

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГЛАВНАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ им. А. И. ВОЕЙКОВА

06
778

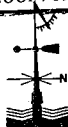
Т Р У Д Ы

ВЫПУСК 300

МЕТОДИКА
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ
НАБЛЮДЕНИЙ

Под редакцией
канд. физ.-мат. наук
Д. П. БЕСПАЛОВА

Ленинградский
Гидрометеорологический ин-т
БИБЛИОТЕКА
Л-д 193196, Малоохтенский пр., 98



ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ
ЛЕНИНГРАД • 1973

В сборнике представлены статьи, посвященные актуальным вопросам увеличения репрезентативности и точности метеорологических измерений.

Обсуждаются задачи автоматизации геофизических измерений и усовершенствования методики измерений и алгоритмов обработки результатов измерения влажности воздуха, составляющих теплового баланса и высоты нижней границы облаков.

Приводится анализ физических процессов и погрешностей гигрометрического комплекса, рекомендуемого как исходное образцовое средство измерения влажности в Гидрометслужбе.

Описывается новый метод измерения скорости ветра и температуры воздуха, основанный на акустическом принципе.

Рассматриваются вопросы повышения точности измерений за счет оптимального комплексирования, применения аналого-дискретных систем с параллельными каналами, выбора параметров прибора при дискретном интегрировании.

Сборник рассчитан на специалистов-метеорологов — работников сети станций ГМО и УГМС, специалистов Региональных гидрометцентров и НИГМИ, а также может быть использован в качестве методического пособия студентами гидрометеорологических специальностей вузов и техникумов.

ЗАДАЧИ АВТОМАТИЗАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Состав и назначение геофизической информации

В международной системе метеорологических наблюдений, созданной около 100 лет назад, наблюдения за солнечной радиацией, атмосферным электричеством, озоном и рядом других геофизических характеристик занимают особое место. Несмотря на то, что некоторые из них, как и основные метеорологические наблюдения, имеют почти вековую историю (первый актинометр, например, был создан Пулье в 1838 г., а первые наблюдения за солнечной радиацией с помощью актинометра Хвольсона начаты в Павловске в 1890 г.), формирование единой системы этих наблюдений даже в нашей стране произошло сравнительно недавно. Актинометрические наблюдения начали складываться в единую систему в начале 30-х годов. Массовые актинометрические и теплобалансовые наблюдения на сети метеостанций были начаты в 1953—1955 гг., а наблюдения за озоном — в 1956—1957 гг. До этого времени во всем мире существовало несколько обсерваторий, которые вели такие наблюдения своими приборами и методами без какой-либо единой программы.

Несколько лет назад Всемирная метеорологическая организация (ВМО) приступила к организованному сбору, обработке и изданию некоторой части геофизической информации в масштабе всего мира. В настоящее время международным центром сбора, обработки и издания информации по актинометрии и атмосферному электричеству является Главная геофизическая обсерватория (Ленинград), а по озону — обсерватория в Торонто (Канада). В настоящее время ВМО рассматривает вопрос о центре сбора и обработки глобальной информации о состоянии загрязнения атмосферы. Данные остальных геофизических наблюдений (за составляющими теплового баланса, оптическими характеристиками атмосферы и др.) собираются и обобщаются в национальных метеорологических службах.

Одной из особенностей геофизической информации является ее комплексность. Несмотря на то, что некоторые геофизические

характеристики часто имеют самостоятельное значение в различных практических приложениях (например, суммарная радиация), все же для геофизических измерений характерно комплексное получение, обработка и использование данных. Можно отметить три четко сложившихся вида геофизической информации: актинометрическая, теплобалансовая, атмосферное электричество. В каждом комплексе часть элементов измеряется непосредственно, а часть получается путем обработки результатов измерений.

В табл. 1 для каждого вида наблюдений приведены данные о параметрах, которые измеряются в настоящее время, а также вычисляются при обработке сразу после измерений (оперативно) или впоследствии, при обобщении результатов. В последней графе таблицы перечислены характеристики, сведения о которых имеют важное практическое значение. Однако наблюдения за ними ведутся только в опытным порядке, так как для этих измерений еще нет аттестованных датчиков и приборов.

В табл. 2 приведены данные о периоде осреднения, точности и периодичности измерений разных видов геофизической информации. Эти данные отражают состояние, сложившееся на сети метеорологических станций СССР в настоящее время.

Геофизическая информация позволяет получить данные о преобразовании энергии в приземном слое атмосферы. Этот фактор оказывает определяющее влияние на условия формирования климата, почв, растительности, оледенения и других физико-географических условий, а также имеет существенное значение для жизнедеятельности растительного и животного мира.

Актинометрические данные используются для оценки тепловых ресурсов земной поверхности и атмосферы. По этим данным рассчитывается испарение с различных подстилающих поверхностей, строительные, гелиотехнические, светотехнические нормативы и т. д. Вычисленные нормы для прямой, суммарной, рассеянной радиации и радиационного баланса по территории СССР обобщены в первом томе «Справочника по климату СССР». Они используются при разработке государственных стандартов, нормалей, строительных норм и правил, при проектировании и планировании строительных объектов, городов, курортов и т. д. Обобщены в виде атласа и ряда монографий оптические характеристики атмосферы (прозрачность, освещенность и т. д.). Эти данные широко используются при обслуживании авиации, в строительстве, сельскохозяйственном производстве.

В последнее время особое значение приобретают данные об электрических характеристиках атмосферы — интенсивности и числе грозных разрядов, электризации облаков, градиенте электрического поля и проводимости воздуха. Эти данные входят в нормативы по строительству линий связи и электропередач, определяют условия взлета и посадки самолетов и безопасность полетов.

Не менее важны и другие геофизические элементы, которые наблюдаются и обобщаются гидрометеорологическими обсерваториями и институтами Гидрометслужбы.

Таблица I

Содержание геофизической информации

Измеряются	Вычисляются		Могут измеряться или вычисляться в будущем
	оперативно	при обработке режимных данных	
АКТИНОМЕТРИЯ			
Прямая солнечная радиация на перпендикулярную поверхность	Прямая радиация на горизонтальную поверхность	Коэффициент прозрачности. Фактор мутности. Прямая радиация на различно ориентированные поверхности	Общее содержание в атмосфере аэрозоля и водяного пара. Ультрафиолетовая радиация. Радиация в узких участках спектра. Содержание озона в атмосфере
Рассеянная коротковолновая радиация	—	Освещенность	Проникающая радиация (в снег, лед или воду). Фотохимически активная радиация (ФАР)
Суммарная радиация	—	То же	Альbedo в отдельных участках спектра
Отраженная радиация	Альbedo поверхности	Поглощенная радиация	Радиационная температура поверхности
Радиационный баланс (остаточная радиация)	Эффективное излучение земли (баланс длинноволновой радиации)	Излучение атмосферы. Эффективное излучение земли (если нет прямых измерений)	
Наличие и продолжительность солнечного сияния	—	—	Наличие облачности. Ярус и вид облаков

Измеряются	Вычисляются		Могут измеряться или вычисляться в будущем
	оперативно	при обработке режимных данных	

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС

Градиентные наблюдения за: температурой воздуха влажностью воздуха ветром	Турбулентный поток тепла. Турбулентный поток влаги. Коэффициент турбулентности. Перенос количества движения. Шероховатость подстилающей поверхности. Скорость трения	Параметр шероховатости. Параметры турбулентности	Измерения пульсаций, турбулентного потока тепла и влаги, коэффициента турбулентности, переноса примесей в атмосфере
Измерение температуры и влажности почвы	Объемная теплоемкость почвы. Коэффициент температуропроводности. Теплообмен в почве	Теплофизические характеристики почвы. Тепловой режим почвы	

АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Градиент потенциала электрического поля атмосферы	Среднечасовые значения градиента потенциала электрического поля.	Среднесуточные и среднесычные значения градиента потенциала и проводимости	Число грозных разрядов на землю. Число всех грозных разрядов. Наличие и вид метеорологических явлений. Наличие и интенсивность твердых осадков
Удельная электропроводность	Среднечасовые значения электропроводности	—	
Число грозных разрядов	—	—	
Концентрация атмосферных ионов	—	—	

**Основные характеристики геофизической информации,
получаемой на существующей сети станций**

Элемент	Размерность	Период осреднения, мин	Среднеквадратическая погрешность (в % от диапазона)	Густота сети (расстояние между станциями)
---------	-------------	------------------------	---	---

АКТИНОМЕТРИЯ¹

Прямая радиация	кал/(мин·см ²)	2—3	3	Для ЕТС 200—300 км, для АТС до 600—1000 км
Рассеянная радиация	То же	3—5	5	
Суммарная радиация	"	3—5	5	
Отраженная радиация	"	3—5	5	
Радиационный баланс	"	2	15	
Продолжительность солнечного сияния	ч/сут	—	10	

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС¹

Вертикальный поток тепла в атмосфере	кал/(мин·см ²)	10	10—15	Для ЕТС 500—600 км, для АТС до 1000 км
Вертикальный поток влаги в атмосфере (в тепловых единицах)	То же	10	10—15	
Поток тепла в почве	"	10	15—20	

АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО²

Градиент потенциала электрического поля атмосферы	В/м	3—5	± (10 + 0,05E) ± (100 + 0,05E) в зависимости от диапазона	9 пунктов на территории СССР
Удельная электропроводность воздуха	1/Ом·м	3—5	± (1,5·10 ⁻¹⁵ + 0,05γ)	
Число грозových разрядов	Количество разрядов	30	± 25%	Примерно 50 пунктов на территории СССР

¹ Измерения производятся в 0 ч. 30 мин., 6 ч. 30 мин., 9 ч. 30 мин., 12 ч. 30 мин., 15 ч. 30 мин., 18 ч. 30 мин. истинного солнечного времени. Измеряются и вычисляются часовые суммы. На выборочной сети станций ведется непрерывная регистрация всех составляющих баланса.

² Выдаются данные за каждый час. Указывается предельная погрешность.

Перечнем, приведенным в табл. 1 и 2, не ограничивается возможный объем геофизической информации. В этих таблицах не приведены данные о характеристиках загрязнения атмосферы промышленными выбросами, приобретающие с каждым годом все большее значение, данные атмосферно-оптических наблюдений, а также целый ряд специализированных геофизических наблюдений, выполняемых на исследовательских судах, специальных полигонах, в разного рода экспедициях и т. д.

Требования к объему и точности геофизической информации со стороны различных отраслей народного хозяйства и научных организаций пока еще окончательно не сформулированы и находятся в стадии разработки. Однако уже имеющиеся данные свидетельствуют о том, что существующая точность измерений не может быть уменьшена, а объем информации должен расшириться в 1,5—2 раза. Исходя из этого можно сделать вывод, что сбор, обработка, хранение, распространение и использование геофизической информации должны быть объединены в общую рациональную систему, основанную на использовании современных технических средств и, в частности, автоматических устройств.

Автоматизация системы геофизических наблюдений является составной частью комплексной автоматизации Гидрометслужбы. Внедрение автоматизации связано с существенной технической и организационной перестройкой геофизических наблюдений и предполагает одновременное решение трех основных задач:

1. Снижение затрат на получение и обработку геофизической информации.
2. Улучшение качества (точности, объективности и других показателей) геофизических данных.
3. Увеличение количества получаемых характеристик за счет более подробного представления данных во времени и увеличения числа измеряемых параметров.

2. Специализированные установки для получения и регистрации геофизической информации

В настоящее время геофизическая информация используется в основном в режимных обобщениях. Это позволяет разделить во времени получение и использование данных и сосредоточить их обработку в одном месте. Данные за декаду или месяц, полученные на местах с помощью сравнительно простых устройств, не выполняющих никакой обработки, могут накапливаться на техническом носителе (например, на перфоленте) и пересылаться в центральные органы для обработки на ЦВМ, архивации и использования.

Устройства для получения первичной геофизической информации должны с заданной периодичностью осуществлять измерение, кодирование и занесение информации на технический носитель. Наиболее подходящим носителем в настоящее время является перфолента, хотя и не исключено, что при разработке простых уст-

ройств для записи на магнитную ленту последняя окажется предпочтительнее. Каждый из параметров, измеряемых установкой, — будь то актинометрическая или электрическая характеристика, или градиент температуры — можно рассматривать как сумму двух функций времени: детерминированной (периодической) и случайной, причем случайная составляющая значительна. В связи с этим, а также учитывая характер задач, при решении которых используется геофизическая информация, основной интерес представляют не отдельные измерения, а средние значения (суммы) за 0,5, 1, 3 часа и более длительные промежутки времени.

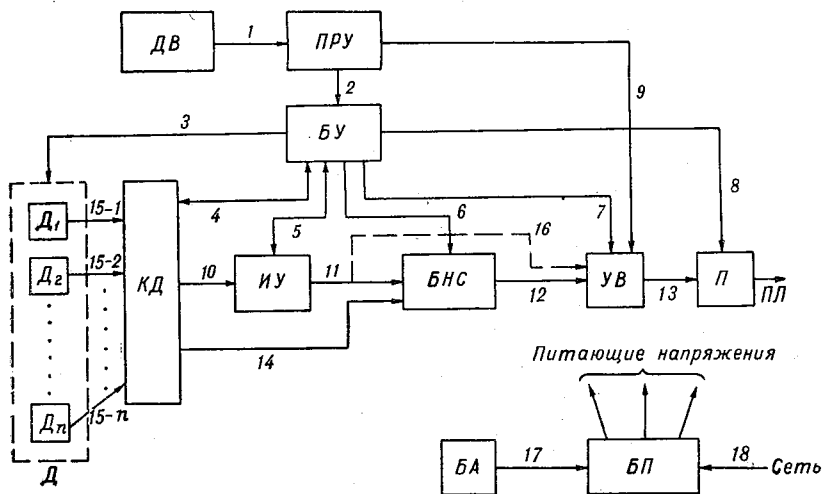


Рис. 1. Блок-схема установки для геофизических измерений.

Задачу получения средних можно решить двумя путями: либо перфорировать результаты всех измерений, выполняемых с достаточной частотой, вычисляя суммы при вторичной обработке перфоленты, либо образовывать суммы непосредственно в установке в ходе измерений, перфорируя уже накопленные значения.

Недостатком первого способа является большой расход перфоленты. Так, при 20 параметрах и пятиминутной периодичности измерений для одного пункта потребуется около 1,8 км перфоленты в месяц. Поэтому целесообразно включить в состав установки узел, позволяющий накапливать суммы по каждому параметру.

На рис. 1 представлена возможная блок-схема установки для получения и регистрации геофизической информации. Она содержит датчики $D_1, D_2, \dots, D_n$; датчик времени $ДВ$; пульт ручного управления $ПРУ$; блок управления $БУ$; коммутатор датчиков $КД$; измерительное устройство $ИУ$; блок накопления сумм $БНС$, блок питания $БП$ с буферными аккумуляторами $БА$. Связи, по которым обеспечивается взаимодействие между отдельными блоками, показаны в виде нумерованных линий.

ДВ по связи 1 выдает в *ПРУ* один импульс каждую минуту. Эти импульсы считаются пересчетной схемой, входящей в состав *ПРУ*. Таким образом, формируется значение текущего времени (минуты, часы). Эта информация используется, во-первых, при перфорации (каждая выдача на перфоленту сопровождается указанием времени) и, во-вторых, для управления работой установки в соответствии с режимом, который задается с помощью переключателей *ПРУ*. *БУ* обеспечивает необходимое взаимодействие узлов установки в процессе подготовки и выполнения измерений, а также при перфорации результатов. Он получает по связи 2 команды о необходимости выполнения той или иной операции, которые формируются в *ПРУ* на основе сигналов, поступающих от *ДВ*. Периодичность выдачи этих сигналов задается органами управления *ПРУ*. Управление отдельными блоками установки *БУ* осуществляется по связям: 3 — подготовка датчиков к измерениям; 4 — сигнал переключения *КД* на измерение следующего параметра (по этой же связи из *КД* в *БУ* подается сигнал после окончания всего цикла измерений); 5 — сигнал начала работы *ИУ*; 6, 7, 8 — сигналы управления, поступающие в *БНС*, устройство вывода *УВ* и перфоратор *П*. Связь 9 из *ПРУ* в *УВ* обеспечивает перфорацию данных ручного ввода. Связи 15-1, 15-2, ..., 15-*n* обеспечивают передачу сигнала с выхода датчиков на соответствующий вход *КД*, который поочередно подключает эти сигналы к измерительному устройству *ИУ* (связь 10). С выхода *ИУ* по связи 11 результаты измерений передаются в блок накопления сумм *БНС*. В том случае, когда производится операция выдачи данных, значения сумм из *БНС* передаются в устройство вывода *УВ* по связи 12 и далее на перфоратор *П* по связи 13. На выходе перфоратора выдается готовая перфолента *ПЛ* с результатами работы установки.

Связь 14 из *КД* в *БНС* обеспечивает передачу результата очередного измерения в тот из накопителей *БНС*, который соответствует измеряемому параметру. Отмеченная пунктиром связь 16 из *ИУ* в *УВ* используется в том случае, когда установка работает без *БНС* и все результаты измерений перфорируются.

Питание всех узлов установки обеспечивается блоком питания *БП*, получающим энергию от сети (связь 18) либо от аккумуляторов *БА* по связи 17 при временном отклонении сетевого питания.

Установка, блок-схема которой изображена на рис. 1, может быть использована для любого из трех видов геофизической информации: актинометрической, атмосферного электричества, теплобалансовой. Различаются они между собой прежде всего набором датчиков, а также некоторыми особенностями режима работы. Отметим состав датчиков, который должна иметь каждая из трех модификаций установки.

1. Установка для актинометрических измерений должна содержать датчики суммарной, прямой, отраженной, рассеянной радиации и радиационного баланса. В дальнейшем может возникнуть потребность в измерении дополнительных характеристик (*ФАР*, интенсивности радиации в отдельных участках спектра, освещенности,

содержания озона и др.). Поэтому актинометрическая установка должна быть рассчитана на 10—12 измерительных каналов.

