака в виде «генератора—конденсатора». В процессе развития облака на пластинах «конденсатора» (верхняя заряжается положительно, а нижняя — отрицательно) накапливаются значительные электрические заряды, которые приводят к пробое этого конденсатора (облака). В данном случае молния является той искрой, которая разряжает конденсатор. Уменьшение электрического сопротивления облачной среды между двумя условными пластинами конденсатора будет препятствовать накоплению больших зарядов на них, вследствие этого напряженность электрического поля в облаке не достигнет пробойной величины.

Рассмотрим физические основы методов рассеяния переохлажденных облаков и туманов, вызывания осадков и предотвращения гроз и града, в которых используются описанные выше механизмы воздействия и которые получили экспериментальную проверку.

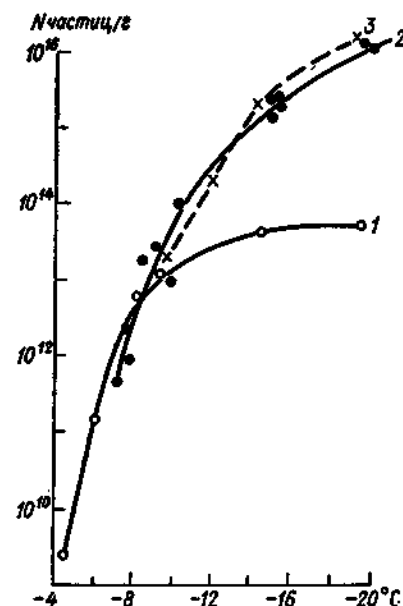


Рис. 11.2. Выход льдообразующих ядер в зависимости от температуры облачной среды с 1 г PbI₂ для пироставов (1), с 1 г AgI для генератора (2), с 1 г AgI для пироставов (3).

11.1.2. Рассеяние переохлажденных облаков и туманов

Рассеяние облаков и туманов в первую очередь необходимо для нужд авиации. Взлет и посадка самолетов выполняются только для определенной дальности метеорологической видимости. Для нормального движения самолетов в сложных погодных условиях (при наличии низких слоистых облаков и туманов) необходимо обеспечить определенный минимум дальности видимости над взлетно-посадочной полосой (ВПП).

С 1963 г. на аэродромах нашей страны производится рассеяние переохлажденных низких облаков и туманов с помощью твердой углекислоты. Введение хладореагента в облака и туманы осуществляется с самолета при пролете над их верхней границей. В туманы вводить хладореагент можно также с земли с помощью специальных установок. В последние годы в ЦАО начаты эксперименты по рассеянию туманов путем распыления с земли жидкого пропана.

В результате резкого локального охлаждения облачной среды образуются ледяные кристаллы, которые растут за счет перегонки водяного пара с капель. Ледяные кристаллы вырастают до размеров частиц осадков, выпадающих из облака (тумана), и в месте введения реагента облачность (туман) рассеивается. Размеры зоны рассеяния зависят от скорости распространения ледяных кристаллов, которая определяется развитием турбулентной диффузии. Ширину зоны рассеяния A в метрах можно оценить по формуле

$$A = \frac{c}{\sqrt{2}} (\sigma \tau)^{m/2},$$

где c — характеристика турбулентной диффузии; v — средняя скорость ветра на уровне воздействия, м/с; τ — время, прошедшее с начала воздействия, с; m — показатель, зависящий от степени турбулентности.

На рис. 11.3 приведены полученные в ЦАО экспериментальные данные о расширении зоны рассеяния облачности A в зависимости от времени при различной скорости ветра на уровне воздействия.

При искусственном рассеянии облаков и туманов существенное значение имеет количество вводимого реагента (дозировка), потому что при избыточном введении реагента (перезасева) облако или туман полностью кристаллизуется. Из-за недостатка влаги многочисленные мелкие кристаллы не вырастают до размеров частиц осадков (снежинок) и остаются во взвешенном состоянии. Поэтому для успешного воздействия на облака и туманы с целью их рассеяния необходимо правильно определить дозировку реагента. Дозировка зависит от температуры облачной среды, скорости ветра, вертикальной

протяженности облака или тумана (мощности ΔH) и их микрофизического строения. Дозировки обычно рассчитываются в граммах или килограммах на 1 км пути пролета самолета (г/км или кг/км). Приведем оптимальные дозировки, т. е. минимальные расходы реагента — твердой углекислоты ($M_{\text{опт}}$), обеспечивающие рассеяние облаков:

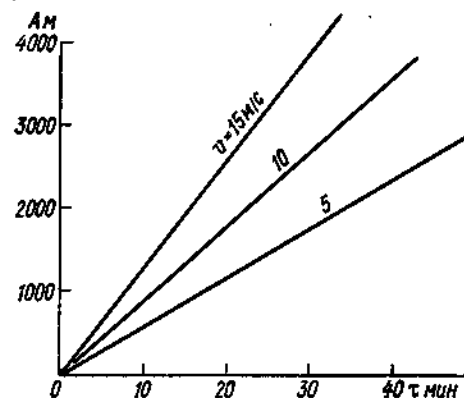


Рис. 11.3. Расширение зоны рассеяния со временем при различной скорости ветра на уровне воздействия.