2. В комплект установки для измерения характеристик атмосферного электричества должны входить датчики напряженности электрического поля, электропроводности воздуха (отдельно положительной и отрицательной), блок для счета числа грозových разрядов (в эффективном радиусе 15 и 200 км и для каждого радиуса отдельно всех разрядов и разрядов на землю) — всего 8—10 измерительных каналов.

3. Установка для теплобалансовых измерений требует наибольшего количества датчиков. В ее состав должны входить:

а) группа из 5 датчиков для измерения градиентов температуры воздуха;

б) группа из 5 датчиков для измерения градиентов влажности воздуха;

в) группа из 5 датчиков для измерения градиентов скорости ветра;

г) группа из 3 датчиков для измерения абсолютного значения температуры, влажности и скорости ветра на опорном уровне;

д) группа из 8—10 датчиков для измерения температуры почвы на различных глубинах;

е) датчик радиационной температуры подстилающей поверхности.

Таким образом, теплобалансовая установка должна содержать 30—40 измерительных каналов.

3. Автоматическая установка для научных исследований

Потребность в проведении экспериментальных метеорологических исследований по специальным программам возникает при решении многих научно-исследовательских задач. К таким задачам относятся: подробное изучение гидрометеорологического режима пунктов, намеченных для строительства различных народнохозяйственных объектов, обеспечение исследовательских программ в экспедициях, на экспериментальных полигонах НИИ, в районах горных ледников, питающих оросительные системы, и многие другие. Хотя все перечисленные случаи требуют исследований по различным программам, определяемым спецификой конкретных задач, все же можно отметить ряд общих моментов, позволяющих создать единую аппаратуру для задач такого типа.

Прежде всего, информация, получаемая при научных исследованиях, не носит оперативного характера. Это означает, что моменты получения и использования такой информации могут быть разделены во времени. Таким образом, оказывается возможным в месте расположения измерительной аппаратуры производить только самую необходимую первичную обработку, «сжатие» информации и выдачу ее на технический носитель, а основную обработку выполнять на универсальных ЭВМ. Вместе с тем, задачи по первичной

обработке, возникающие в такой системе, оказываются все же достаточно сложными. К ним относятся управление различными датчиками в процессе подготовки и выполнения измерений, получение средних, экстремальных и других характеристик, а также выполнение различной обработки, которую целесообразно выполнять сразу же в момент измерений для «сжатия» информации или по другим соображениям.

В связи с большим объемом задач вычислительного характера, которые должны выполняться блоком автоматики, целесообразно этот блок выполнить в виде управляющей системы, имеющей в своем составе вычислительное устройство, работающее совместно с датчиками в реальном масштабе времени и обеспечивающее необходимое совместное функционирование всех узлов.

В зависимости от конкретных задач того или иного исследования должны меняться набор датчиков и программа работы вычислительно-управляющего устройства, что даст возможность решать с помощью единой аппаратуры достаточно широкий круг различных научно-исследовательских задач.

В ряде исследований возникает необходимость получать данные не только в одной точке, но и в нескольких пунктах, удаленных от центра сбора на 10—15 км и более. Для обеспечения этого необходимо, чтобы в состав аппаратуры входили дистанционные блоки, объединяющие группу из 8—10 датчиков и связанные с центральным устройством (ЦУ) проводной линией или радиолинией связи.

На рис. 2 представлена схема, поясняющая состав такого комплекса аппаратуры для научных исследований. В основном помещении находится центральное устройство автоматики ЦУ, перфоратор ПФ и печатающее устройство ПУ, а также аппаратура связи АС с дистанционными блоками (ДБ). На метеоплощадке (МП) вблизи помещения находится основной комплект датчиков, удаленный от измерительной аппаратуры на расстояние до 100—150 м. От каждого датчика (или блока датчиков), расположенных на метеоплощадке, идет индивидуальный кабель для подключения датчика непосредственно к ЦУ или, когда это необходимо, к блоку вторичного преобразования, входящего в комплект датчика, но располагаемого в помещении. (Для упрощения на рисунке блоки вторичных преобразователей не показаны.) Дистанционные блоки (ДБ₁, ДБ₂, ..., ДБ_n), расположенные на значительном удалении, соединены с ЦУ линиями связи (ЛС₁, ЛС₂, ..., ЛС_n) и подключаются через аппаратуру связи АС, которая обеспечивает передачу управляющих сигналов с ЦУ на ДБ и прием измерительной информации, поступающей от группы датчиков, подключаемых к ДБ. Для упрощения аппаратуры ДБ и одновременного обеспечения помехоустойчивости целесообразно измерительную информацию от ДБ передавать в виде частоты, что хорошо сочетается как с проводным каналом, так и радиоканалом. Хотя такой способ не обеспечивает максимального быстродействия, при решении метеорологических задач это не имеет существенного значения.

Вся накопленная информация, прошедшая первичную обработку, выдается на перфоленту *ПЛ*, которая по окончании исследования (если оно носит разовый характер) или периодически (если исследование ведется длительно) используется для вторичной обработки на универсальной ЭВМ и получения уже окончательных результатов в форме таблиц, графиков и т. п.

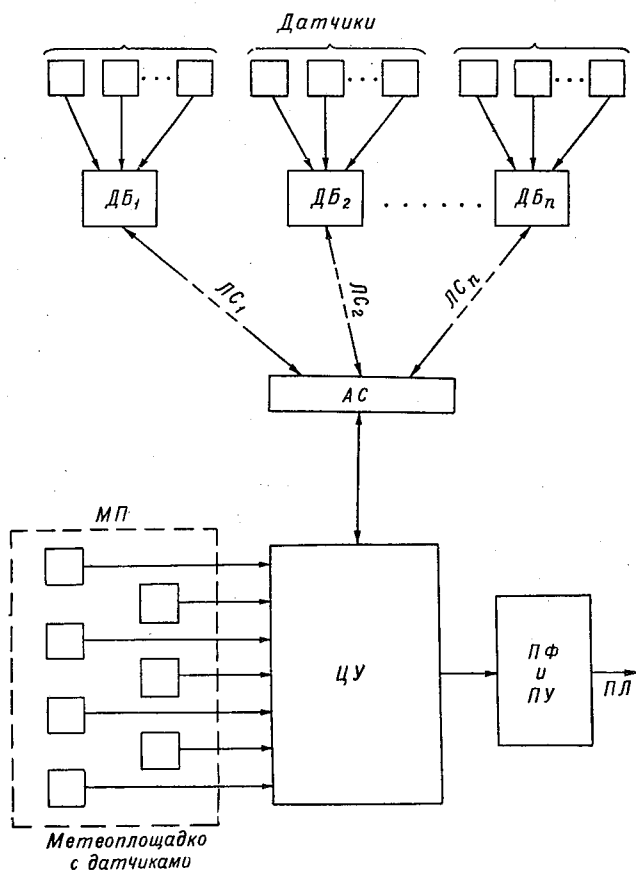


Рис. 2. Состав автоматической станции для научных исследований.

Специфика метеорологических задач, заключающаяся прежде всего в том, что изучаемые параметры меняются медленно, а также возможность разделить предварительную и окончательную обработку результатов могут быть использованы для упрощения автоматической аппаратуры. Примерные характеристики вычислительно-управляющей системы, достаточной для решения большинства задач, сводятся к следующему:

Число датчиков, располагаемых на *МП* вблизи *ЦУ*, до 100.

Точность измерения 0,1 %.

Время измерения 1-го параметра 1—2 с.

Число дистанционных блоков до 5.

Число датчиков, подключаемых к одному ДБ, до 16.

Объем оперативного ЗУ вычислительного блока 100—200 чисел.

Объем постоянного ЗУ для хранения программы 4000—5000 команд.

Средняя скорость выполнения арифметических операций 200—300 операций в секунду.

Необходимо отметить, что указанная выше точность — 0,1% определяется только двумя типами датчиков — температуры (воздуха, почвы и смоченного термометра при измерении влажности) и давления. По другим параметрам вполне достаточной можно считать точность 0,5% или даже 1%. Питание ЦУ, а также датчиков, расположенных на основной метеоплощадке, должно осуществляться от сети переменного тока 50 Гц, причем желательно, чтобы было обеспечено буферное питание от аккумуляторов во время кратковременных отключений сети. Питание ДБ с датчиками должно осуществляться как от сети, так и от аккумуляторов (последнее необходимо в труднодоступных пунктах, например в горах, где нет сетевого питания).

Потребление энергии для ЦУ с близкими датчиками не имеет существенного значения и может достигать 300—400 Вт и более. Потребление же энергии ДБ с подключенными к нему датчиками должно быть минимальным, с тем чтобы обеспечить возможность работы в пунктах, где отсутствует сеть.

Оснащение научных метеорологических организаций такими установками позволит существенно расширить экспериментальную научно-исследовательскую работу и поднять ее на новую ступень, соответствующую современным задачам и уровню технического развития.

АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПОГРЕШНОСТЕЙ ГИГРОМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА, ОСНОВАННОГО НА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОМ ПРИНЦИПЕ

Углубленное исследование атмосферных процессов и развитие численных методов их моделирования обосновывают необходимость наиболее точных результатов измерений радиационных элементов и влажности, играющих фундаментальную роль в этих процессах [1, 2].

В зависимости от решаемой задачи допустимая погрешность измерения влажности колеблется от 1 до $0,1^{\circ}\text{C}$ по точке росы [3]. Наряду с разработкой датчиков влажности, способных осуществлять измерения с такой точностью, ведется работа по обеспечению единства измерений влажности. Материальной основой такой работы является наличие аппаратуры, позволяющей воспроизводить и измерять желаемые уровни влажности с точностью, заведомо превосходящей максимальную точность измерений на метеорологической сети. Эта задача относится к области метрологии.

В настоящее время наивысшая точность измерения влажности достигается сорбционно-гравиметрическим гигрометром, принятым за первичный эталонный измеритель влажности [4]. В качестве вторичного эталона влажности применяется установка для задания требуемого уровня влажности, так называемый генератор влажности.

В комплексе эти измерительные средства образуют первичный эталон влажности газа. Относительная погрешность измерения гигрометром составляет $0,13\%$ измеряемого значения отношения смеси в диапазоне $20\text{—}0,19$ г/кг, причем время измерения при значении влажности $0,4$ г/кг составляет $10\text{—}12$ часов.

В дальнейшем при анализе процессов и погрешностей в качестве величин, характеризующих влажность, будут использоваться парциальное давление водяного пара (упругость) и точка росы. Поэтому следует установить, каким погрешностям по упругости и точке росы соответствует указанное значение относительной погрешности.

Процедура измерения гигрометром включает в себя измерение нескольких величин, по которым вычисляется отношение смеси. Пользуясь значениями этих величин, можно определить и упругость.

Из уравнения газового состояния следует

$$e = \frac{m_n}{\mu_n} \frac{1}{V} RT, \quad (1)$$

где e — упругость, m_n — измеренная масса водяного пара, μ_n — молекулярный вес воды, V — измеренный объем, R — универсальная газовая постоянная, T — измеренная температура.

В [4] приводятся средние квадратические отклонения измерения массы (0,022%) и объема (0,0073%). Полагая среднюю квадратическую погрешность измерения температуры равной 0,02°С при 20°С, по известной формуле

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_V^2 + \sigma_T^2},$$

можно определить среднее квадратическое отклонение измерения упругости. Максимальная относительная погрешность определения e получается сложением систематической относительной погрешности (возникающей вследствие неполной адсорбции и утечек), составляющей 0,046%, с утроенным значением среднего квадратического отклонения. Значение этой погрешности оказывается также равным 0,13%.

Для выражения погрешности через погрешность определения точки росы воспользуемся уравнением Клаузиуса—Клапейрона:

$$\frac{dE_p}{dT_p} = \frac{L}{k} \frac{E_p}{T_p^2}, \quad (2)$$

где T_p — точка росы, E_p — упругость насыщения при точке росы, L — скрытая теплота фазового перехода (лед—пар, вода—пар), k — постоянная Больцмана.

Из этой формулы можно получить, заменяя дифференциалы на конечные приращения:

$$\Delta T_p = \frac{k}{L} T_p^2 \frac{\Delta E}{E} \quad (3)$$

и

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{L}{k} \frac{\Delta T_p}{T_p^2}, \quad (4)$$

где $\Delta E/E$ — относительная погрешность измерения парциального давления водяного пара, ΔT_p — погрешность измерения точки росы.

Учитывая, что L зависит от вида непаровой фазы (лед или вода) и температуры, и задавая значение $\Delta E/E = 0,1\%$ и 1% , вычислим соответствующие ΔT_p для разных T_p (табл. 1).

Таблица 1

T_p	$\Delta T_p^{\circ} \text{ C}$	
	$\Delta E/E=10^{-3} (0,1\%)$	$\Delta E/E=10^{-2} (1\%)$
230 K (-43,15° C)	0,009	0,09
250 K (-23,15° C)	0,011	0,11
273 K (0° C)	0,014	0,14
293,15 K (+20° C)	0,017	0,17
303,15 K (+30° C)	0,018	0,18

Для $\Delta E/E=0,13\%$, $T_p=293 \text{ K}$ и $k/L=1,91 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$ $\Delta T_p=0,021^{\circ} \text{ C}$, т. е. первичный эталон позволяет воспроизводить и измерять значение влажности по точке росы с погрешностью, не превышающей для точки росы $+23^{\circ} \text{ C}$ $0,02^{\circ} \text{ C}$.

Таким образом, эталон обеспечивает точность по точке росы, превосходящую в 3 раза точность измерения температуры исследуемого объема. Попутно следует отметить сразу, что при определении влажности непосредственно методом точки росы при существующих реализациях эта погрешность не может быть меньше, поскольку погрешность измерения температуры входит в общую погрешность как составляющая.

Сопоставляя вышеприведенный нижний предел диапазона допускаемых погрешностей ($0,1^{\circ} \text{ C}$) по точке росы с наименьшим достигаемым значением ее ($0,02^{\circ} \text{ C}$), можно отметить огромную сложность, связанную с тем, что наименьшая погрешность, достигаемая в первичном эталоне, отличается всего на один порядок от допускаемых погрешностей рядовых измерений. Следовательно, подчиненное по отношению к эталону образцовое средство измерения может иметь погрешность, заключенную в указанных пределах.

В [5, 6] обоснована возможность передачи размера единицы измерения влажности при использовании абсолютного термодинамического метода измерения. В этом случае используется жесткая термодинамическая зависимость между упругостью насыщения водяным паром и температурой, являющейся в системе физических величин основной. Таким образом, без нарушения существующих поверочных схем оказывается возможным реализовать локальную (по крайней мере, в пределах Гидрометслужбы) поверочную схему, в которой за исходное образцовое средство в гигрометрии принимаются сатуратор в комплексе с гигрометром точки росы, входящие в состав поверочной гигрометрической установки.

Предметом настоящей статьи являются рассмотрение физических процессов и анализ погрешностей в реализованной установке, включающей в себя гигрометр точки росы, т. е. метрологические

свойства комплекса для воспроизведения и измерения параметров влажности. В зависимости от этих свойств комплекс может служить не только поверочной установкой, но и исходным средством измерения влажности в Гидрометслужбе.

В экспериментах использовался гигрометр точки росы, выполненный в виде автономного прибора с полупроводниковым холодильником для охлаждения зеркальца, запитываемым от тиристорного выпрямителя, который управляется наблюдателем. Принципиальное и методическое единство процессов задания и измерения влажности влечет за собой при наиболее рациональной реализации

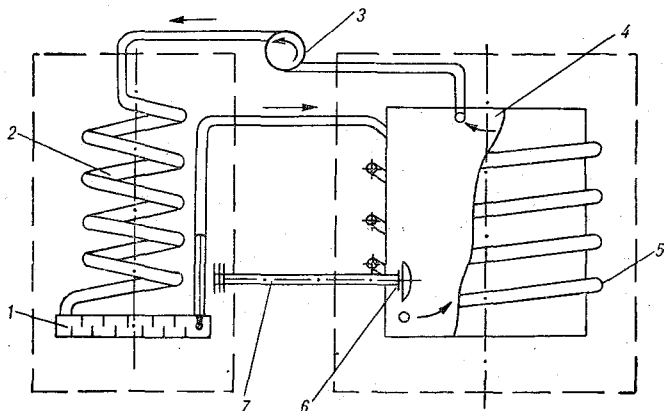


Рис. 1. Схематический разрез гигрометрического комплекса для точного задания и измерения значения параметра влажности воздуха.

тенденцию к неразрывному единству в конструктивном отношении. А именно: поскольку в термогигростате предусмотрено задание и поддержание на требуемом уровне температуры сатуратора, а точка росы в камере проверки не может быть ниже температуры насыщения в сатураторе при установившемся режиме, то для зеркальца гигрометра нет необходимости в каком-либо автономном охлаждении. Для этого может быть использован источник охлаждения сатуратора. Тепловая связь зеркальца с охлаждающим устройством сатуратора может осуществляться известным способом через медный теплопровод, а в лучшем случае с помощью теперь широко известной тепловой трубки [7].

С учетом вышесказанного схематический разрез установки приведен на рис. 1. Реальная конструкция значительно сложнее, но для целей настоящего анализа этой схемы достаточно.