ΔH м	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
v_{max} м/с	8	10	12	10	10	8	6	6	6	6
$M_{\text{опт}}$ г/км	100	150	200	250	350	450	550	700	800	1000

Эти данные получены по результатам 256 опытов воздействия на слоистые облака, выполненные в УкрНИГМИ. Опыты проводились при температуре ниже -4°C , мощности облачных слоев от 150 до 750 м и скорости ветра в облаках от 1 до 22 м/с, но в большинстве случаев скорость ветра не превышала 10–12 м/с.

Данные показывают, что с увеличением мощности облачного слоя на каждые 50 м дозировку реагента необходимо увеличивать на 50 г/км, а затем на 100–150 г/км. Согласно результатам этих опытов, образование сплошной зоны рассеяния возможно при скорости ветра до 10–12 м/с.

Многочисленные опыты воздействия на переохлажденные облака и туманы в разных районах нашей страны позволили выяснить региональные и сезонные особенности процесса их рассеяния. Эти исследования легли в основу разработанных методов рассеяния слоистообразных облаков и туманов над аэродромами.

11.1.3. Искусственное вызывание осадков

Искусственное вызывание осадков осуществляется путем засева слоистых и конвективных облаков твердой углекислотой и льдообразующими аэрозолями. Рассмотрим случай введения

льдообразующего реагента в переохлажденное капельножидкое облако. Образовавшиеся кристаллы льда вначале растут за счет перегонки водяного пара с облачных капель. Этот так называемый конденсационный рост ледяной частицы при условии ее сферической формы можно оценить из соотношения

$$r = \sqrt{2\varepsilon D\tau}, \quad (11.2)$$

где r — радиус сферической ледяной частицы, м; ε — абсолютное пересыщение водяного пара; D — коэффициент молекулярной диффузии пара, см²/с; τ — время, с.

Конденсационный рост является преобладающим до момента достижения частицей радиуса 50 мкм, после чего основную роль в росте частиц играет слияние (коагуляция) облачных элементов (ледяных кристаллов с каплями). Коагуляционный рост ледяных частиц можно оценить по формуле

$$\Delta R = -\frac{\varepsilon\delta^*}{4\rho} \frac{v_R}{v_R - w} \Delta H, \quad (11.3)$$

где ΔR — приращение радиуса частицы за счет столкновения с облачными каплями в слое мощностью ΔH , м; ε — коэффициент захвата облачных капель ледяными частицами; δ^* — водность облака, г/м³; v_R — скорость падения частицы, м/с; w — скорость вертикального движения воздуха внутри облака, м/с; ρ — плотность ледяной частицы, г/м³.

Если скорость падения частиц осадков превышает скорость восходящего потока в облаке, то частицы выпадают на землю в виде дождя или снега. По описанной выше схеме осадки образуются в облаке в области отрицательных температур, т. е. выше нулевой изотермы. Форма их может быть разнообразной — от снежинок до градин. Летом нулевая изотерма располагается на высоте 3—4 км, поэтому частицы, пролетая слой теплого воздуха до выпадения на землю, как правило, успевают растаять.

Для начала развития процесса осадкообразования в облаках требуется концентрация искусственных ледяных кристаллов порядка 10^2 — 10^3 м⁻³. Мощность переохлажденных облаков слоистых форм при воздействии на них с целью вызывания осадков должна быть больше 250 м, а средняя водность (содержание жидкой воды в облаке) 0,05 г/м³. Для конвективных облаков существуют такие критические параметры, характеризующие возможность вызывания из них осадков, как температура воздуха на уровне засева, мощность всего облака и мощность его переохлажденной части.

11.1.4. Предотвращение гроз

В настоящее время наиболее интенсивно разрабатываются три метода предотвращения гроз. Первый из них основан на

создании искусственного нисходящего потока воздуха в развивающихся конвективных облаках. Нисходящие потоки в облаке могут быть созданы направленными струями от двигателя самолета, ракет, а также сбросом порошкообразных веществ (например, цемента). Искусственно созданные нисходящие движения в облаке могут привести не только к прекращению развития облака, но и к существенному или полному его разрушению. Многочисленные опыты воздействия на мощные кучевые (Cu cong.) и кучево-дождевые (Cb) облака, проведенные в Советском Союзе, указывают на возможность разрушения этих облаков путем сброса в них нескольких десятков килограммов грубодисперсных порошков.