Установка представляет собой замкнутую воздушную систему, в которой циркуляция осуществляется за счет турбинки 3. Воздух, нагнетаемый ею, проходит по теплообменнику 2 сатуратора 1 и, принимая на входе сатуратора температуру жидкости, в которой находится теплообменник, проходит над насыщающей поверхностью

воды или льда в сатураторе, выходит из сатуратора и попадает в теплообменник 5 тест-камеры 4. Вышеуказанный способ охлаждения зеркальца 6 гигрометра осуществляется здесь теплопроводом 7 из меди (или в виде тепловой трубки), один из концов которого размещен в термостате сатуратора. Проходя по теплообменнику тест-камеры, воздух принимает температуру жидкости термостата тест-камеры и попадает в рабочий объем ее. При этом струя воздуха из теплообменника тест-камеры входит по касательной к цилиндрической стенке ее, за счет чего воздух хорошо перемешивается. Далее он отсасывается из тест-камеры через выходной патрубок турбинкой. Сатуратор выполнен в виде уплотненного металлического цилиндра, внутри которого образован лабиринт из вертикальных, радиально расположенных пластин, так что при прохождении воздуха возникает интенсивное перемешивание его. Для предотвращения возможности попадания в выходящий поток воды в негазовой фазе на выходе сатуратора установлен простой, но эффективный фильтр. Термостатирование воздуха каждой из этих двух частей установки, как уже упоминалось, осуществляется размещением их в жидкостных термостатах. Такой способ термостабилизации обеспечивает высокое качество ее даже при использовании двухпозиционного регулятора, в котором датчиком температуры служит термистор. Установка позволяет задавать в тест-камере желаемые значения температуры и влажности (парциальное давление, точку росы) благодаря жесткой термодинамической зависимости между температурой границы раздела фаз и парциальным давлением, а также, в соответствии с определением, относительную влажность, если температура в тест-камере поддерживается более высокой, чем в сатураторе. Если при данной температуре в тест-камере упругость выше необходимой, то понижением температуры сатуратора до уровня, соответствующего необходимой упругости насыщения, избыток влаги будет осажден на стенках теплообменника и в сатураторе. Напротив, если температуру сатуратора поднять, то проходящий воздух будет насыщаться за счет испарения.

Как известно, процессы такого рода имеют место и в гигрометре точки росы, при этом в сатураторе реализуются условия, соответствующие условиям в принципиально наиболее совершенном гигрометре Крова, в том смысле, что в них исключаются градиент температуры воздуха и границы раздела фаз. Общность процессов в сатураторе и гигрометре точки росы, приводящих к термодинамическому равновесию в системе водяной пар в смеси с воздухом—вода (лед) обуславливает рассмотрение задания и измерения влажности в единстве. Ввиду того, что количественная связь между упругостью насыщения водяным паром и температурой устанавливается методами термодинамики [8], этот абсолютный метод воспроизведения значения влажности и может быть назван термодинамическим.

Протабулированная зависимость между упругостью и температурой реализуется в условиях равновесия, поэтому следует прежде всего рассмотреть, каковы критерии достижения этих условий

в сатураторе и конденсационном гигрометре. Первая группа погрешностей связана с совокупностью физических процессов, обуславливающих термодинамическое равновесие.

В тех случаях, когда в отличие от рассматриваемого случая, сатуратор входит в состав незамкнутой системы (в которой выходящий из сатуратора воздух не подается на вход его), большое внимание уделяется условию адиабатичности и принимаются меры по достижению насыщения при однократном прохождении воздуха через сатуратор [9]. В замкнутой системе с циркулирующей благодаря многократному прохождению любого выделенного объема воздуха через сатуратор насыщение достигается через определенное число циклов циркуляции при неизменной температуре.

Для того чтобы температура насыщения не зависела от температуры воздуха, входящего в теплообменник, параметры последнего выбираются из условия, при котором температура на выходе его и температура насыщения отличались бы на весьма малую величину. При установившемся режиме для теплообменника, выполненного в виде металлической трубки с круглым сечением ζ , свернутой по винтовой линии, количество тепла, отдаваемое воздухом, движущимся со скоростью v на участке его dx , равно количеству тепла, ушедшего в охлаждающую среду, т. е.

$$\rho_v c_p v \zeta dT = -K^* (T - T_{cp}) dx, \quad (5)$$

где ρ_v — плотность воздуха, c_p — его удельная теплоемкость при постоянном давлении, T_{cp} — температура охлаждающей среды, T — температура воздуха, K^* — коэффициент теплопередачи.

Решение этого уравнения:

$$T - T_{cp} = (T_n - T_{cp}) \exp \left(-\frac{K^* x}{\rho_v c_p v \zeta} \right), \quad (6)$$

где T_n — температура воздуха на входе.

Если положить $T - T_{cp} = 0,05^\circ \text{C}$, а $T_n - T_{cp} = 40^\circ \text{C}$, то длина медной трубки теплообменника должна быть 3,1 м при $d = 14$ мм и скорости потока $v = 10$ м/с.

Рассмотрим динамику насыщения водяным паром при температуре испарения T_c и давлении p , объеме гигрокамеры V_k и площади испарения S . В данном случае выбор зависимости параметра испарения от параметров испарителя определяется из соображений простоты и наглядности. Поэтому используем уравнение Дальтона в дифференциальной форме

$$dm = K \frac{S}{p} (E_c - e) dt, \quad (7)$$

где E_c — упругость насыщения при температуре испаряющей поверхности, т. е. при T_c ; e — упругость пара в воздухе; K — коэффициент пропорциональности, зависящий от коэффициента диффузии для неподвижной атмосферы или от скорости и характера движения воздуха для подвижной среды; m — масса пара; t — время.

Дифференцируя e , полученное из уравнения газового состояния, по t и подставляя выражение для dm в (7), имеем

$$de = \frac{R}{\mu_n} \frac{T_c}{V_k} K \frac{S}{p} (E_c - e) dt. \quad (8)$$

Обозначая $E_c - e = \varepsilon$, получим

$$\frac{d\varepsilon}{\varepsilon} = -K \frac{R}{\mu_n} \frac{S}{p} \frac{T}{V_k} dt. \quad (9)$$

Интегрируя и принимая во внимание начальные условия, имеем

$$E_c - e = (E_c - e_n) \exp \left(-K \frac{S}{p} \frac{R}{\mu_n} \frac{T_c}{V_k} t \right). \quad (10)$$

Насыщению соответствует равенство

$$E_c - e = 0,$$

которое достигается при $S \rightarrow \infty$ или $t \rightarrow \infty$, или $V_k \rightarrow 0$. Но так как S , V_k и t являются величинами конечными, то в процессе насыщения e лишь асимптотически приближается к значению E_c , которое принимается за истинное. Процесс, таким образом, характеризуется определенной постоянной времени

$$\tau_c = \frac{1}{K} \frac{p}{T_c} \frac{\mu_n}{R} \frac{V_k}{S}. \quad (11)$$

Из перечисленных величин K является наиболее неустойчивой по значению и трудноопределимой.

Ниже, однако, определено значение K для скорости потока в сатураторе 10 см/с (скорость в теплообменнике из-за меньшего сечения 600 см/с). При $p = 1000$ мб, $T_c = 20^\circ \text{C}$, $V_k = 30$ л и $S = 100$ см², $\tau_c = 387$ с, т. е. около 6,5 мин. Даже если $t = 5\tau_c$, то

$$E_c - e_k = 0,007 (E_c - e_n).$$

При неизменной температуре тест-камеры отношение $e_n/E_c = 0,2$ означает увеличение первоначальной относительной влажности в 5 раз (например, изменение от 20 до 100 %).

Оценим погрешности в задании упругости от недонасыщения для этого самого неблагоприятного случая. Здесь $E_c - e_k$ выступает в качестве абсолютной погрешности задаваемого значения e , поэтому относительная погрешность задания e

$$\frac{E_c - e_k}{E_c} = 0,007 \left(1 - \frac{e_n}{E_c} \right) = 0,0056.$$

Таким образом, при указанных условиях при задании значения упругости, в несколько раз превышающего имеющееся, вклад в относительную погрешность задания упругости может достигать 0,56 %. Уменьшить эту погрешность до значения 0,05 % можно, увеличив время насыщения до $7,5\tau_c$, т. е. до 45 мин.

Однако за счет введения приема, описанного далее, в процедуру насыщения оказывается возможным существенно уменьшить время насыщения и погрешность. Прием этот связан с конденсацией водяного пара. Если, в отличие от рассмотренного выше процесса испарения в ненасыщенный паром воздух, температура внутренней поверхности теплообменника и сатуратора, а следовательно, и воздуха и частиц, присутствующих в нем, ниже, чем температура равновесия между непаровой фазой и паром, то создаются условия для конденсации. В условиях отсутствия охлажденных ниже точки росы поверхностей или ядер конденсации, как показывает термодинамический анализ, образование жидкой или твердой фазы связано со значительными пересыщениями. В данном случае это явление исключается.

Пусть E_c — упругость насыщения при температуре сатуратора T_c , а e — упругость пара на входе сатуратора. Вследствие того, что $E_c < e$, возникает диффузионный поток в сторону поверхности раздела фаз. Аналогичность процессов при испарении и конденсации приводит к возможности для оценки порядков величин применить формулу Дальтона к процессу конденсации.

Действительно, даже формально, если $E_c - e > 0$, то происходит испарение, если $E_c - e < 0$, то идет конденсация, и если $E_c - e = 0$, то это отвечает условиям равновесия, что полностью соответствует физическому смыслу. Поскольку в замкнутой системе $e \rightarrow E_c$, как и в случае испарения, процесс может также характеризоваться той же постоянной времени.

Прием, о котором говорилось выше, и состоит в том, чтобы для ускорения насыщения задать значение E_c (заданием температуры T_c) такое, при котором e окажется несколько большим его. Тогда за счет конденсации $e \rightarrow E_c$, но уже не «снизу», а «сверху». Короткопериодные колебания температуры сатурации (период которых на порядок меньше τ_c) в дальнейшем не вызывают отклонения e от среднего. Обращая внимание на то, что сатуратор обладает еще и термической постоянной времени τ_t , можно сделать заключение о практически неизменной температуре в сатураторе, если даже колебания термостатирующей жидкости достигали бы $0,1^\circ\text{C}$. Количественную оценку ослабления амплитуды колебаний температуры насыщения в сатураторе можно произвести по формуле (12) (получающейся из решения дифференциального уравнения):

$$\delta T_c = \frac{\delta T_{cp}}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{P_t} \tau_t\right)^2}}, \quad (12)$$

где δT_{cp} — амплитуда колебаний температуры термостатирующей жидкости, δT_c — амплитуда колебаний температуры насыщения в сатураторе, P_t — период колебаний температуры, τ_t — термическая постоянная времени сатуратора.

Самым неблагоприятным, а подчас и недопустимым, является случай монотонного изменения температуры сатуратора, поскольку тогда в зависимости от скорости изменения T_c и соответствующей

ей скорости изменения E_c (v_E) возникает несоответствие e измеренной E , равное, например, при линейном законе изменения $E_c(t)$ $E - e = v_E \tau_c$.

Процессы конденсации, испарения и динамического равновесия в гигрометре точки росы при условии, что конденсат уже сформировался, аналогичны тем же процессам в термогигростате с той разницей, что не $e \rightarrow E$, а $E \rightarrow e$ путем подбора температуры поверхности раздела фаз, вследствие этого e не меняется в объеме. Критерием установления динамического равновесия является неизменность первоначального количества конденсата во времени, а, следовательно, и неизменность во времени сигнала преобразования этого количества, например фотосигнала при оптическом методе преобразования. Минимальный промежуток времени, в течение которого должна наблюдаться эта неизменность, зависит от точки росы.

Поскольку здесь исследуются малые погрешности, то и соответствующие им отклонения от положения равновесия по величине тоже небольшие. Поэтому следует воспользоваться (4), подставив его в (7). Тогда

$$dm = K \frac{L}{k} S \frac{E_p}{p} \frac{\Delta T_p}{T_p^2} dt, \quad (13)$$

где E_p — упругость насыщения, равная истинной упругости пара в воздухе и соответствующая точке росы T_p ; ΔT_p — первоначальное отклонение температуры поверхности раздела фаз от истинной температуры точки росы; K — коэффициент в формуле Дальтона.

В [10] приведены экспериментально-расчетные значения времени формирования конденсата с плотностью $\sigma = 3$ мкг/см² для $\Delta T_p = 0,1^\circ \text{C}$ и различных температур и скоростей потока над конденсационной поверхностью, из которых можно определить K . Из формулы (13) следует

$$\frac{\sigma}{t} = \frac{m}{St} = K \frac{L}{k} \frac{E_p}{p} \frac{\Delta T_p}{T_p^2}, \quad (14)$$

откуда определяется K . Например, при $v = 100$ см/с время формирования конденсата $t = 11$ с для $T_p = +20^\circ \text{C}$, $\Delta T_p = 0,1^\circ \text{C}$ и $p = 1000$ мб. $K = 1,82 \cdot 10^{-3}$ г/(см²·с). Ряд вычисленных значений K в г/(см²·с) с учетом зависимости L от фазы конденсата и температуры приведен в табл. 2.

Таблица 2

Фаза	v см/с		
	10	100	1000
Вода	$0,575 \cdot 10^{-3}$	$1,82 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Лед	$0,496 \cdot 10^{-3}$	$1,57 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$

Значение $K = 0,575 \cdot 10^{-3}$ использовано ранее при расчете τ_c .

При одном и том же абсолютном значении m (и соответствующего ему фотосигнала Φ) во всех случаях измерений можно считать, что всегда для определенной фазы существует однозначное соответствие¹ Δm и $\Delta\Phi$ [16].

Если задаться одним и тем же значением ΔT_p для всего диапазона измерений, то можно выяснить величины отношений скоростей изменения массы (или фотосигналов) $d\Phi/dt = v_\Phi$ при разных значениях точки росы

$$\frac{v_{1\Phi}}{v_{2\Phi}} = \frac{E_{1p}}{E_{2p}} \left(\frac{T_{2p}}{T_{1p}} \right)^2 = \left(\frac{T_{2p}}{T_{1p}} \right)^2 \exp \left(\frac{L}{k} \frac{T_2 - T_1}{T_2 T_1} \right). \quad (15)$$

Затем при заданном допустимом значении ΔT_p определить при какой-либо определенной T_p (лучше для положительных температур)

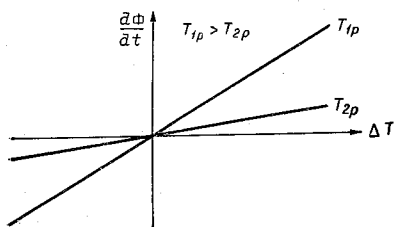


Рис. 2. Зависимость скорости изменения фотосигнала $d\Phi/dt$ от разности $\Delta T = T_p - T_k$ при неизменной T_p .

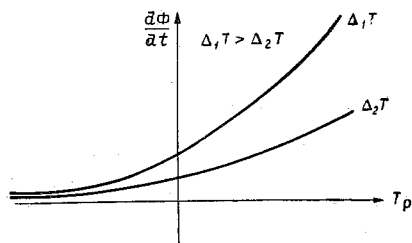


Рис. 3. Зависимость скорости изменения фотосигнала $d\Phi/dt$ от T_p при неизменной $T_p - T_k$.

v_Φ или время, необходимое для отклонения фотосигнала на единицу его измерения. Для всех остальных значений T_p можно вычислить максимальное время, допустимое для изменения фотосигнала на единицу, умножением ранее определенного значения на величину отношения скоростей.

Если при измерении окажется, что время изменения фотосигнала на единицу меньше допустимого, то это означает, что ΔT_p превышает допустимое и в зависимости от знака v_Φ , т. е. уменьшения или увеличения фотосигнала, следует уменьшить или увеличить температуру зеркала (в полупроводниковом холодильнике изменить слегка ток) и произвести вышеописанный контроль вновь. Рисунки 2 и 3 наглядно иллюстрируют сказанное. Из рис. 2 видно, что значение скорости зависит от $T_p - T_k$ и T_p , а знак — от знака $T_p - T_k$. На рис. 3 можно отметить совпадение хода графика зависимости скорости от T_p и хода графика зависимости упругости насыщения водяного пара от температуры. Для какого-либо данного значения точки росы скорость пропорциональна $T_p - T_k$.

¹ По крайней мере, в среднем. Результаты специальных детальных исследований ледяных кристаллов (например, [19]) в атмосфере заставляют предположить возможность небольших вариаций такого соответствия в зависимости от точки инея. Это, однако, не меняет излагаемую методику и не является источником погрешности.

Если принять допустимое время при $T_p = +20^\circ\text{C}$ за 1, то отношения времен, вычисленных по формуле при $T_p = 0^\circ$ и $T_p = -30^\circ\text{C}$, составят пропорцию 1:3,2:13,5, т. е. при $T_p = -30^\circ\text{C}$ время контроля в 13,5 раз превышает это время при $T_p = +20^\circ\text{C}$. Невнимание к этому обстоятельству имеет своим следствием погрешности измерения точки росы при ее низких значениях, которые существенно превышают погрешности при более высоких значениях точки росы. Из вышеприведенного анализа, однако, следует, что погрешность измерения точки росы может не отличаться при отрицательной температуре от погрешности при положительной.

Следует отметить, что в связи с указанными различиями в скоростях изменения параметров конденсата (а, следовательно, и фотосигнала) при автоматизации процесса слежения за точкой росы тип регулятора меняется при переходе от больших упругостей к меньшим, поскольку в противном случае в системе возникают автоколебания. В [11] показано, например, что в диапазоне точки росы выше -20°C необходимо П-регулирование, в диапазоне же ниже -20°C — ПИД-регулирование.

Конечно, в условиях меняющейся упругости (колебаниях, пульсациях) применение авторегулятора неизбежно. Однако в случае меняющейся влажности термогигростата оптимальным с точки зрения достижения минимальной погрешности оказывается оператор. Для того чтобы перейти от пропорции при сравнении минимальных промежутков времени контроля равновесия к абсолютным их значениям, необходимо корректно определить v_Φ при точно известных ΔT_p и T_p . Из-за неопределенности K результаты расчетных оценок были бы весьма ориентировочными, поэтому определение должно производиться экспериментально. С этой целью после установившегося режима в термогигростате и гигрометре точки росы нужно изменить температуру зеркальца на небольшую, точно измеренную величину и измерить время, в течение которого фотосигнал изменится на $\Delta\Phi$, тем самым для данного T_p скорость $v_\Phi = \Delta\Phi/\Delta t$ будет определена как функция заданного ΔT_p . Поскольку, согласно (13), между v_Φ и ΔT_p прямая зависимость, то, используя эту зависимость и (15), можно по v_Φ при других T_p определить ΔT_p , т. е. решить обратную задачу — определить погрешность измерения точки росы за счет отклонения от состояния равновесия.