Второй метод предотвращения грозовой активности облаков связан с преобразованием режима осадков, которые играют первостепенную роль в разделении и накоплении электрических зарядов в мощных конвективных облаках. Процессы образования и выпадения твердых осадков в виде крупы и града в конвективном облаке приводят к грозовой стадии его развития. Предотвращая процесс образования и роста крупных частиц осадков в облаке, можно предотвратить развитие грозы. Это обеспечивается путем повышения дозировки засева грозовых облаков, т. е. увеличением концентрации льдообразующих ядер. Идея воздействия заключается в том, чтобы перевести жидкокапельную часть облака в кристаллическую и тем самым ограничить рост частиц осадков. В этом случае коэффициент захвата ледяных кристаллов твердыми частицами осадков практически будет равен нулю, и, согласно уравнению (11.3), рост частиц осадков прекратится. Выполненные к настоящему времени опыты по интенсивному засеву грозовых облаков льдообразующими аэрозолями указывают на уменьшение числа молний из засеянных облаков в 2—3 раза.

В основу третьего метода предотвращения гроз положен принцип непосредственного воздействия на электрические характеристики облака с целью уменьшения напряженности поля. Он заключается в разбрасывании металлизированных нитей (разрядников) в облаке, на которых возникает так называемый коронный (тихий) разряд при напряженности электрического поля более низкой, чем напряженность, необходимая для осуществления грозового разряда. В результате облако постепенно разряжается.

Ток i коронного разряда для одного разрядника можно определить по формуле

$$i = \frac{aKE}{3} (E - E_0), \quad (11.4)$$

где a — диэлектрическая проницаемость среды, l — длина разрядника, K — подвижность ионов, E — напряженность поля в облаке, E_0 — пороговое значение напряженности поля при возникновении коронного разряда.

Металлизированные нити длиной 10 см и толщиной 75 мкм начинают коронировать при напряженности поля $E_0 = 3,3 \cdot 10^4$ В/м. Если принять $\alpha = 1,4 \cdot 10^{-11}$ Ф/м, $K = 2 \cdot 10^{-4}$ м² (В·с) и $E = 2 \cdot 10^5$ В/м, то ток коронного разряда с одной нити будет равен $4,8 \cdot 10^{-6}$ А. Согласно расчетам, в облако достаточно ввести 10^6 разрядников, чтобы ток коронного разряда достиг 4,8 А, т. е. значения, сопоставимого со значением тока, генерируемого средней грозой. Разрядные облаков (уменьшение в них напряженности поля) посредством коронных токов с металлизированных нитей, вводимых в облако с самолета, было показано серией полевых опытов.

11.1.5. Предотвращение града

Град представляет собой твердый вид осадков, которые образуются в конвективных облаках значительной вертикальной протяженности при больших скоростях восходящих потоков. Образующиеся частицы осадков из-за больших размеров не успевают растаять в теплом слое воздуха и выпадают на землю в виде комочков льда сферической, конической, эллипсоидальной и неправильной формы. Градины могут достигать больших размеров (5 см и более), но чаще выпадает град размером 10—20 мм.

По современным представлениям, выпадающий на землю град образуется при замерзании крупных облачных капель, концентрация которых невелика и составляет $1-0,1$ м⁻³. Вначале замерзшие капли растут за счет конденсации, а затем за счет коагуляции. Когда водность облака большая и скорости восходящих потоков значительны, градины вырастают до больших размеров и при выпадении на землю причиняют большой вред сельскохозяйственным культурам.

Для предотвращения выпадения крупного града необходимо создать в области образования града (между изотермами -5 и -15°C) большое число искусственных зародышей градин, которые смогли бы конкурировать с естественными градинами в распределении водности в облаке. Чем больше будет образовано градовых зародышей, тем менее опасными окажутся выросшие на них градины. Расчеты показывают, что существенного уменьшения конечных размеров градин за сравнительно короткое время можно ожидать при увеличении концентрации искусственных градовых зародышей в 10—100 раз. Однако, если град в облаке уже сформировался, в этом случае необходимо дополнительное увеличение концентрации искусственных градовых зародышей.

11.2. Организация противоградовой защиты

В Советском Союзе мероприятия по противоградовой защите проводятся с 1960 г. В настоящее время противоградовой защитой охвачены территории площадью более 5 млн. га в восьми союзных республиках, включая РСФСР (Северный Кавказ), Грузию, Армению, Азербайджан, Молдавию, Украину (Крым), Узбекистан и Таджикистан. Под защитой находятся земли, где выращиваются ценные, дорогостоящие культуры, такие, как виноград, хлопок,

табак, и садовые насаждения. На защищаемых территориях (ЗТ) площади градобитий (ГЗТ) сократились в 3—4 раза по сравнению с площадью градобитий на контрольных территориях (ГКТ), где защита не проводится. Экономический эффект противоградовой защиты очень велик. Создание в нашей стране производственной службы по борьбе с градом (ныне противоградовые экспедиции преобразованы в Военизированные службы по борьбе с градом (ВСБГ) является значительным достижением отечественной метеорологии и ее бурно развивающегося направления — методов активных воздействий на метеорологические процессы.

11.2.1. Противоградовый отряд, его структура и назначение

В рамках территориальных ВСБГ в стране действуют около 50 противоградовых отрядов, каждая служба объединяет по несколько отрядов. С самого начала противоградовая защита была нацелена на применение наземных ракетных и оружейных средств. Первые опыты воздействия на градовые облака, проведенные в 1958—1961 гг., определили основные направления в организации противоградовой защиты. В частности, для обеспечения эффективного искусственного вмешательства необходимо, чтобы защита охватывала определенную замкнутую территорию и подступы к ней с направлений наиболее частого проникновения градовых облаков. В связи с тем что градоопасные облака могут перемещаться или возникать над любой точкой защищаемой территории, необходимо, чтобы сеть стрелковых пунктов охватывала всю ЗТ и подступы к ней с учетом эффективного радиуса их действия. Так появилось основное первичное подразделение — противоградовый отряд, под защитой которого находится территория площадью около 100 тыс га, обычно в форме круга радиусом 18—20 км. Выбор площади ЗТ и ее формы определяется удобством управления операциями по воздействию. В центре ЗТ размещается командный пункт (КП) с радиолокационной станцией и узлом связи. Между КП и стрелковыми пунктами устанавливается двусторонняя радиосвязь в диапазоне УКВ. Вся информация о погоде (прогностетическая, радиолокационная и сообщения с пунктов) поступает на КП, где она оперативно обрабатывается и анализируется. С КП осуществляется руководство воздействиями. Стрелковые пункты размещены на ЗТ таким образом, чтобы с них простреливалось все пространство над ЗТ до высоты примерно 5 км.

11.2.2. Методика воздействия на градовые процессы

Методика воздействия включает в себя организацию средств доставки реагентов в облака, радиолокационные наблюдения за градовыми облаками и процедуру воздействия.

Большие масштабы градовых облаков и значительные скорости их перемещения (до 100 км/ч) предъявляют особые требования к средствам доставки реагента в облака. Эти средства с большой оперативностью должны обеспечивать доставку льдообразующих реагентов непосредственно в зону формирования града, распыление их и получение аэрозоля с высокой льдообразующей активностью. При этом необходимо создать наиболее благоприятные условия для быстрого распространения и равномерного распределения активного аэрозоля по всему объему градоопасной зоны облака, где возможно образование и рост града. Кроме того, средства доставки реагентов должны быть безопасными для применения в густонаселенных районах.

В настоящее время основными средствами доставки реагентов в градовые облака являются ракеты и зенитные артиллерийские снаряды. Конструкция ракет позволяет использовать их в качестве эффективных летающих генераторов льдообразующего аэрозоля, обеспечивающих распыление последнего по трассе полета ракеты.

Большая противоградовая ракета «Облако» состоит из корпуса, головной части, двигателя, парашютного устройства и дистанционных механизмов. Головная часть ракеты предназначена для размещения пиротехнического состава, выделяющего при сгорании льдообразующий аэрозоль PbI или AgI . Дым льдообразующего аэрозоля рассеивается через отверстия в корпусе головки и распространяется в облаке по траектории полета ракеты. Пиростав пресуется в виде шашки. Масса пиротехнической шашки равна 5,2 кг. Двигатель ракеты состоит из корпуса, пиропорохового заряда и блока с 12 наклонными соплами. Парашютный отсек, расположенный в хвостовой части ракеты, предназначен для размещения парашютной системы и крепления четырех лопастей стабилизатора. Парашютная система обеспечивает спуск ракеты на землю с небольшой скоростью (5—8 м/с), чем гарантируется безопасность применения ракеты в населенной местности. Ракета «Облако» имеет два автономно функционирующих дистанционных устройства — головное и донное. Головное дистанционное устройство (головная трубка) предназначено для воспламенения пиротехнической шашки в интервале времени 10—65 с. Использование головного дистанционного устройства позволяет диспергировать аэрозоль на заданном участке полета ракеты. Донное дистанционное устройство (донная трубка) служит для раскрытия парашюта в заданное время, которое устанавливается в пределах 10—60 с. Основные технические характеристики ракеты «Облако» следующие:

Калибр	125 мм
Длина	2100 мм
Масса ракеты со снаряженной головной частью	33 кг
Масса корпуса ракеты, опускающаяся на парашюте	12 кг
Максимальная дальность полета	12 км
Максимальная высота подъема	8,2 км
Длина трассы выделения активного аэрозоля	до 8 км

Количество активных льдообразующих ядер, получаемых при срабатывании одной ракеты, при температуре среды $-10^{\circ}C$ составляет около 10^{16} .