В начале анализа динамического равновесия было предположено, что на зеркальце конденсат уже сформировался и в таком случае, в отличие от способа измерения точки росы по появлению и исчезновению конденсата, сорбционные свойства поверхности зеркальца не играют решающей роли. Но при таком задании влажности могут иметь существенное значение сорбционные процессы на поверхностях приборов, устанавливаемых в тест-камере, и на стенках самой камеры. Очевидно, что сорбция приводит к тому же эффекту, что и утечка пара за счет негерметичности и, наоборот, десорбция равносильна притоку пара извне за счет негерметичности. Переход от одного сорбционно-равновесного состояния к другому происходит с переменной уменьшающейся скоростью. Для большин-

ства материалов процесс сорбции складывается из адсорбции молекул пара на поверхности и диффузии молекул с поверхности в толщу материала [13]. Скорость процесса в основном определяется вторым эффектом и зависит от температуры, давления, конкретного сорбента и характера поверхности (пористости). Абсолютное количество адсорбированного или десорбированного пара определяется, помимо этих параметров, площадью сорбента и относительной влажностью.

Таким образом, сорбционные процессы способны оказать неучитываемое воздействие на величину задаваемой влажности, если время перехода от одного сорбционного равновесия к другому превышает время перехода от одного значения влажности к другому. Расчет, который можно было бы провести с учетом кинетики сорбционных процессов исходя из допустимой погрешности, привел бы к рекомендациям по использованию материалов, требования к которым очевидны. Экспериментально установлено, что наилучшими в этом отношении являются стали с присадками никеля, допустимы медные сплавы. Присутствие поверхностей из нейлона нежелательно, так как время перехода к сорбционному равновесию у него достигает нескольких часов [12].

Помимо сорбционных, могут происходить процессы капиллярной конденсации (при помещении в тест-камеру пленочных или волосяных влагочувствительных элементов). Время восстановления равновесия определяется их инерцией.

При исследовании приборов типа кулонометрических, в которых вследствие хемосорбции происходит непрерывный и необратимый процесс поглощения водяного пара, при оценке возможной погрешности можно руководствоваться расчетом, приведенным ниже для случая диффузии вследствие негерметичности.

Поскольку здесь затронут вопрос о влиянии исследуемого прибора на значение влажности в тест-камере, оценим изменение упругости в ней за счет фазового перехода на зеркальце гигрометра при отрицательной температуре, когда абсолютная влажность достигает наименьших значений. Так как абсолютная влажность $a =$

$= 217 \frac{e}{T}$, то масса в объеме V_K равна $m = 217 \frac{e}{T} V_K$. Согласно последней формуле, относительное изменение упругости равно относительному изменению массы. Абсолютное изменение массы пара равно массе конденсата на зеркальце, т. е. $\Delta m = \sigma S_3$, где σ — поверхностная плотность конденсата. Таким образом,

$$\frac{\Delta e}{e} = \frac{\sigma S_3 T}{217 e V_K}. \quad (16)$$

Полагая максимальное значение $\sigma = 36 \cdot 10^{-6}$ г/см² [10], $S_3 = 0,25$ см², $e = 0,13$ мб, $T = 233$ К, $V_K = 30$ л = $0,03$ м³, получим $\Delta e/e = 2,4 \cdot 10^{-3} = 0,24\%$, что при указанных условиях соответствует $\Delta T_p = 0,02^\circ$ С.

Такая погрешность возникла бы в отсутствие циркуляции, но благодаря восстановлению равновесия в сатураторе эта погреш-

ность исключается. Определение термодинамической точки росы предполагает равновесие над плоской поверхностью воды. Это условие выполняется в сатураторе. Однако, поскольку конденсат в гигрометре точки росы представляет собой совокупность кристаллов или капель, характеризующуюся некоторым законом распределения их по размерам, следует учесть погрешность, вызываемую отклонением значения упругости насыщения над поверхностью с конечным радиусом кривизны r (E_r) от значения упругости насыщения над плоской поверхностью (E_∞) (эффект Кельвина). Количественно это выражается формулой Томсона

$$\ln \frac{E_r}{E_\infty} = \frac{2\kappa}{\rho_k R_\Pi T} \frac{1}{r} = c_r \frac{1}{r}, \quad (17)$$

где κ — коэффициент поверхностного натяжения, ρ_k — плотность конденсата, $R_\Pi = \frac{R}{\mu_\Pi}$.

Потенцируя, разлагая в ряд и ограничиваясь первыми членами разложения [14], получаем

$$\Delta E_r = E_\infty \frac{c_r}{r}. \quad (18)$$

Относительная погрешность определения упругости над неплоской поверхностью

$$\frac{\Delta E}{E_\infty} = \frac{c_r}{r}. \quad (19)$$

Задавая $\Delta E/E_\infty$ такой величины, чтобы ею можно было пренебречь, например, 0,01%, что соответствует погрешности точки росы 0,002°, и, имея значение $c_r = 10^{-7}$ см, можно определить минимальный допустимый средний размер капель конденсата в вышеуказанном распределении:

$$r_{\min} = c_r \frac{E_\infty}{\Delta E} = 10^{-3}.$$

Таким образом, если средний радиус капель на поверхности зеркала не меньше 10 мк, то погрешностью за счет эффекта Кельвина можно пренебречь.

Для того чтобы в гигрометре реализовать это условие, следует установить, какой фотосигнал в гигрометре данного типа соответствует вышеуказанному распределению с максимумом, приходящимся на радиус капель $r = 10$ мк. Для этого достаточно посредством изменения температуры зеркала за счет изменения тока через холодильник, пользуясь микроскопом с 50-кратным увеличением, достичь того, чтобы в структуре конденсата приблизительно большинство капель имело диаметр 20 мк, и одновременно с этим наблюдением отметить значение фотосигнала. Общее количество капель при поддержании на зеркальце идентичных условий остается всегда одинаковым. С целью исключения влияния изменения

светового потока и чувствительности фотодиода целесообразно полученное значение фотосигнала нормировать относительно некоторого наибольшего значения, которое почти не меняется при увеличении охлаждения. Располагая нормированным значением и измеренным в любое время наибольшим значением фотосигнала, можно умножением первого на второе получить абсолютное значение фотосигнала, удовлетворяющее указанному условию.

В отличие от эффекта Кельвина, эффект Рауля может вносить погрешность как при получении заданной упругости, так и при измерении ее методом точки росы. При соблюдении условия химической чистоты непаровой фазы воды и при наличии в ней другого, растворимого компонента равновесное значение упругости водяного пара при температуре насыщения будет ниже, чем над чистой водяной компонентой, а результат измерения по гигрометру будет завышенным по сравнению с результатом при отсутствии примеси.

Для малых концентраций величина абсолютного понижения значения упругости насыщения над раствором относительно плоской поверхности чистого растворителя

$$\Delta E = \frac{n}{N} E_{\infty}, \quad (20)$$

где $n = m_{\text{п}}/\mu_{\text{п}}$, $N = m_{\text{р}}/\mu_{\text{р}}$ — соответственно число грамм-молей примеси и растворителя.

Относительная погрешность в определении упругости, таким образом, составляет: $\frac{\Delta E}{E_{\infty}} = \frac{n}{N}$, т. е. пропорциональна примерно концентрации примеси $c_{\text{п}}$ (точно $c_{\text{п}} = \frac{n}{N+n}$).

Если допустить наличие в воздухе аэрозоля в виде сфер радиусом $r = 1$ мк и концентрацией $z = 500 \text{ см}^{-3}$, то, предполагая, что они оседают на влажной поверхности сатуратора ($S_{\text{с}} = 100 \text{ см}^2$) и зеркала ($S_{\text{з}} = 0,25 \text{ см}^2$) гигрометра, получим количество осажденных частиц, пропорциональное указанным площадям. Масса воды в сатураторе $m_{\text{р.с}} = 50$ г, масса конденсата $m_{\text{р.з}} = 10^{-5}$ г. В неблагоприятном случае аэрозоль хорошо растворим в воде и имеет небольшой молекулярный вес $\mu_{\text{п}}$, например NaCl имеет $\mu_{\text{п}} = 58$ и плотность $\gamma_{\text{п}} = 2,16 \text{ г/см}^3$. Масса примеси на зеркальце рассчитывается по очевидной формуле

$$m_{\text{п.з}} = \gamma_{\text{п}} \frac{S_{\text{з}}}{S_{\text{с}}} V_{\text{к}} z \frac{4}{3} \pi r^3,$$

а в сатураторе

$$m_{\text{п.с}} = \gamma_{\text{п}} \frac{S_{\text{с}}}{S_{\text{з}}} V_{\text{к}} z \frac{4}{3} \pi r^3.$$

Подставляя в формулу (20) выражения для $m_{\text{п}}$ и численные значения входящих величин, получим, что для сатуратора $\Delta E/E =$

$= 3,6 \cdot 10^{-8} = 3,6 \cdot 10^{-6} \%$ (т. е. $\Delta T_p = 0^\circ \text{C}$), а для гигрометра $\Delta E/E = 0,42 \cdot 10^{-3} = 0,042 \%$ (т. е. $\Delta T_p = 0,006^\circ \text{C}$) при 0°C .

Количество частиц такого размера сильно преувеличено для обычной атмосферы, и, несмотря на это очень неблагоприятное условие, погрешность за счет эффекта Рауля пренебрежимо мала для сатуратора и составляет в худшем случае $0,006^\circ \text{C}$ в гигрометре (погрешность по упругости $0,042 \%$). Соблюдая меры предосторожности в отношении загрязнений внутри камеры и зеркальца, можно эту погрешность довести до значения, пренебрежимо малого.

Все вышеупомянутые процессы, как предполагается, распространены на идеальные газы. Однако при прецизионных измерениях отклонение поведения реального газа от идеального вносит существенную погрешность. Уточнением закона газового состояния (Клапейрона—Менделеева) в применении к реальным газам является уравнение Ван-дер-Ваальса. Обобщение последнего представляется [8, 15] в виде

$$\frac{pV}{RT} = Z(p, T) = 1 + \frac{B(T)}{V} + \frac{C(T)}{V^2} + \frac{D(T)}{V^3} + \dots,$$

где $B(T)$, $C(T)$, $D(T)$ — вириальные коэффициенты уравнения состояния, или

$$\frac{pV}{RT} = Z(p, T) = 1 + B'(T)p + C'(T)p^2 + D'(T)p^3 + \dots$$

Вириальные коэффициенты — функции температуры и химической природы данного газа. Хотя принятые к использованию точные формулы для расчета упругости насыщения водяного пара над водой или льдом составлены с учетом реальных свойств водяного пара, при точных экспериментах их распространять на смесь газов не представляется возможным ввиду того, что свойства влажного воздуха отличаются от свойств отдельного газа или пара. Если упругость насыщения водяного пара вне смеси является только функцией температуры $E_v(T)$, то упругость насыщения водяного пара в смеси с другими газами является функцией не только T , но и состава и давления. Поэтому упругость водяного пара в смеси носит название эффективной упругости пара в насыщенном по отношению к воде (льду) воздухе:

$$E'_v = E_v f_v(P, T) = E_v f_v, \quad (21)$$

$$E'_l = E_l f_l(P, T) = E_l f_l. \quad (22)$$

Значения $f_v(P, T)$ и $f_l(P, T)$ для воздуха вычислены Гоффом и Грачем и опубликованы в Смитсоновских метеорологических таблицах, часть их приведена в [8], формула для расчета дана в [4]. Отклонения E' от E объясняются влиянием растворенных газов и давления на сконденсированную фазу и внутримолекулярных сил на свойства влажного воздуха.

Из вышеизложенного следует, что истинная упругость насыщения должна рассчитываться по вышеприведенной формуле. Погрешность от неучета этого фактора

$$\left| \frac{\Delta E_v}{E_v} \right| = \frac{E'_v - E_v}{E_v} = \frac{E'_v}{E_v} - 1 = f_v - 1. \quad (23)$$

Для $T = -30^\circ \text{C}$ и $p = 1100 \text{ мб}$ из таблицы [8]

$$f_v - 1 = 56 \cdot 10^{-4} = 0,0056 = 0,56\%,$$

для $T = -30^\circ \text{C}$ и $p = 900 \text{ мб}$

$$f_v - 1 = 46 \cdot 10^{-4} = 0,0046 = 0,46\%,$$

что эквивалентно погрешности измерения температуры насыщения или точки росы для первого случая $0,06^\circ \text{C}$ и для второго около $0,05^\circ \text{C}$.

Аналогичные явления и зависимости необходимо учитывать при точных измерениях по гигрометру точки росы. Согласно определению ВМО, для точки росы

$$E' = E_v(p, T_p), \quad (24)$$

где T_p — термодинамическая температура точки росы. Но $E'_v = E_v f(p, T_p)$, поэтому

$$E' = E_v(T_p) f(p, T_p), \quad (25)$$

зависимость же E_v от T_p задана точной формулой и табулирована для водяного пара вне смеси.

Если давление, при котором происходит насыщение в сатураторе, и давление, при котором производится измерение точки росы, одинаковы, то $T_p = T_c$.

Анализируя формулу (25), можно убедиться, что при прочих равных условиях T_p для чистого пара выше, чем T_p для смеси. Поскольку T_p входит неявным образом в формулу, то T_p отыскивается рекуррентным способом.

Для получения эффективного значения E' следует воспользоваться формулой (25). Погрешность от недоучета определяется таким же образом, как и для сатуратора.

Вышерассмотренные погрешности связаны с процессами динамического фазового равновесия. Если равновесие достигнуто, то погрешности сводятся к минимуму.

Все последующие процессы не связаны с фазовым переходом и происходят в одной, газовой, фазе. Относительная влажность в тест-камере определяется по формуле

$$\begin{aligned} \varphi\% &= \left(\frac{e'}{E_v} \right)_{p, T} \cdot 100\% = \frac{E'_v(T_c, p_c)}{E'_v(T_k, p_k)} \frac{p_k}{p_c} \cdot 100\% = \\ &= \frac{E_v(T_c) f(p_c, T_c)}{E_v(T_k) f(p_k, T_k)} \frac{p_k}{p_c} \cdot 100\% \end{aligned} \quad (26)$$

(аналогична формула для насыщения над льдом $E_{\text{л}}$). Согласно этой формуле, для точного определения значения упругости и относительной влажности в тест-камере необходимо еще знать, помимо температуры и давления в сатураторе, температуру и давление в тест-камере.

В термогигростате отличие p_k от p_c связано с циркуляцией воздуха (циркуляция — следствие перепада давлений между сатуратором, где давление выше, и тест-камерой). При самой большой скорости циркуляции (порядка 10 м/с) этот перепад составляет несколько десятков миллиметров водяного столба.

Таким образом, множитель p_k/p_c , определяющий изменение упругости при переходе в тест-камеру (в соответствии с законом Дальтона о парциальных давлениях) и связанной с ней относительной влажностью, имеет порядок $990/1000 = 0,99$ (давление в сатураторе 1000 мб, а в тест-камере на 10 мб ниже).

В этом случае упругость понижается на 1% относительно значения в сатураторе, соответственно снижается и точка росы, что, как выше определено, эквивалентно погрешности по точке росы $0,1^\circ\text{C}$ при -23°C и $0,19^\circ\text{C}$ при $+37^\circ\text{C}$.

Таким образом, при точных измерениях следует учитывать влияние разности давлений. При значении абсолютной погрешности измерения давления 1 мб относительная погрешность определения упругости, вызванная ею, составит 0,2%, т. е.

$$\frac{\Delta e}{e} \approx \frac{\Delta(p_k/p_c)}{p_k/p_c} = \frac{\Delta p_k}{p_k} + \frac{\Delta p_c}{p_c} = 0,002. \quad (27)$$

Это соответствует $\Delta T_p = 0,018^\circ$ для -23°C и $\Delta T_p = 0,032^\circ\text{C}$ для $+30^\circ\text{C}$. Причем ошибка в определении упругости от пренебрежения отличием p_k/p_c от единицы является систематической (хотя и меняющейся по величине, но имеющей постоянный знак — минус), тогда как ошибка за счет погрешности измерения p_k/p_c в основном является случайной.

Можно убедиться, что, допуская весьма малую случайную относительную погрешность определения e , достаточно ограничиться измерением перепада давления между сатуратором и камерой:

$$p_c - p_k = \delta_p; \quad \frac{p_k}{p_c} = \frac{p_k}{p_k + \delta_p} = \frac{1}{1 + \delta_p/p_k}. \quad (28)$$

Тогда

$$\frac{\Delta e}{e} = \frac{\Delta e_c}{e_c} + \frac{\Delta(1 + \delta_p/p_k)}{1 + \delta_p/p_k}. \quad (29)$$

Составляющая этой погрешности за счет погрешностей в определении давлений

$$\frac{\Delta(1 + \delta_p/p_k)}{1 + \delta_p/p_k} = \frac{\Delta \delta_p/p_k + \Delta p_k/p_k^2 \cdot \delta_p}{1 + \delta_p/p_k}. \quad (30)$$

В этой формуле значение δ_p получается в результате измерения спиртовым манометром с погрешностью 0,1 мб и имеет порядок

10 мб; p_k имеет порядок 1000 мб и, если его не измерять, то изменение на ± 10 мб должно рассматриваться как погрешность Δp_k .