Первой противоградовой отечественной ракетой была ракета типа ПГИ, разработанная и примененная в 1958—1959 гг. Ракета ПГИ-М (противоградовое изделие модернизированное) представляет собой турбореактивный снаряд, стабилизация полета обеспечивается вращением снаряда со скоростью до 22 тыс оборотов в 1 мин. Ракета ПГИ-М состоит из головной части с дистанционным механизмом и двигателя. В головной части размещена пиротехническая шашка с реагентом, которая воспламеняется от дистанционного механизма в интервале времени 5—35 с. В конструкции ПГИ-М предусматривается самоликвидация ракеты с помощью шашки ВВ (взрывчатого вещества), обеспечивающей дробление ракеты на безопасные осколки. В случае отказа дистанционного механизма (головной трубки) или прекращения горения шашки аэрозольного дыма на 25-й или 40-й секунде (в зависимости от типа головной трубки) автоматически срабатывает дублирующая цепь и ликвидирует ракету. Ракета ПГИ-М имеет следующие основные характеристики:

Калибр	82,5 мм
Длина	478 мм
Масса с реагентом	3,1 кг
Масса пиротехнической шашки с льдообразующим аэрозолем	250 кг
Максимальная высота подъема	4,2 км
Длина трассы активного дыма	1,5—2 км

Количество активных льдообразующих ядер, получаемых при срабатывании одной ракеты, при температуре среды $-10^{\circ}C$ составляет 10^{14} — 10^{15} .

Запуск ракет «Облако» и ПГИ-М производится с четырехствольных установок полустанционного типа. Углы горизонтального наведения составляют 0 — 360° , а углы вертикального наведения 40 — 85° . Пульт управления у обеих установок позволяет производить запуск ракет с интервалом 5—10 с. На рис. 11.4 показан момент запуска ракеты «Облако».

В Алазанской долине ГрузССР используются новые противоградовые ракеты «Алазань». Отличительной особенностью этих ракет являются значительная интенсивность выброса реагента и скорострельность. Парашютная система у них отсутствует. После выброса реагента ракета самоликвидируется в результате взрыва, время которого задается дистанционной трубкой. Предусмотрены два варианта ракет «Алазань», отличающихся дальностью стрельбы.

При орудийном обстреле градовых облаков используются безосколочные снаряды типа «Эльбрус». Противоградовый снаряд «Эльбрус-2» имеет калибр 100 мм. Масса снаряда 12,5 кг. Корпус снаряда с навинчивающейся головкой изготовляется из материала, легко разрушающегося при взрыве. Внутри снаряда размещены брикеты взрывчатого вещества и реагента. При выстреле из зенитной пушки взводится головной взрыватель. Благодаря дистанционному устройству он срабатывает по истечении заранее заданного времени. Взрывчатое вещество воспламеняется и происходит взрыв, в результате которого распыляется реагент, а корпус снаряда и взрывателя разлетается на безопасные мелкие осколки. Аналогичный по устройству противоградовый снаряд «Эльбрус-3» предназначен для зенитного орудия калибра 130 мм.

Для того чтобы ракеты или снаряды, начиненные реагентом, правильно направить в зону образования града в облаке,

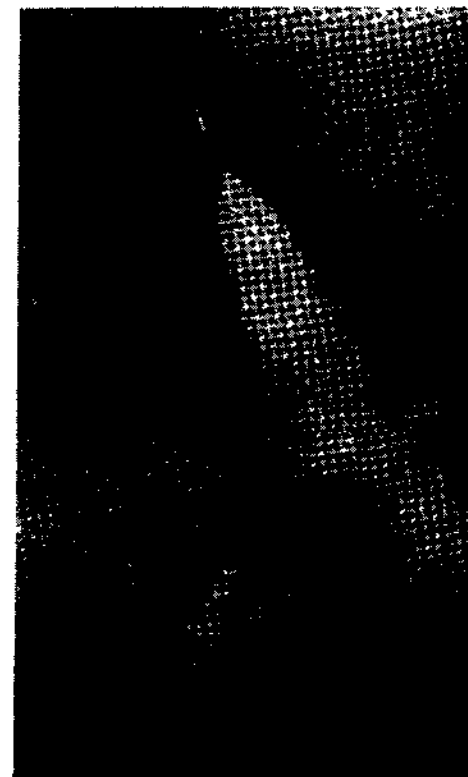


Рис. 11.4. Запуск противоградовой ракеты «Облако».

необходима метеорологическая радиолокационная станция (МРЛ). С помощью МРЛ обнаруживаются градовые облака, определяются их местоположение и траектории перемещения, а также оценивается характер изменений процессов, протекающих в облаках, как при естественном развитии, так и в результате воздействия. В противоградовой службе широко используются радиолокационные станции МРЛ, работающие в диапазоне длин волн 3,2 и 10 см. Выполненные к настоящему времени радиолокационные исследования градовых облаков позволили создать методику обнаружения градовых облаков, выделения в них градовых очагов (областей зарождения града) и определения скорости их смещения.

Градоопасность облаков можно оценить по совокупности таких радиолокационных параметров, как максимальная радиолокационная отражаемость Z (или $\lg Z$), максимальная высота радиоэха $H_{\text{ра}}$, его мощность ΔH , уровень максимальной радиолокационной отражаемости $H_{Z_{\text{max}}}$, отношение вертикальных мощностей радиоэха при отрицательных и положительных температурах H_-/H_+ , мощность (или высота) зоны повышенной отражаемости ΔH_z , которую получают путем введения затухания сигнала. Высота ΔH_z занимает промежуточное положение между $H_{\text{ра}}$ и H_{max} . Кроме того, необходимо знать значения температур на характерных уровнях. Распределение температуры в атмосфере строится по данным радиозондирования, выполненного на ближайшей аэрологической станции за ближайший срок. В среднем градовые облака имеют следующие параметры: мощность облака не менее 6 км, максимальная радиолокационная отражаемость более $10^3 \text{ мм}^6/\text{м}^3$, мощность зоны повышенной отражаемости не менее 3—3,5 км, при этом она располагается в средней или верхней части радиоэха.

Предложено несколько критериев распознавания градовых облаков. Один из них, так называемый комплексный (K_k), имеет следующий вид:

$$K_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{n_{ri}}{n_{ri} + n_{li}} \cdot 100\%, \quad (11.5)$$

где N — общее число параметров, n_{ri} и n_{li} — число градовых и ливневых зон соответственно при заданном значении параметра. С помощью критерия K_k вероятность распознавания градовых облаков в Молдавии составила 70—80%.

В последнее время развиваются методы распознавания градовых облаков, основанные на радиолокационном способе определения размеров градин в облаках. Размеры градин определяются с помощью двухволновой радиолокационной станции типа МРЛ, работающей в диапазоне длин волн $\lambda_1 = 3,2 \text{ см}$ и $\lambda_2 = 10 \text{ см}$, при одновременном измерении эффективных площадей рассеяния η_{λ_1} и η_{λ_2} в одних и тех же объемах облака. Зна-

ние размеров градин и высоты нулевой изотермы позволяет судить о том, достигнет град поверхности земли или растает в теплом (облачном и подоблачном) слое.

Метеорологическая радиолокационная станция устанавливается в центре ЗТ и, как правило, совмещена с КП. В дни, когда ожидаются грозы и град, на МРЛ ведутся регулярные наблюдения за развитием облачности. Все стрелковые пункты предупреждаются о возможности стрельбы, с ними проводятся учащенные сеансы связи. При обнаружении радиоэха облаков на ЗТ или его окружении на МРЛ ведутся наблюдения за ними с целью определения степени градоопасности облаков, направления и скорости их смещения. Зоны отражения (радиоэхо облаков) наносятся на крупномасштабный планшет (обычно М 1 : 100 000), где обозначены стрелковые пункты с азимутальными кругами. При развитии над ЗТ или приближающегося к ЗТ градоопасного облака руководитель воздействия, исходя из степени градоопасности облака и объема градового очага, определяет режим воздействия. При этом оперативность засева играет решающую роль в эффективности защиты. По графику траекторий полета ракет (снарядов) с учетом температурной стратификации устанавливаются параметры стрельбы и передаются команды на те пункты, с которых в данный момент необходимо произвести засев облака. Нормирование реагента осуществляется из расчета обеспечения концентрации 10^3 — 10^4 льдообразующих ядер на 1 м^3 градоопасного объема в облаке. Продолжительность воздействия и его интенсивность определяются радиолокационными данными о состоянии облака и изменением степени его градоопасности.