Подставляя в уравнение эти значения, имеем

$$\frac{\Delta(1 + \delta p/p_k)}{1 + \delta p/p_k} = 1,98 \cdot 10^{-4}, \text{ т. е. } 0,02\%,$$

что на порядок меньше, чем при измерении двух давлений с погрешностью 1 мб.

Если принять амплитуду атмосферного давления в месте установки термогигростата равной 30 мб, то соответствующее значение составляющей относительной погрешности определения ϵ составит $3,88 \cdot 10^{-4} = 0,0388\% \approx 0,039\%$.

Когда внутренний воздушный объем термогигрокамеры представляет собой совершенно изолированный от внешней среды объем, т. е. достигнута полная герметизация, то при изменении температуры в гигрокамере возникает соответствующее изменение давления (в соответствии с законом газового состояния):

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1}. \quad (31)$$

Пусть $p_1 = 1000$ мб, $T_1 = 303$ К, $T_2 = 243$ К, тогда $p_2 = 1000 \cdot \frac{243}{303} = 800$ мб. Такое изменение давления влечет за собой необходимость введения поправок на температуру или измерения давления.

Вместе с тем, достижение полной герметичности сопряжено с конструктивными усложнениями и трудностями в эксплуатации. Поэтому целесообразно допустить неполную герметичность, чтобы давление в гигрокамере всегда уравнивалось бы с наружным. Количественно степень негерметичности можно оценить на основании решения дифференциального уравнения. Обозначая через Δp разность между атмосферным давлением p_a и давлением в камере p_k и используя формулу Пуазейля для течения в капилляре, имеем

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\pi r}{8L\eta} r^4 \Delta p. \quad (32)$$

Подставляя сюда выражение для m из уравнения газового состояния, приходим к дифференциальному уравнению, решением которого будет

$$\Delta p = \Delta p_0 \exp(-t/\tau), \quad (33)$$

где Δp_0 — начальное значение разности Δp , τ — постоянная времени процесса выравнивания.

Если для определенности представить связь внутреннего объема с наружной атмосферой в виде капилляра длиной L и радиусом r , то постоянная времени равна

$$\tau = V \frac{8L}{\pi r^4} \eta \frac{\mu L}{pRT} = \frac{8\eta}{\pi} \frac{1}{p_a} \frac{LV}{r^4}, \quad (34)$$

где η — динамическая вязкость воздуха, V_k — объем гигрокамеры, p_a — давление наружной атмосферы.

Допускается такая негерметичность, чтобы τ было (как и τ сорбционных процессов) порядка τ_c сатуратора. При выполнении этого условия происходит компенсация изменения упругости, вызванная добавлением наружного воздуха.

Положим, что негерметичность имеет место за счет двух капилляров, у которых $L=1$ см и $r=100$ мк $=10^{-2}$ см; $\eta=18 \cdot 10^{-5}$ г/см $\cdot$ с; $p_a=1000$ мб $=10^6$ дин/см², тогда $\tau=722$ с ≈ 12 мин. Для экспериментального определения τ используется обычная методика. Допущение негерметичности приводит к необходимости оценить влияние возникающей при этом диффузии и термодиффузии через подобного рода капилляр между гигрокамерой и окружающей атмосферой.

Процесс диффузии обусловлен разностью концентраций водяного пара в гигрокамере и наружном воздухе. Поток молекул воды через единицу площади в единицу времени

$$i = -D \frac{\Delta n}{\Delta x}, \quad (35)$$

где D — коэффициент диффузии для молекул водяного пара, $\Delta n/\Delta x$ — градиент концентрации

$$\frac{\Delta n}{\Delta x} = \frac{n_a - n_k}{L} = \frac{1}{kT} \frac{e_a - e_k}{L} \quad (36)$$

(что следует из формулы $e = nkT$, где n — концентрация молекул воды, k — постоянная Больцмана, T — температура). Полный диффузионный поток через капилляр длиной L и сечением πr^2 в единицу времени

$$I = -D \frac{1}{kT} \frac{\pi r^2}{L} (e_a - e_k). \quad (37)$$

Масса водяного пара, входящего в камеру при диффузии, в единицу времени

$$m = m_m I = -\frac{\mu}{A} D \frac{1}{kT} \frac{\pi r^2}{L} (e_a - e_k), \quad (38)$$

где m_m — масса молекулы водяного пара, μ — грамм-молекула, A — число Авогадро. Поскольку $Ak=R$,

$$m = -\frac{\mu}{R} D \frac{1}{T} \frac{\pi r^2}{L} (e_a - e_k). \quad (39)$$

Таким образом, вследствие разностей концентраций водяного пара внутри камеры и снаружи (а следовательно, и упругостей) будет иметь место тенденция к их выравниванию. Для того чтобы этот процесс не влиял на значение упругости в камере при установившемся режиме, следует выполнить условие, чтобы количество водяного пара, поступающее в камеру, было меньше количества пара, способного конденсироваться в сатураторе, т. е.

$$K \frac{S}{p} (E_c - e_k) > \frac{\mu}{R} D \frac{1}{T} \frac{\pi r^2}{L} (e_a - e_k) \quad (40)$$

или

$$K \frac{S}{p} \left(\frac{E_c}{e_k} - 1 \right) > \frac{\mu}{R} D \frac{1}{T} \frac{\pi r^2}{L} \left(\frac{e_a}{e_k} - 1 \right). \quad (41)$$

Допуская, чтобы $\left| \frac{E_c - e_k}{e_k} \right| < 3 \cdot 10^{-4}$ (т. е. 0,03%), можно написать

$$3 \cdot 10^{-4} K \frac{S}{p} > \frac{\mu}{R} D \frac{1}{T} \frac{\pi r^2}{L} \left(\frac{e_a}{e_k} - 1 \right). \quad (42)$$

Принимая те же численные параметры негерметичности (два капилляра длиной по 1 см и радиусом 0,01 см) и учитывая неблагоприятный случай, когда $e_a \gg e_k$, например, $T_a = +30^\circ \text{C}$ при $\varphi_a = 100\%$, иначе $e_a = 42,48$ мб и $T_k = -30^\circ \text{C}$, т. е. $e_k = 0,38$ мб при значении коэффициента диффузии водяного пара в воздухе $D = 0,23 \text{ см}^2/\text{с}$, получим для левой части неравенства (42) $1,26 \times 10^{-11} \text{ см} \cdot \text{с}$. Для правой части, учитывая установленную ранее зависимость для скорости конденсации, получим при $K = 0,496 \times 10^{-3}$ $1,5 \cdot 10^{-11} \text{ см} \cdot \text{с}$.

Условие по ограничению негерметичности, следовательно, выполняется даже в этом неблагоприятном случае. Поскольку при работе термогигростата обычно температура внутри гигрокамеры отличается от температуры окружающего воздуха, принципиально создаются условия для возникновения термодиффузионного потока водяного пара j_T , величина которого определяется уравнением

$$j_T = D_T \frac{1}{T} \frac{dT}{dx}, \quad (43)$$

где D — коэффициент термодиффузии, T — температура, x — длина.

Из анализа и экспериментальных наблюдений следует, что в стационарном состоянии концентрация легкой компоненты смеси (какой является в данном случае водяной пар) больше в более нагретых местах, т. е. термодиффузионный поток водяного пара направлен из охлажденной области в более нагретую. Но, поскольку поток диффузии направлен обычно из более нагретой области, где концентрация водяного пара, как правило, выше, в область более холодную, в итоге за счет возникновения условий для термодиффузии лишь ослабляется диффузионный поток из-за разности концентраций. В общем случае при получении относительной влажности, отличной от 100%, воздух, насыщенный в сатураторе, проходя по теплообменнику тест-камеры, приобретает более высокую температуру и в соответствии с законом Дальтона о парциальных давлениях, казалось бы, упругость водяного пара должна увеличиться. Однако, поскольку увеличение температуры происходит изобарически, парциальное давление водяного пара остается равным парциальному давлению насыщения в сатураторе, и следовательно, этот процесс не вызывает погрешностей.

Но при измерении гигрометром точки росы отличие температуры динамического равновесия от температуры воздуха (т. е. при отно-

сительной влажности меньшей 100%) вызывает погрешность. Эта погрешность обусловлена процессом, не относящимся к первым двум группам процессов. Он входит в совокупность процессов, связанных с теплофизическими явлениями (в частности, с теплообменом), влияющими в свою очередь на погрешность измерения температуры как газа, так и поверхности твердого тела.

Хотя уравнения теплопередачи через криволинейные поверхности, какими являются поверхности капель, отличаются от уравнений для случая плоских поверхностей, допуская пренебрежимо малую ошибку в данном случае, можно рассматривать конденсат для простоты в виде слоя воды или инея толщиной, равной радиусу капли r .

Поверхность конденсата, находящегося в термодинамическом равновесии с водяным паром, одновременно находится в тепловом равновесии с окружающим воздухом. Этому равновесию соответствует уравнение теплового баланса

$$\frac{\lambda S}{r} (T_{\text{п}} - T_{\text{з}}) = \alpha S (T_{\text{в}} - T_{\text{п}}), \quad (44)$$

где λ — коэффициент теплопроводности конденсата, α — коэффициент теплообмена конденсата с воздухом, $T_{\text{п}}$ — температура поверхности конденсата, $T_{\text{в}}$ — температура воздуха, $T_{\text{з}}$ — температура поверхности зеркала.

При влажности 100% выполняется равенство $T_{\text{р}} = T_{\text{в}}$, где $T_{\text{р}}$ — точка росы, но вследствие динамического равновесия $T_{\text{р}} = T_{\text{п}}$, следовательно, $T_{\text{п}} = T_{\text{в}}$, поэтому, согласно уравнению баланса, $T_{\text{п}} - T_{\text{з}} = 0$, т. е. при 100%

$$T_{\text{п}} = T_{\text{з}} = T_{\text{р}} = T_{\text{в}}.$$

При относительной влажности, меньшей 100%, $T_{\text{р}} < T_{\text{в}}$, поэтому $T_{\text{п}} > T_{\text{з}}$. Значение разности температур поверхностей конденсата и зеркала

$$\Delta T = T_{\text{п}} - T_{\text{з}} = \frac{\alpha r}{\lambda} (T_{\text{в}} - T_{\text{п}}).$$

Но из условия термодинамического равновесия фаз $T_{\text{р}} = T_{\text{п}}$, поэтому, если принимать измеряемую $T_{\text{з}}$ за точку росы, ΔT будет рассматриваться как погрешность:

$$\Delta T = T_{\text{р}} - T_{\text{з}} = \frac{\alpha r}{\lambda} (T_{\text{в}} - T_{\text{п}}). \quad (45)$$

При $\alpha = 0,006$ кал/(с·см²·град), $\lambda = 0,0055$ кал/(с·см·град) (для льда) [16], $r = 10^{-3}$ см и $(T_{\text{в}} - T_{\text{р}}) = 20^\circ \text{C}$ $\Delta T = 0,02^\circ \text{C}$, что соответствует $\Delta E/E = 0,2\%$ при -23°C . Сопоставляя это значение погрешности с погрешностью за счет эффекта Кельвина при том же радиусе, можно прийти к выводу, что представляется возможность уменьшить радиус капель.

Действительно, общая погрешность за счет градиента в конденсате и эффекта Кельвина равна сумме:

$$\Delta T_{\Sigma} = \Delta T_r + \Delta T. \quad (46)$$

Используя ранее выведенные равенства (19) и (3), получим

$$\Delta T_{\Sigma} = \frac{\alpha r}{\lambda} (T_v - T_p) + \frac{k}{L} T_p^2 \frac{c_r}{r}. \quad (47)$$

Анализируя эту функцию на минимум относительно r , можно найти, что ΔT_{Σ} имеет минимум при оптимальном радиусе капель

$$r_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{2k}{L} \frac{\alpha}{\rho_k R_{\text{п}}} \frac{\lambda}{\alpha} \frac{T_p}{T_v - T_p}} \quad (48)$$

или

$$r_{\text{опт}} = W \sqrt{\frac{1}{T_v/T_p - 1}}, \quad (49)$$

где W — постоянная. Отсюда следует, что $r_{\text{опт}}$ уменьшается с уменьшением относительной влажности. Это иллюстрируется

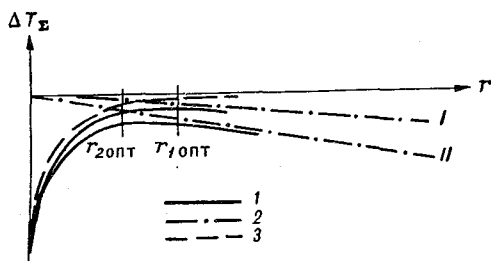


Рис. 4. Зависимость погрешности измерения точки росы от среднего радиуса капель конденсата для двух значений $(T_v - T_p)_I < (T_v - T_p)_{II}$:

1 — сумма, 2 — составляющая из-за градиента в конденсате, 3 — составляющая из-за эффекта Кельвина.

рис. 4, на котором видно, что существует оптимальное значение радиуса, которому соответствует минимум погрешности. Этот минимум смещается в направлении уменьшения радиуса при уменьшении относительной влажности.

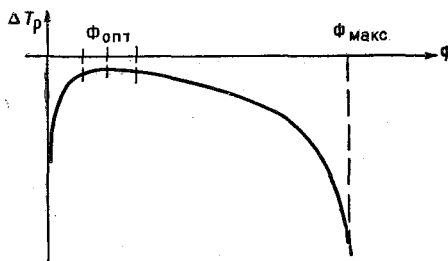


Рис. 5. Зависимость между погрешностью измерения точки росы и значением фотосигнала.

Следует заметить, что в автоматических П-регуляторах это условие в значительной мере выполняется.

Характер зависимости между погрешностью измерения точки росы и значением фотосигнала отражен на рис. 5. Можно видеть,

что существует предельное значение фотосигнала, которое почти не меняется в зависимости от разности $T_p - T_в$. Значения фотосигнала, близкие к 0, соответствуют весьма мелким каплям. Значение фотосигнала $\Phi_{\text{опт}}$ для конкретного экземпляра гигрометра, соответствующее $r_{\text{опт}}$, всегда можно определить умножением $\Phi_{\text{макс}}$ на нормирующий множитель.

Значение $r_{\text{опт}}$ при вышеуказанных параметрах и при $T_p = -273,15 \text{ К}$ (0°С) составляет 2,7 мкм. Наиболее эффективным средством исключения погрешности за счет градиента температуры в конденсате, однако, следует считать применение конструкции гигрометра, в которой анализируемый воздух предварительно охлаждается до температуры, близкой к точке росы, как, например, в гигрометре Крова. В такой конструкции зеркальце расположено в камере, теплоизолированной от окружающей среды стенки которой охлаждаются тем же холодильником, что и зеркальце.

При выполнении этого условия исключается также погрешность за счет температурного градиента в теле металлического зеркальца, которая в противном случае по аналогичному расчету [16] для λ красной меди, $T_в - T_p = 20^\circ \text{С}$ и толщине 0,8 мм может достигать $0,01^\circ \text{С}$.

Прочие погрешности, связанные с теплофизическими процессами, рассматриваются подробно в термометрии [17]. К ним относятся погрешности измерения температуры при стационарном режиме за счет неудачного расположения термочувствительного элемента, теплопритока через токопроводы, нагрева измерительным током, качества градуировки, нестабильности, а также погрешности измерительной схемы. Благодаря стационарности теплового режима исключаются ошибки измерения температуры, проанализированные в [18].

Таким образом, рассмотрены физические процессы, способные оказать влияние на погрешность. Следует лишь отметить, что здесь не оценивалась погрешность за счет снижения давления над зеркальцем гигрометра в случае принудительной аспирации, поскольку при использовании гигрометра в комплексе с термогигростатом зеркальце находится в потоке, вызываемом циркуляцией. При необходимости на этот эффект может быть введена поправка, рассчитываемая по формуле (27).

Результаты анализа рассмотренных процессов и оценок погрешностей можно кратко представить в виде таблицы. Предполагается, что на неуказанные в таблице эффекты вводятся поправки (табл. 3).

Указанные в табл. 4 предельные значения погрешностей по точке росы соответствуют наибольшим из относительных погрешностей по упругости и рассчитаны по формуле (3). Эти погрешности являются систематическими, хотя в зависимости от условий меняют свой знак и величину. При необходимости они могут быть существенно снижены. Например, для уменьшения погрешности 1 (табл. 3) следует увеличить время насыщения, а для уменьшения погрешности гигрометра 7 до пренебрежимо малой величины применить гигрометр рекомендованной конструкции и т. д.

Таблица 3

Источник погрешности	Термогигростат	Гигрометр
1. Экспоненциальный характер приближения упругости к равновесному значению	$\pm 0,05\%$	—
2. Неполное равновесие между паром и конденсатом, выражающееся в изменении фотосигнала	—	$\pm 0,1\%$
3. Эффект Кельвина	—	$-0,01\%$
4. Эффект Рауля	0%	$+0,04\%$
5. Отличие давления в области измерения от давления вне ее	$\pm 0,04\%$	—
6. Диффузионный поток за счет негерметичности	$+0,03\%$	—
7. Отличие точки росы от температуры воздуха	—	$-0,2\%$

Таблица 4

Вид погрешности	Термогигростат	Гигрометр
По упругости	$+0,12\%$ $-0,09\%$	$+0,14\%$ $-0,31\%$
По точке росы при разных температурах точки росы:		
$T_p = +30^\circ \text{C}$	$+0,021^\circ \text{C}$	$-0,056^\circ \text{C}$
$T_p = -43^\circ \text{C}$	$+0,011^\circ \text{C}$	$-0,028^\circ \text{C}$

При исключении систематических погрешностей в измерении температуры в сатураторе и температуры зеркала гигрометра критерием отсутствия неучитываемых погрешностей является превышение в серии отсчетов средним значением разности относительных погрешностей по термогигростату и гигрометру значения $+0,12\%$ — $(-0,31\%) = 0,43\%$, что соответствует среднему расхождению по точке росы $0,077^\circ \text{C}$ при $T_p = +30^\circ \text{C}$ и $0,039^\circ \text{C}$ при $T_p = -43^\circ \text{C}$. Последнее значение намного меньше значения расхождения, которое могло бы возникнуть за счет неопределенности фазы конденсата на зеркальце.

Если максимальная погрешность измерения температуры не превышает, например, $0,09^\circ \text{C}$ (что не является пределом), то максимальная погрешность задания точки росы по термогигростату составит $0,111^\circ \text{C}$, что соответствует относительной погрешности по упругости $0,62\%$ при $+30^\circ \text{C}$ и $1,2\%$ при -43°C . Эти результаты не хуже, чем достигаемые «генератором влажности», основанном на методе двух давлений и используемом в качестве вторичного эталона [4].

Погрешность воспроизведения относительной влажности зависит еще от погрешности определения температуры в тест-камере.

Значительные резервы уменьшения погрешностей гигрометрического комплекса и абсолютность используемого метода, основанного на термодинамическом принципе, обеспечивают указанную в начале статьи возможность использования его в качестве исходного образцового измерительного средства, а при наличии в метрологической службе эталона влажности — как непосредственно ему подчиненного образцового измерительного средства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратьев К. Я., Тимофеев Ю. М. Термическое зондирование атмосферы со спутников. Л., Гидрометеиздат, 1970.
2. Монин А. С. Прогноз погоды как задача физики. М., «Наука», 1969.
3. Ридер А. Е. Точность измерений. — В кн.: «Информационные материалы по гидрометеоприборам и методам наблюдений», № 44. М., Гидрометеиздат, 1970.
4. Wexler A. Calibration of humidity measuring instruments of the National Bureau of Standards. — ISA Trans., 1968, v. 7, No. 4.
5. Фатеев Н. П., Резников Г. П., Роголев Ю. В. Реализация абсолютного метода создания заданного уровня влажности и его измерения. — Труды ГГО, 1971, вып. 260.
6. Резников Г. П., Фатеев Н. П. Использование абсолютных методов измерений для передачи размеров единиц метеорологических величин на сеть. — Труды ГГО, 1972, вып. 280.
7. Васильев Л. Л., Конев С. В. Тепло- и массообмен в тепловых трубках. — В кн.: «Тепло- и массообмен при низких температурах». Минск, «Наука и техника», 1970.
8. Харрисон Л. П. Основные понятия и определения, относящиеся к влажности. Влажность, т. III. Материалы международного симпозиума по влагометрии. Вашингтон, 1963. Пер. с англ. Под ред. Л. Т. Матвеева. Л., Гидрометеиздат, 1969.
9. Харрисон Л. П. Прибор, основанный на принципе термодинамической температуры смоченного термометра как предела, достигнутого в процессе насыщения. Влажность, т. I. Материалы международного симпозиума по влагометрии. Вашингтон, 1963. Пер. с англ. Под ред. Л. Т. Матвеева. Л., Гидрометеиздат, 1967.
10. Уайли Р. Дж., Дэвис Д. К., Коэ У. А. Основные процессы в гигрометре точки росы. Влажность, т. I. Материалы международного симпозиума по влагометрии. Вашингтон, 1963. Пер. с англ. Под ред. Л. Т. Матвеева. Л., Гидрометеиздат, 1967.
11. Matsumura Akira, Kawamoto Kyoji, Takahashi Higoroshi. Development of a thermoelectric-cooled dew-point hygrometer for low humidity measurement. — Sumitomo Electr. Techn. Rev., 1968, No. 11.
12. Cole K. M., Reger J. A. A precision humidity analysis. — ISA Trans., 1970, v. 9, No. 1.
13. Тимофеев Д. П. Кинетика адсорбции. М., Изд-во АН СССР, 1962.
14. Тверской П. Н. Курс метеорологии. Л., Гидрометеиздат, 1962.
15. Харрисон Л. П. Неидеальные газы. Влажность, т. III. Материалы международного симпозиума по влагометрии. Вашингтон, 1963. Пер. с англ. под ред. Л. Т. Матвеева. Л., Гидрометеиздат, 1969.
16. Усольцев В. А. Автоматический гигрометр точки росы. — Труды НИИ ГМП, 1958, вып. 6.
17. Попов М. М. Термометрия и калориметрия. М., Изд. МГУ, 1954.
18. Двас В. С. Анализ погрешностей и методика измерений точки росы. — Труды ГГО, 1964, вып. 150.
19. Norihito Fukuta. Experimental studies on the growth of small ice crystals. J. Atmospher. Sci. 1969, v. 22, No. 3.

К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА СТАНЦИОННЫМ ПСИХРОМЕТРОМ

Как известно, одной из основных погрешностей психрометра, применяемого на метеорологических станциях, является инструментальная погрешность, которая в основном и ограничивает область применения психрометрического метода на сети. Эта погрешность обусловлена прежде всего инструментальной погрешностью термометров (сухого и смоченного). Она складывается из погрешности определения поправок (максимальная до $\pm 0,05^\circ\text{C}$), дискретности отсчетов ($0,1^\circ\text{C}$), которая обуславливает максимальную погрешность также до $\pm 0,05^\circ\text{C}$, и погрешности округления поправок при переходе от поправок «при» к поправкам «от—до» [1]. Максимальная величина этой погрешности также составляет $\pm 0,05^\circ\text{C}$. Погрешность определения поправок $\pm 0,05^\circ\text{C}$ обеспечивается допуском на отличие поправок при повторной поверке от определенных ранее на величину не более $0,10^\circ\text{C}$ при одинаковой точности первой и второй поверок. В сумме все три погрешности обуславливают наиболее вероятную максимальную погрешность психрометрического термометра, равную $0,05\sqrt{3} = 0,09^\circ\text{C}$. Абсолютный максимум погрешности, равный $0,15^\circ\text{C}$, может иметь место только в том случае, если отсчет с наибольшей погрешностью от дискретности совпадает со значением температуры, при котором изменяется поправка, и в этой же точке шкалы поправка определена с наибольшей погрешностью. Очевидно, что такое совпадение крайне маловероятно и максимум может иметь место в 1—2 точках шкалы.

Считая инструментальную погрешность смоченного термометра такой же, как и сухого термометра (наиболее вероятная максимальная погрешность $0,09^\circ\text{C}$), оценим погрешности определения упругости водяного пара, относительной влажности и температуры точки росы—эти характеристики наиболее широко используются в метеорологии и в инженерных расчетах. Оценку можно получить, дифференцируя расчетную формулу для определения упругости водяного пара (психрометрическую формулу)

$$e = E' - Ap(t - t') \quad (1)$$

(e — упругость водяного пара, E' — упругость водяного пара при насыщении при температуре t' , t и t' — температура воздуха и смоченного термометра соответственно, A — психрометрический коэффициент (психрометрическая постоянная), p — атмосферное давление) по t и по t' и заменяя дифференциалы конечными приращениями (погрешностями) Δt и $\Delta t'$:

$$\Delta_1 e = \frac{dE'}{dt'} \Delta t' + A p \Delta t' + A p \Delta t. \quad (2)$$

Расчеты, выполненные по формуле (2), дают величины погрешностей определения упругости водяного пара, по которым могут быть рассчитаны погрешности относительной влажности ($\Delta_1 r$) и точки росы ($\Delta_1 \tau$) при заданной погрешности определения температуры сухого и смоченного термометров. Приведенные в табл. 1 результаты расчетов $\Delta_1 e$ и $\Delta_1 r$ выполнены для различных значений температуры смоченного термометра при погрешности $\Delta t = \Delta t' = 0,09^\circ \text{C}$. Погрешность $\Delta_1 \tau$ отнесена к тем значениям τ , которые имеют место при температурах точки росы, равных температуре смоченного термометра. Расчеты выполнены по таблицам упругости насыщения водяного пара, рекомендованным ВМО [2].

Таблица 1

При τ	$2Ap\Delta t$ мб	$\frac{dE'}{dt'} \Delta t$ мб	$\Delta_1 e$ мб	$\Delta_1 r = \frac{\Delta_1 e}{E} \cdot 100\%$	$\Delta_1 \tau$ °C
—15	0,14	0,01	0,15	7,9	0,96
—10	0,14	0,02	0,16	5,4	0,71
0	0,14	0,04	0,18	2,9	0,41
10	0,14	0,07	0,21	1,6	0,26
20	0,14	0,13	0,27	1,2	0,19
30	0,14	0,22	0,36	0,8	0,15

Как видно из табл. 1, погрешность определения упругости водяного пара $\Delta_1 e$ при понижении температуры ниже -10°C остается практически постоянной и определяется величиной погрешности термометров (членом $2Ap\Delta t$). Величина же упругости насыщения с понижением температуры ниже -10°C быстро убывает. Это приводит к быстрому росту погрешности определения относительной влажности ($\Delta_1 r$) и температуры точки росы. При температуре смоченного термометра ниже -10° , -15°C погрешность определения относительной влажности за счет только инструментальной погрешности психрометрических термометров становится уже такой же, как и погрешность определения влажности с помощью волосного гигрометра. Учитывая, что имеют место еще и другие погрешности психрометрического метода, влажность воздуха на сети при температуре воздуха ниже -10°C определяют с помощью волосного гигрометра [3]. Возможности применения психрометрического метода до температур -15 , -20°C ограничиваются инструментальной погрешностью прежде всего термометров психрометра: для

этих температур необходимы термометры, обеспечивающие измерение температуры с погрешностью не более $0,02^\circ\text{C}$.

Кроме инструментальной погрешности термометров, стационарный психрометр характеризуется еще рядом погрешностей, которые в практических вопросах измерения влажности воздуха имеют существенное значение. К такого рода погрешностям относится прежде всего погрешность, обусловленная непостоянством психометрического коэффициента A . В соответствии с видом формулы (1) погрешность определения e в зависимости от изменения психометрического коэффициента A на величину ΔA имеет вид

$$\Delta e_A = p(t - t') \Delta A. \quad (3)$$

Эта погрешность равна нулю при $t - t' = 0$ и линейно возрастает с увеличением психометрической разности.

Хорошо известны три фактора, существенно влияющие на величину психометрического коэффициента термометра A . Это прежде всего изменение A в зависимости от особенностей изготовления каждого образца термометра. При установившемся процессе испарения с поверхности батиста, покрывающего резервуар смоченного термометра, температура t' соответствует тепловому равновесию между затратами тепла на испарение и притоком тепла к резервуару смоченного термометра (к поверхности воды на батисте) из воздуха и по телу термометра (по оболочке и капилляру, температура которых близка к температуре воздуха). Различие в притоке тепла к резервуару смоченного термометра по наружной оболочке и капилляру зависит от различий в толщине стенок оболочек и капилляров термометров, сорта стекла, конфигурации сопряжения резервуара с цилиндрической оболочкой и других индивидуальных особенностей каждого образца и партии.

Специальные исследования различий в величине психометрических постоянных термометров для аспирационного психрометра показали, что для различных образцов, взятых из разных партий за последние 3—5 лет изготовления, психометрическая постоянная различается не более чем на $\pm 0,01A$.

Различия в величине A для стационарных психометрических термометров следует ожидать несколько меньшими, чем для аспирационных. В этом случае величина погрешности Δe будет равна

$$\Delta e \leq 0,01 \cdot 0,7947(t - t') = \begin{cases} 0 & \text{при } t - t' = 0, \\ 0,08 & \text{при } t - t' = 10^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (4)$$

При температуре воздуха $-5, -10^\circ\text{C}$ относительная влажность редко бывает ниже 40%; $(t - t')$ при этом не превышает 2°C . Погрешность Δe , обусловленная этим фактором, будет $\leq 0,02$ мб, что можно считать несущественным. Однако могут оказаться случаи, когда у отдельных образцов психометрических термометров вследствие определенных конструктивных особенностей величина психометрической постоянной может намного отличаться от принятого значения. Такие термометры достаточно сильно отличаются и по внешнему виду от стандартных как формой резервуара, так и

сопряжением резервуара с капилляром и оболочкой термометра. Такого рода нестандартные термометры не следует применять в качестве смоченных в психрометре.

К одной из существенных систематических погрешностей определения влажности воздуха психрометром приводит несовершенство существующих психрометрических таблиц, в которых не учитывается отличие психрометрической постоянной для льда от психрометрической постоянной для воды на резервуаре смоченного термометра. Различие в психрометрической постоянной A в формуле (1) для случая, когда на резервуаре смоченного термометра лед или вода, получается из теории психрометра, в основе которой лежит понятие адиабатического насыщения [4]. Экспериментальное подтверждение рассчитанных различий было получено Бруксом и Алленом [4], а также В. А. Усольцевым [16].

В соответствии с теоретическим расчетом изменения термодинамической температуры смоченного термометра в зависимости от влажности воздуха (отношения смеси) оказывается, что психрометрическая постоянная в (1), если в качестве t' брать термодинамическую температуру смоченного термометра (а не температуру, показываемую реальным смоченным термометром), зависит от теплоемкостей водяного пара (c_{pv}) и сухого воздуха (c_{pa}) при постоянном давлении, отношения смеси для насыщенного воздуха при температуре смоченного термометра (r_s) и удельной теплоты парообразования (конденсации) при температуре t' (L_w). Эта зависимость имеет вид

$$A^* = \frac{b(c_{pa} - r_s c_{pv})}{(b + r_s)[(b + r_s)L_w + (bc_{pw} - c_{pa})(t - t')]} \quad (5)$$

где b — отношение молекулярного веса водяного пара к молекулярному весу сухого воздуха $M_v/M_a = 0,62198$. Слагаемое $(bc_{pw} - c_{pa})(t - t') = 0,31$ кал/г даже при $t - t' = 10^\circ\text{C}$ мало по сравнению с $(b + r_s)L_w = 374,66$ кал/г. Поэтому с достаточной для всех практических расчетов степенью точности можно принимать вместо (5)

$$A^* = \frac{b(c_{pa} - r_s c_{pv})}{(b + r_s)^2 L_w} \quad (6)$$

Соответственно для льда на резервуаре смоченного термометра вместо r_s и L_w будут значения отношения смеси для насыщения по отношению ко льду и теплоты сублимации (испарения льда). Поэтому для льда психрометрическая постоянная $A^*_{\text{л}} = 0,88229A^*$.

Психрометрическая постоянная для реального смоченного термометра безусловно отличается от психрометрической постоянной A^* для термодинамической температуры смоченного термометра, так как теория адиабатического насыщения не учитывает ряд процессов, происходящих вблизи резервуара смоченного термометра, и прежде всего влияние вентиляции смоченного термометра. Однако психрометрическая постоянная реального смоченного термометра,

являясь функцией чисел Рейнольдса, Льюиса и других характеристик процессов тепло- и массообмена, пропорциональна термодинамической психрометрической постоянной, и различия последней для воды и для льда обуславливают такое же различие психрометрической постоянной реального смоченного термометра для воды и для льда. Поэтому следует считать необходимым в ближайшее время внести необходимые уточнения в психрометрические таблицы для вычисления характеристик влажности при отрицательных температурах, когда на резервуаре смоченного термометра будет замерзшая вода (лед). Данные же применявшихся до 1973 г. таблиц [5] для определения упругости водяного пара для случая льда на резервуаре смоченного термометра характеризуются погрешностью

$$\Delta_{\varepsilon} e = 0,118 A p (t - t') = \begin{cases} 0 & \text{при } t - t' = 0, \\ 0,09 & \text{при } t - t' = 1^{\circ} \text{C} (r = 56\%), \\ & \text{при } t = -10^{\circ} \text{C}. \end{cases} \quad (7)$$

Эта погрешность в величине упругости водяного пара соответствует погрешности $\Delta_{\varepsilon} t \approx 0,6^{\circ} \text{C}$ в температуре точки росы при $t = -10^{\circ} \text{C}$ и $\tau = -17^{\circ} \text{C}$; с уменьшением $(t - \tau)$ погрешность $\Delta_{\varepsilon} t \rightarrow 0$, убывая также и с повышением температуры.

Одной из хорошо известных систематических погрешностей стационарного психрометра является погрешность, связанная с изменением скорости вентиляции смоченного термометра. Вопросам исследования этой погрешности посвящено значительное число работ как отечественных, так и зарубежных. Достаточно напомнить, что экспериментальное определение погрешности стационарного психрометра в английской будке (пожалуй, одно из первых) было выполнено С. Д. Охлябининым летом 1911 г. [6]; в качестве контрольного прибора использовался аспирационный психрометр Ассмана. Одной из первых попыток определить поправки к стационарному психрометру на изменение скорости вентиляции следует считать работу А. А. Рождественского [7], основанную на серии трехлетних сравнительных наблюдений влажности воздуха по стационарному психрометру и аспирационному психрометру Ассмана в Павловске.

В работе Л. Ф. Щербаковой [8] было показано, что для введения поправок в показания смоченного термометра необходимо знать скорость ветра на высоте будки, осредненную непосредственно за 3—5-минутный интервал, оканчивающийся в момент отсчета смоченного термометра. Для определения скорости вентиляции смоченного термометра по скорости ветра вне будки для скоростей от 1 до 5 м/с можно считать, что скорость вентиляции составляет 0,32 скорости ветра. При уменьшении скорости до 2,5 м/с и менее отношение скорости вентиляции к скорости ветра увеличивается, что соответствует увеличению «проницаемости» будки ветром.

Приведем результаты зависимости скорости вентиляции смоченного термометра в будке от скорости ветра на высоте ее уста-

новки (2 м), полученные Л. Ф. Щербаковой и составленные в соответствии с табл. 4 работы [8]:

Скорость ветра на уровне будки, м/с	< 1 1,0—1,4 1,5—1,9 2,0—2,4 2,5—2,9 3,0—3,4 3,5—5,4							
Скорость вентиляции смоченного термометра, м/с	0,38	0,47	0,51	0,66	0,79	1,08	1,43	

Из этих данных можно определить скорость вентиляции смоченного термометра для стационарного психрометра при известной скорости ветра на высоте установки будки.