11.2.3. Контроль результатов воздействия на градовые процессы и оценка эффективности противоградовой защиты

Различают физический и статистический методы контроля воздействия на градовые процессы. Применение первого метода требует детального анализа условий проведения опытов воздействия: состояния облаков, характера и границ выпадающих на землю осадков, высот верхней границы радиоэха, температуры на этом уровне, величины максимальной радиолокационной отражаемости и т. д. При этом необходимо непрерывно следить за изменениями этих параметров как в процессе воздействия, так и без проведения воздействия. Анализ совокупности полученных параметров и оценка их изменения во времени дают возможность определить степень и результаты искусственного вмешательства в развитие градового процесса. Как правило, после воздействия наблюдается уменьшение радиолокационных параметров, характеризующих градоопасность облака (рис. 11.5).

При использовании статистического метода получают суммарную оценку результатов воздействия за продолжительный период времени, обычно за градовый сезон. В разных географических районах нашей страны градовые сезоны наступают в различное время и имеют различную продолжительность, хотя все они отмечаются в теплый период года (апрель—сентябрь). При статистическом методе результаты сравниваются

с данными о градобитиях на ЗТ за прошлые годы до начала проведения градозащиты в этом районе и с данными о градобитиях на контрольной территории (КТ) за этот же сезон.

Сравнение площадей градобитий на ЗТ и КТ производится при условии их одинаковых размеров и идентичности градовых процессов на обеих территориях. За пять сезонов (1971—1975 гг.) противоградовой защиты в СССР площади градобитий на ЗТ оказались в среднем в 4 раза меньше, чем на КТ.

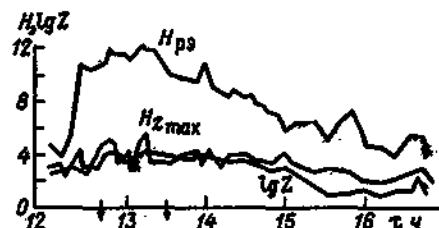


Рис. 11.5. Изменение высоты радиозона H_{pz} , уровня максимальной отражаемости $H_{z_{max}}$ и максимальной радиолокационной отражаемости ($lg Z$) при воздействии на градовое облако.

Стрелками показано начало и конец воздействия.

Анализ многолетних данных показал, что площади градобитий на ЗТ сократились в 3—4 раза по сравнению с площадями градобитий в границах современных ЗТ до начала проведения там градозащиты.

Для оценки экономической эффективности противоградовой защиты существует три вида критериев. Первый строится на соотношении средних многолетних данных о площадях градобитий на ЗТ и КТ и данных о площадях градобитий на этих территориях в год защиты. Второй критерий основан на соотношении средних многолетних сумм выплат (в рублях) органами Госстраха колхозам для возмещения убытков от градобитий на ЗТ и КТ и сумм этих выплат в год защиты на ЗТ и КТ. Третий критерий использует соотношения средних многолетних стоимостей (в рублях) валового сбора урожая на ЗТ и КТ и стоимости собранного урожая в год защиты на обеих территориях.

Чистый доход, или прибыль (Π), от проведения противоградовой защиты можно определить из соотношения

$$\Pi = \Delta D_0 - P,$$

где P — полная сумма расходов на содержание противоградовой защиты; ΔD_0 — стоимость сохраненного от градобитий урожая сельскохозяйственных культур. Экономическая эффективность современных методов борьбы с градом оценивается десятками миллионов рублей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баттан Л. Дж. Радиолокатор наблюдает за погодой. Л., Гидрометеониздат, 1964.
- Белинский В. А., Побняхо В. А. Аэрология. Л., Гидрометеониздат, 1962, 464 с.
- Гайворонский И. И. Двадцать пять лет исследований в ЦАО в области искусственных воздействий на облака и туманы. — «Труды ЦАО», 1975, вып. 104, с. 3—23.
- Гайгеров С. С. Исследование синоптических процессов в высоких слоях атмосферы. Л., Гидрометеониздат, 1973, 250 с.
- Захаров В. М., Костко О. К. Лазеры и метеорология. Л., Гидрометеониздат, 1972, 62 с.
- Калиновский А. Б., Пинус Н. З. Аэрология. Л., Гидрометеониздат, 1961, 518 с.
- Качурин Л. Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Л., Гидрометеониздат, 1973, 366 с.
- Код для передачи данных вертикального зондирования атмосферы КН-04 (FM.35.E TEMP, FM.36.E TEMP SHIP). Л., Гидрометеониздат, 1971, 31 с.
- Код для передачи данных ветрового зондирования атмосферы КН-03 (FM.32.E PILOT, FM.33.E PILOT SHIP). Л., Гидрометеониздат, 1971, 31 с.
- Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л., Гидрометеониздат, 1976, 639 с.
- Методические указания ЦАО. Методика эксплуатации актинометрического радиозонда. Вып. 42, 1971, 55 с.
- Наставления гидрометеорологическим станциям и постам, вып. 4. Аэрологические наблюдения на станциях. Ч. 1 — Шаропилотные наблюдения с одного пункта. М., Гидрометеониздат, 1963; ч. 2 — Шаропилотные наблюдения (базисные). Л., Гидрометеониздат, 1945; ч. 3 — Температурно-ветровое зондирование атмосферы системой «Радиозонд А-22» — радиотеодолит «Малахит» с дальномерной приставкой. Л., Гидрометеониздат, 1966, 450 с.; ч. 3а — Температурно-ветровое зондирование атмосферы системой «Метеорит» — РКЗ. Л., Гидрометеониздат, 1973, 256 с.; ч. 3б — Температурно-ветровое зондирование атмосферы системой «Метеорит» — РКЗ на судовых станциях. Л., Гидрометеониздат, 1974, 130 с.
- Пинус Н. З., Шмидт С. М. Аэрология. Л., Гидрометеониздат, 1965, 351 с.
- Радиолокационные измерения осадков. Л., Гидрометеониздат, 1967, 140 с. Авт.: А. М. Боровиков, В. В. Костарев, И. П. Мазин, В. И. Смирнов, А. А. Черников.
- Седунов Ю. С. Первые успехи в управлении погодой. — «Химия и жизнь», 1976, № 11, с. 25—30.
- Федоров Е. К. Часовые погоды. Л., Гидрометеониздат, 1970, 157 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие (3).