Следует отметить, что полученная зависимость является в значительной мере универсальной и можно ожидать сравнительно слабого изменения ее для различных климатических зон и условий защищенности станций, так как она связывает физические характеристики, между которыми имеет место функциональная зависимость. Эта зависимость определяется, очевидно, конструктивными параметрами психрометрической будки. Некоторое изменение ее можно ожидать с изменением турбулентности и в первую очередь ее термического фактора. Однако и здесь с увеличением турбулентности проницаемость будки будет уменьшаться, но это уменьшение будет компенсироваться развитием турбулентного перемешивания внутри будки и дополнительным обменом через дно.

Оценивая погрешность определения влажности воздуха по стационарному психрометру при малых скоростях ветра, Л. Ф. Щербакова [8] получила важный вывод о том, что в естественных условиях вследствие турбулентности атмосферы зависимость психрометрической постоянной реального смоченного термометра отличается от зависимости, полученной в лабораторных условиях Н. Н. Зворыкиным. Эти различия имеют существенное значение для скорости вентиляции термометра менее 0,5 м/с. Так, при скорости вентиляции смоченного термометра 0,2 м/с психрометрическая постоянная, по данным Л. Ф. Щербаковой, получается 0,00098 1/°C вместо 0,00114 1/°C, по графику Н. Н. Зворыкина. Меньшая зависимость психрометрической постоянной от скорости вентиляции смоченного термометра обуславливает и меньшие погрешности в определении упругости водяного пара, получающиеся при малых скоростях ветра на сети.

Экспериментальные данные, полученные Л. Ф. Щербаковой [8], показали, что при наблюдениях на защищенной метеорологической площадке с небольшими скоростями ветра, где в течение всего месяца (июль) 85% случаев приходилось на скорость вентиляции смоченного термометра в будке менее 0,6 м/с, средняя погрешность в величине упругости для этого месяца получилась +0,3 мм рт. ст., или +0,4 мб. Для всего летнего периода (200 случаев измерений) среднее расхождение в величине упругости по стационарному психрометру и аспирационному получилось +0,2 мм рт. ст., или +0,27 мб, что соответствует расхождению в значениях относитель-

ной влажности 1,7%. Для всех случаев, когда скорость вентиляции смоченного термометра была менее 0,2 м/с (19 случаев), расхождение в величине упругости водяного пара по стационарному психрометру и аспирационному составляло +0,6 мм рт. ст., или +0,8 мб; соответствующее расхождение в относительной влажности было равно +5% (для относительной влажности около 60%).

Величина погрешности в значении упругости водяного пара, вызванная отличием психрометрической постоянной от ее номинального значения на величину ΔA , может быть вычислена из формулы (3). В соответствии с результатами Л. Ф. Щербаковой при уменьшении скорости вентиляции смоченного термометра до 0,2 м/с величина A изменяется на $\Delta A = 0,00021$ 1/°C, что обуславливает погрешность в получаемых значениях e

$$\Delta_4 e = 0,21 (t - t') = \begin{cases} 0 & \text{при } t - t' = 0, \\ 0,21 & \text{при } t - t' = 1^\circ \text{C}. \end{cases} \quad (8)$$

При температуре 20°С и влажности 70% ($t - t'$) равна примерно 3°С, а $\Delta_4 e$ в этом случае 0,69 мб, что соответствует погрешности в значении относительной влажности $\Delta_4 r = 4\%$. Эта оценка хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными Л. Ф. Щербаковой. Соответствующая погрешность в значении точки росы при этом будет $\Delta_4 \tau = 0,7^\circ \text{C}$. При повышении относительной влажности погрешности $\Delta_4 \tau$ и $\Delta_4 r$ будут убывать до нуля вместе с погрешностью $\Delta_4 e$ при влажности 100%. С понижением температуры погрешность $\Delta_4 e$ остается постоянной для одного и того же значения психрометрической разности ($t - t'$). Однако психрометрическая разность для одного и того же значения относительной влажности с понижением температуры быстро убывает, что приводит к значительно более медленному возрастанию погрешности $\Delta_4 \tau$. Так, при $r = 70\%$ погрешность в значении точки росы при температуре +10°С за счет уменьшения вентиляции смоченного термометра до 0,2 м/с будет равна 0,8°С, при $t = 0^\circ \text{C}$ $\Delta_4 \tau = 0,9^\circ \text{C}$, а при $t = -10^\circ \text{C}$ $\Delta_4 \tau = 1,0^\circ \text{C}$, т. е. практически имеет место линейный рост $\Delta_4 \tau$ на 0,1°С с уменьшением температуры на 10°С.

Кроме инструментальных погрешностей термометров и погрешностей, обусловленных изменением психрометрической постоянной, результаты определения влажности по стационарному психрометру могут отличаться от действительных вследствие турбулентных флуктуаций температуры сухого и смоченного термометров, а также за счет перегрева (или выхолаживания) воздуха в психрометрической будке. Вопросы осреднения короткопериодных флуктуаций температуры инерционными термометрами и психрометрической будкой рассматривались в ряде работ, как экспериментальных, так и теоретических [9—12].

Результаты выполненных исследований показывают, что при осреднении измеряемого параметра за достаточный интервал времени среднее значение является детерминированной величиной, не зависящей от амплитуды и спектра турбулентных флуктуаций. При

измерениях в приземном слое атмосферы для осреднения турбулентных флуктуаций температуры, влажности и ветра в качестве достаточного интервала осреднения во времени следует принять 15—20 минут [13]. Психрометрический термометр, установленный в будке, за счет своей инерции и инерции будки обеспечивает осреднение во времени за интервал 7—8 минут. Для большинства случаев (для слабой и умеренно развитой турбулентности) этот интервал осреднения является достаточным. При сильно развитой турбулентности могут иметь место погрешности в определении температур сухого и смоченного термометров (отклонения от осредненных значений). Однако отклонения сравнительно невелики (0,2—0,3°С) [11] и вследствие высокой корреляции флуктуаций сухого и смоченного термометров эти флуктуации оставляют практически постоянной психрометрическую разность [12]. В соответствии с этим погрешность определения упругости водяного пара следует рассчитывать по формуле (2), учитывая только погрешность первого члена $\left(\frac{dE'}{dt'}\Delta t'\right)$. Увеличение погрешности Δe примерно на 30% за счет флуктуаций температуры смоченного термометра можно ожидать только при температурах 20—30°С, что соответствует дополнительной погрешности в определении температуры точки росы (около 0,05°) и относительной влажности ($<0,5\%$).

Перегрев или выхолаживание психрометрической будки вследствие недостаточной ее вентиляции не приводит к изменению точки росы (если при выхолаживании не происходит конденсации водяного пара), так как эти процессы происходят изобарически. Следовательно, значения упругости водяного пара, полученные по измерениям в перегретой будке, будут такими же, как и при измерениях в неискаженных температурных условиях. Дополнительная погрешность при нагревании будки будет иметь место только в значениях относительной влажности. Величина этой погрешности в соответствии с формулой для вычисления относительной влажности имеет вид

$$\Delta r = -r \frac{1}{E} \frac{dE}{dt} \Delta t, \quad (9)$$

где E — упругость насыщения при температуре воздуха $t^\circ\text{C}$, Δt — отличие температуры воздуха в будке от фактической температуры воздуха.

В случае, если Δt не слишком мало и на этом интервале изменения температуры необходимо учитывать изменение dE/dt , формулу (9) следует проинтегрировать от t до $t+\Delta t$. Такое уточнение определения Δr целесообразно только для случая введения поправки в величину r , когда точно известно Δt . Если же при сравнении двух приборов ограничиваться значениями упругости водяного пара или точки росы, то учитывать отличие температуры воздуха в будке от фактической температуры воздуха нет необходимости.

Таким образом, анализ погрешностей определения характеристик влажности воздуха по стационарному психрометру показывает,

что основными погрешностями в определении упругости водяного пара и температуры точки росы являются инструментальные погрешности термометров, неучет зависимости психрометрической постоянной от скорости вентиляции смоченного термометра, а также неучет различий в величине психрометрической постоянной для воды и для льда в психрометрических таблицах издания 1972 г.¹ Инструментальная погрешность термометров определяет область применения психрометрического метода измерения влажности воздуха. Изменение психрометрической постоянной в зависимости от скорости вентиляции смоченного термометра можно было бы учитывать, если поставить специальные измерения скорости ветра на высоте будки (2 м) или создать в будке искусственную вентиляцию. Разные значения психрометрической постоянной для воды и для льда, по-видимому, необходимо учесть в новом издании психрометрических таблиц.

При сличении новых приборов для измерения влажности воздуха с существующим стационарным психрометром следует иметь в виду эти систематические погрешности стационарного психрометра и исключать из анализа случаи измерения при скоростях ветра менее 1 м/с, а также при отрицательных температурах, когда на резервуаре (на батисте) смоченного термометра находится замерзшая вода (лед). При детальном анализе этих данных можно рекомендовать вводить поправку в показания стационарного психрометра в соответствии с формулой (9). Погрешности, связанные с турбулентными флуктуациями влажности, быстро убывают при увеличении числа измерений и, как показывает многолетняя практика критического контроля качества данных по влажности воздуха [14], не имеют значения для месячных и декадных средних. Принятый в [14] допуск на расхождение измеренных и интерполированных значений упругости водяного пара для сети станций, равный 0,5 мб, включает и погрешности в нормах на станциях, по которым проводится интерполирование, и достаточно хорошо согласуется с приведенными оценками погрешностей стационарного психрометра.

Приведенные здесь оценки погрешностей определения характеристик влажности воздуха согласуются также с последними оценками расхождений в показаниях двух психрометров гидрометеорологической службы Канады, опубликованными в докладах комиссии по приборам и методам наблюдений ВМО [15].

¹ Последняя погрешность исправлена в новом издании психрометрических таблиц (Л., Гидрометеониздат, 1972).

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по поверке метеорологических приборов. Л., Гидрометеоиздат, 1967.
2. Матвеев Л. Т., Быкова Л. П. Таблицы значений упругости насыщения водяного пара над водой и над льдом. — Труды ГГО, 1967, вып. 202.
3. Наставление гидрометстанциям и постам, вып. 3, ч. 1. Л., Гидрометеоиздат, 1969.
4. Харрисон Л. П. Некоторые основные вопросы теории измерения влажности. Влажность, т. III. Материалы международного симпозиума по влагометрии. Вашингтон, 1963. Пер. с англ. под ред. Л. Т. Матвеева, Л., Гидрометеоиздат, 1969.
5. Психрометрические таблицы. Л., Гидрометеоиздат, 1957.
6. Охлябинин С. Д. Сравнение английских будок различных вариантов с психрометром Ассмана. — Изв. АН. Сер. 6, 1912, т. 6, № 2.
7. Рождественский А. А. Об ошибках измерения влажности воздуха по психрометру в английской будке. — Метеорологический вестник, 1926, № 10.
8. Щербакова Л. Ф. Скорости движения воздуха внутри психрометрической будки и их влияние на точность измерения влажности. — Труды НИУ ГУТМС. Сер. 1, 1946, вып. 23.
9. Лебедева К. Д., Смирнов С. А. Погрешности метода измерения температуры и влажности воздуха психрометрическими термометрами в будке. — Труды ГГО, 1951, вып. 25 (87).
10. Беспалов Д. П. Точность измерения температуры и влажности воздуха и перспективы ее повышения. — Труды ГГО, 1956, вып. 61 (123).
11. Брагинская Э. Л. Вопросы репрезентативности данных инерционных приборов. — Труды симпозиума по применению статистических методов в метеорологии. Л., Гидрометеоиздат, 1970.
12. Тэйлор Р. Дж. Реакция психрометра на изменение давления пара. — В кн.: «Влажность, принципы и методы измерения влажности в газах». Т. 1. Пер. с англ. под ред. А. Ф. Гудковского. Л., Гидрометеоиздат, 1967.
13. Чжоу Мин-юй. Оптимальные периоды осреднения при измерениях метеорологических полей. — Изв. АН СССР. Физика океана и атмосферы, 1966, т. 2, № 5.
14. Руководство по первичной обработке материалов метеорологических наблюдений. Л., Гидрометеоиздат, 1957.
15. Wiggins W. L. A study of the relative accuracy of two psychrometers. Preliminary report of the CIMO. WMO, 1970.
16. Усольцев В. А. О величине психрометрического коэффициента аспирационного психрометра. — Труды НИИГМП, 1969, вып. 22.

НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ ОБЛАКОВ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЕ К МЕТОДИКЕ ИЗМЕРЕНИЙ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ

Быстро развивающийся воздушный транспорт предъявляет повышенные требования к качеству оперативного метеорологического обслуживания и ставит задачу оптимального учета полей всех метеорологических элементов. В этой связи возрастает значение количественного учета опасных явлений погоды, в том числе опасных высот нижней границы облаков (ВНГО).

Неустойчивость ВНГО во времени и пространстве, возможное сочетание нескольких слоев облачности и погрешности измерений нередко приводят к тому, что разница между единичными измерениями ВНГО превышает 100%. Это приводит к необходимости увеличивать число измерений, отбраковывать нерепрезентативные и для облегчения анализа состояния ВНГО и оценки тенденции ее изменения вычислять средние значения. Существенным при этом является вопрос о количестве измерений и интервале осреднения, так как коэффициент корреляции быстро уменьшается во времени и пространстве.

Изменчивость поля облачности в предположении его изотропности можно описать при помощи структурных и корреляционных функций. Статистическое исследование пространственно-временной структуры поля облачности позволяет оценить ошибки осреднения и обосновать методику наблюдений. Изучению структуры поля высоты облаков посвящено много работ, но сравнение и использование результатов исследований часто затруднительно вследствие разных временных интервалов, диапазонов исследуемых высот и разницы в исследуемых характеристиках. Существенные результаты в исследовании зависимости высоты облаков от времени, расстояния, средней высоты и других факторов получены в работах М. В. Рубинштейна [12, 13]. На большом статистическом материале им установлено, что относительная средняя абсолютная изменчивость ВНГО за 15 мин в слое от 60 до 240 м равна примерно 10%. В этих работах, как и в [8], указывается о наличии волновых коле-

баний нижней границы облачности с периодом 8—10 мин и амплитудой 15—25 м.

Пространственно-временная изменчивость ВНГО и репрезентативность измерений рассматривается в [15]. Статистическая обработка измерений высоты облаков в аэропорту Ливерпуль показала, что разница между результатами измерений двумя приборами, установленными на расстоянии 3 км, равна 96 м, причем в 10-минутный период времени $H_1 < 0,5H_2$ в 27% случаев при $H_2 = 30$ м и в 10% случаев при $H_2 = 200$ м. Отсюда делается вывод, что наблюдения в одной точке могут быть совершенно нерепрезентативными для точки, расположенной в 3 км, и выбор места установки датчиков имеет большое значение для применения данных.

Вопросы точности определения среднего значения ВНГО в зависимости от числа отсчетов по одному датчику и от периода осреднения исследуются в [1 и 8]. К. Г. Абрамович пришла к выводу, что удовлетворительное осреднение за 30 мин можно получить по 7, 4 или 3 измерениям соответственно через 5, 10 или 15 мин. Сравнивая осредненные таким образом высоты со средней высотой, полученной по ежеминутным наблюдениям, она нашла, что в 85—93% случаев расхождение не превышает 5 м и в 50% случаев — 3 м. Средние высоты облаков, как и при исследовании изменчивости ВНГО во времени, в работе, к сожалению, не указаны.

В. С. Кожарин [8] подразделяет колебания ВНГО на случайные, систематические и периодические. На большом статистическом материале он установил, что устойчивое среднее значение ВНГО может быть получено по трем и более 10-минутным периодам осреднения. Сравнивая далее средние высоты, можно выявить систематические изменения высоты облаков, скорость которых для интервалов времени до 1 часа обычно не превышает 2,4 м/мин.

Вопросам детального изучения структурных функций ВНГО посвящены работы С. Н. Каплан [4—6], в которых были получены структурные и корреляционные функции для интервала времени 1—72 часа и диапазонов высот 0—200, 0—400, 0—1500 м. Используя их, С. Н. Каплан рассчитала средние квадратические ошибки интерполяции и экстраполяции ВНГО в указанных диапазонах.

Отмечая большую важность этих работ, необходимо указать, что еще недостаточно изучена связь изменчивости ВНГО во времени и пространстве со средней высотой, а также связь ошибок измерения с высотой, количеством приборов и измерений. Эти вопросы и являются предметом рассмотрения данной статьи.

1. Структурные и корреляционные функции ВНГО

Материалами для расчета временных структурных функций в интервале 1—60 минут послужили наблюдения ВНГО в диапазонах высот 0—150, 150—300, 220—260, 0—400, 450—600 и 700—1000 м. В исследуемом ряду в общей сложности около 200 тыс. наблюдений, которые проводились на территории ЕТС прибором «Облако». Значительная часть материалов была получена из [12, 13].

Расчеты структурных функций $b_0(\tau, H)$ в зависимости от характера используемого материала производились по формулам:

$$b_0(\tau, H) = \overline{[H(T) - H(T + \tau)]^2}, \quad (1)$$

$$b_0(\tau, H) = \sum_{i=1}^n \Delta H_i^2(\tau) P_i, \quad (2)$$

где

$$\Delta H_i(\tau) = \overline{[H(T) - H(T + \tau)]}, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1, \quad (4)$$

$\Delta H_i(\tau)$ — абсолютная изменчивость ВНГО за время τ в градации i разностей высот, P_i — вероятность изменчивости $\Delta H_i(\tau)$.

Возможность применения для расчета структурных функций формулы (1), особенно для небольших интервалов времени, показана в [4]. В правомерности применения формулы (2) можно убедиться, если оценить возможные погрешности расчета.