1. Введение (4).

- 1.1. Предмет и задачи аэрологии (5). 1.2. Краткая история аэрологических исследований (6). 1.3. Развитие аэрологических исследований в Советском Союзе (19). 1.4. Прямые и косвенные методы исследований свободной атмосферы (21). 1.5. Строение атмосферы (23). 1.6. Мировая аэрологическая сеть. Глобальное изучение атмосферы (27).
2. Измерение скорости и направления ветра в атмосфере при зондировании на аэрологической сети (30).
 - 2.1. Оболочки для шаров-пилотов и радиозондов (31). 2.2. Газы, применяемые для наполнения оболочек (35). 2.3. Основные правила техники безопасности при работе с гелием и водородом (44). 2.4. Условия движения шара в атмосфере (46). 2.5. Основные положения оптических и радиолокационных методов измерения ветра (52). 2.6. Метод шаров-пилотов (56). 2.7. Радиоветровые наблюдения (73). 2.8. Измерение ветра с помощью сигналов навигационных станций (80).
3. Методы измерения давления, температуры и влажности воздуха (84).
 - 3.1. Особенности аэрологических измерений (84). 3.2. Некоторые понятия измерительной техники (86). 3.3. Измерение давления (89). 3.4. Измерение температуры (98). 3.5. Измерение влажности (112).
4. Радиозондирование атмосферы (123).
 - 4.1. Основы метода (124). 4.2. Система радиозондирования «Малахит» — А-22 (128). 4.3. Система радиозондирования «Метеорит» — РКЗ (140). 4.4. Обзор некоторых зарубежных систем радиозондирования (179).
5. Специальное радиозондирование атмосферы (187).
 - 5.1. Актинометрическое радиозондирование атмосферы (187). 5.2. Озонометрическое радиозондирование атмосферы (209). 5.3. Перспективы развития специальных видов радиозондирования (216).
6. Аэрологическая сеть СССР (218).
 - 6.1. Организация сети аэрологических станций (218). 6.2. Современное состояние аэрологической сети СССР (221). 6.3. Система сбора и хранения аэрологических данных (224). 6.4. Методическое руководство и инспекция аэрологических станций (225). 6.5. Перспективы развития аэрологической сети СССР (227).
7. Исследование атмосферы с помощью аэростатов (229).
 - 7.1. Основные сведения о аэростатах (229). 7.2. Автоматические стратостаты (232). 7.3. Привязные аэростаты (235).
8. Самолетное зондирование атмосферы (237).
 - 8.1. Применение самолетов для зондирования атмосферы (237). 8.2. Оборудование современных самолетов — летающих лабораторий (239).
9. Метеорологическое ракетное зондирование (247).
 - 9.1. Научно-исследовательская метеорологическая ракета М-100 (250). 9.2. Метеорологическая ракета ММР-06 (253). 9.3. Метеорологическая ракета МР-12 (254).
10. Дистанционное зондирование атмосферы (255).
 - 10.1. Метеорологическая радиолокация (255). 10.2. Метеорологическая лазерная локация (262). 10.3. Метеорологические спутники (268).
11. Методы воздействия на облака и туманы (271).
 - 11.1. Физические основы активного воздействия на облака и туманы (272). 11.2. Организация противогорадовой защиты (280).

Список литературы (287).