Известно, что средние квадратические погрешности обычно больше средних арифметических и разница между ними может достигать 25%. Так как вычисляются квадраты этих величин, то, если бы число градаций $n=1$, ошибка в расчетах $b_0(\tau, H)$ по формуле (2) могла бы доходить до 36%. Поскольку для каждого интервала времени имеется 13 градаций, возможная погрешность расчета по (2) уменьшается и не превышает 3%.

Погрешности в эмпирических структурных функциях возникают также за счет недостаточной длины ряда наблюдений в периоде T для соответствующего τ . В нашем случае отношение τ/T не больше 0,03, а число выборок не меньше 15. Из [3] следует, что при этих условиях относительная погрешность структурных функций не превышает 1—2%.

Структурные функции $b(\tau, H)$ в работе не приводятся, так как их анализ и практическое использование представляют значительную трудность вследствие того, что, например, в диапазонах высот 0—200 и 0—1500 м их значения при одинаковых τ отличаются почти на два порядка. Нормированные по квадрату высоты временные структурные функции $B_0(\tau)$ почти не зависят от высоты и позволяют делать выводы об изменчивости всей совокупности облаков нижнего яруса:

$$B_0(\tau) = \frac{b_0(\tau, H)}{\overline{H^2}}, \quad (5)$$

где $\overline{H}$ — средняя высота слоя облаков, для которого вычислялась $b_0(\tau, H)$.

На рис. 1 представлены результаты расчета по (5) нормированных функций $B_0(\tau)$ по сезонам для слоев 0—400 и 0—1500 м по значениям $b_0(\tau, H)$ из [6], а на рис. 2 — среднегодовая $B_0(\tau)$, получен-

ная по нашим данным и по данным $b_0(\tau, H)$ из [6]. Не совсем точное совпадение кривых для разных слоев на рис. 1 вызвано, очевидно, ошибками наблюдений и ошибками определения $b_0(\tau, H)$, оценка которых произведена в [6], а также колебаниями $\overline{H}$. Норми-

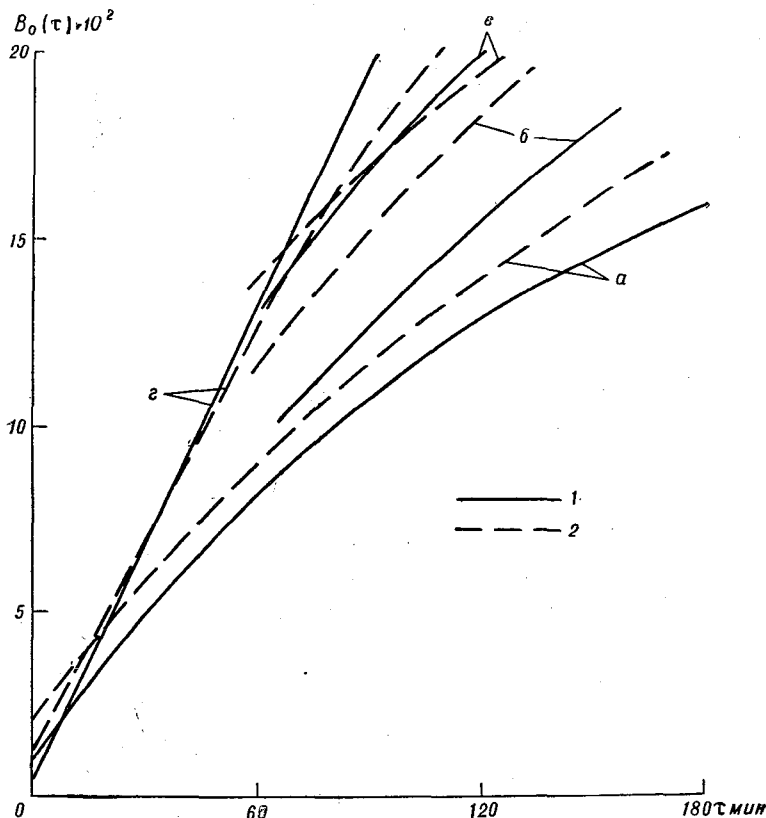


Рис. 1. Временная структурная функция ВНГО $B_0(\tau)$.

а) зима, б) осень, в) весна, г) лето; 1) 0—1500 м, 2) 0—400 м.

рование производилось по постоянным значениям средней высоты, соответственно 175 и 615 м. При этом важно, что совпадает угол наклона кривых в пределах сезона (рис. 1) или года (рис. 2), так как его величиной и определяется изменчивость ВНГО. Экстраполируя структурную функцию на нулевое время, находим удвоенную дисперсию ошибки наблюдений $2\sigma_H^2$ [2].

До времени 1,5—2 часа нормированные структурные функции хорошо аппроксимируются формулами:

$$B_0(\tau) = B(0) + B(\tau), \quad (6)$$

$$B(\tau) = A\tau, \quad (7)$$

где $B(0) = 2\sigma_H^2$. Среднегодовая относительная ошибка измерения ВНГО прибором «Облако» σ_H , равная 3%, найдена по кривой 1 (рис. 2). Коэффициент A равен 8, 12, 16 мин⁻¹ · (%)² соответственно для зимы, года и лета; τ — время в минутах.

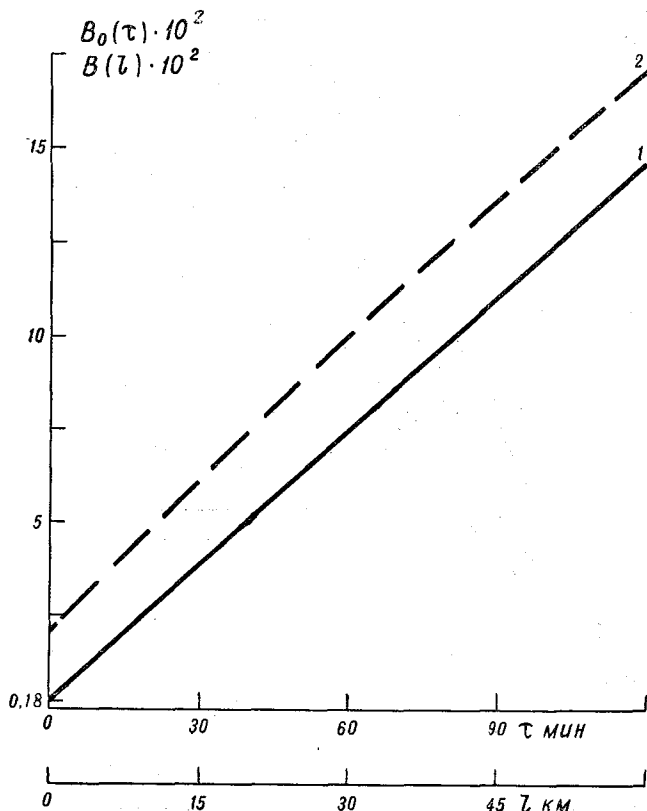


Рис. 2. Среднегодовая структурная функция ВНГО.

1 — $B_0(\tau)$ по измерениям прибором «Облако», 2 — $B_0(\tau)$ по данным $b_0(\tau, H)$ из [6] для слоев 0–200, 0–400 и 0–1500 м.

Нормированная корреляционная функция $r(\tau)$ в соответствии с ее определением в [2] вычислялась по формуле

$$r(\tau) = 1 - \frac{B(\tau)}{2\epsilon^2}, \quad (8)$$

где $2\epsilon^2$ — удвоенная дисперсия ВНГО для $\tau \rightarrow \infty$. Ее значения получены из [6].

До $\tau = 1 \div 2$ часа удобно использовать эмпирическую формулу

$$r(\tau) = 1 - C\tau, \quad (9)$$

где τ — время в мин; коэффициент C для зимы, года и лета равен $1,9 \cdot 10^{-3}$, $2,2 \cdot 10^{-3}$, $2,7 \cdot 10^{-3}$ мин⁻¹.

Структурная функция изменчивости ВНГО в зависимости от расстояния $B(l)$ нами не получена, но для решения многих практических задач с достаточно высокой точностью можно использовать $B(l)$, найденную исходя из $B(\tau)$ и средней скорости движения облаков. Действительно, временная изменчивость ВНГО до $\tau=1\div 2$ часа вызвана в основном перемещением облачности. Для однородной и изотропной атмосферы это допущение может соблюдаться довольно точно. Отметим, что суточный ход сказывается на структурной функции только летом, начиная с 8—9 час [6].

Средняя скорость движения облаков нижнего яруса зависит в основном от широты места и для средних широт северного полушария (60° с. ш.) равна примерно 25, 30 и 35 км/час соответственно для лета, года и зимы. Эти значения найдены путем обработки результатов [16]. Таким образом, в рамках сделанных допущений среднегодовой структурной функции, например, для одного часа будут соответствовать пространственные функции $B(l)$ и $r(l)$ для расстояния 30 км (рис. 2):

$$B(l)=Dl, \quad (10)$$

$$r(l)=1-Ql, \quad (11)$$

где коэффициент D равен 14, 24, 38 км⁻¹·(%)² соответственно для зимы, года и лета; Q равен $3,6\cdot 10^{-3}$, $4,4\cdot 10^{-3}$, $6,0\cdot 10^{-3}$ км⁻¹ для зимы, года и лета. Как видно из (10) и (11), пространственная структурная функция при фиксированном расстоянии для зимы почти в три раза меньше, чем для лета.

Рассмотренные структурные функции являются основой для решения различных задач, в том числе для оценки погрешности интерполяции и вычисления средней величины ВНГО в зависимости от количества измерений и датчиков, времени и расстояния между ними, для обоснования рациональной методики измерений. Подобный подход использовался в исследованиях по рациональному размещению сети климатологических станций, обобщенных в работе Л. С. Гандина [2].

2. Погрешности интерполяции и осреднения ВНГО

Расчет средних квадратических ошибок интерполяции может быть произведен по методам линейной и оптимальной интерполяции. Рассматривая условия их применения к нашей задаче, остановимся на методе линейной интерполяции, так как:

- временные интервалы между измерениями и расстояния между датчиками невелики и коэффициент корреляции не менее 0,8;
- временные интервалы между измерениями равны, а датчики размещены примерно на одинаковых расстояниях;
- ошибки измерений по прибору «Облако» примерно равны и существенно меньше изменчивости ВНГО;
- имеется возможность браковать результаты нерепрезентативных наблюдений.

* В работе [2] отмечается, что, если соблюдены подобные условия, ошибка оптимального расчета среднего значения метеозлемента почти не отличается от ошибки простой замены этого среднего значения средним арифметическим, т. е. от ошибки линейной интерполяции на середину интервала.

Средний квадрат ошибки интерполяции на середину расстояния l между датчиками $E^2(l)$, в соответствии с [2], вычисляется по формуле

$$E^2(l) = B\left(\frac{l}{2}\right) - \frac{1}{4} B(l) + \frac{1}{2} \sigma_H^2. \quad (12)$$

В [2] приведены также формулы для расчета ошибки интерполяции на центр площадей треугольника и четырехугольника. Однако указывается, что количественные различия в расчетах по ним и по (12) невелики, поэтому в дальнейших расчетах нами применялась формула (12).

После подстановки в (12) формулы (10) средний квадрат ошибки пространственной интерполяции, непосредственно в процентах от высоты облаков, получим в виде

$$E^2(l) = Wl + \frac{1}{2} \sigma_H^2, \quad (13)$$

где коэффициент W равен 3,5, 6,0, 9,5 км⁻¹ · (%)² соответственно для зимы, года и лета.

Аналогично для среднего квадрата ошибки временной интерполяции

$$E^2(\tau) = V\tau + \frac{1}{2} \sigma_H^2, \quad (14)$$

где коэффициент V равен 2, 3, 4 мин⁻¹ · (%)² соответственно для зимы, года и лета.

Результаты расчета по (13) и (14) представлены на рис. 3. Среднегодовая ошибка интерполяции (определения средней) ВНГО равна 7, 10, 14, 19% соответственно для времени между измерениями 15, 30, 60, 120 мин или для расстояния между датчиками 7,5, 15, 30, 60 км и не может быть меньше значения $\sigma_H/\sqrt{2}$. В расчетах кривых использовано среднегодовое значение ошибки измерения, так как ее сезонные колебания незначительны и намного меньше изменчивости ВНГО. Ошибка временной интерполяции при фиксированных значениях τ летом примерно на 30% больше, чем зимой, а ошибка пространственной интерполяции при фиксированных значениях l летом на 50% больше, чем зимой. Разница между сезонными ошибками пространственной интерполяции больше потому, что временная изменчивость ВНГО зимой меньше несмотря на увеличение скорости движения облаков. При сравнении полученных результатов отметим, что погрешность временной интерполяции (кривые 2, 4) близка к полученной в [6] для диапазонов ВНГО 0—200 и 0—400 м, если их отнести к средней высоте.

Уменьшение времени между измерениями или расстояния между датчиками приводит к уменьшению ошибки, но средняя ВНГО будет неустойчива, так как при рассмотрении данных ежеми-

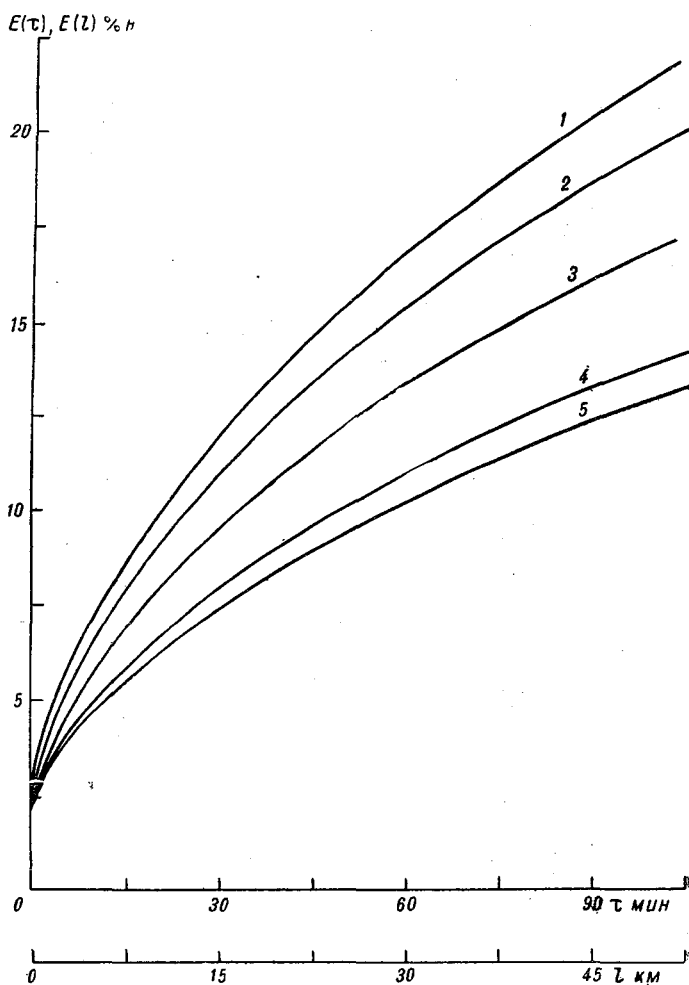


Рис. 3. Средняя квадратическая погрешность временной ($E(\tau)$) и пространственной ($E(l)$) интерполяции (средней арифметической) ВНГО на середину участка $\frac{\tau}{2}$, $\frac{l}{2}$.

$E(\tau)$: 2 — лето, 3 — год, 4 — зима; $E(l)$: 1 — лето, 3 — год, 5 — зима.

нутных измерений выявляются не только 8—10-минутные колебания, но и волновые колебания с периодом 0,5—3 мин, нередко с такой же амплитудой [7]. Увеличение числа измерений и времени осреднения, количества датчиков и площади осреднения, а также осуществление пространственно-временной интерполяции позволяют

получать устойчивую среднюю с высокой точностью и оценивать условия полета в зонах и на посадке в любой момент времени.

Разобьем время и площадь осреднения на элементарные участки. Будем считать, что время между измерениями не менее 1—2 минут, а расстояние между датчиками не менее 500—1000 м. Переходя от количества участков осреднения к числу измерений, получим уравнение для расчета среднего квадрата ошибки пространственно-временного осреднения:

$$E^2(\tau, l) = \frac{V\tau + Wl + \frac{1}{2}\sigma_H^2}{jk - 1}, \quad (15)$$

где j — количество измерений в интервале времени, k — число датчиков. В зависимости от схемы установки датчиков l — расстояние между первым и последним датчиками.

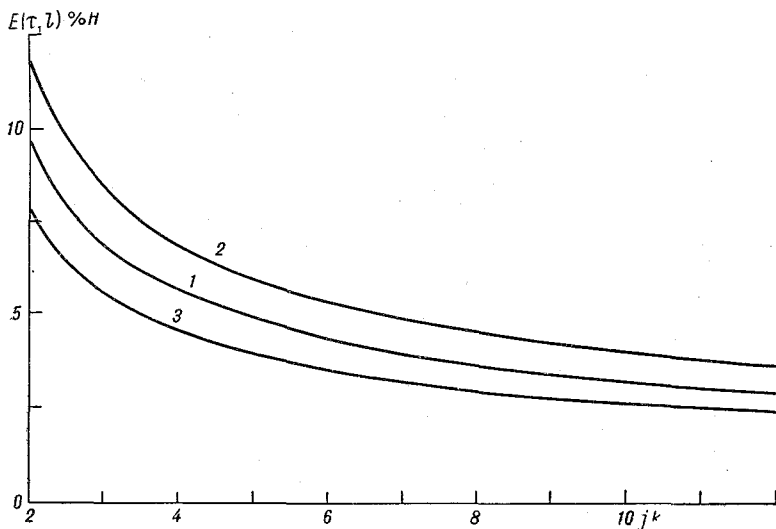


Рис. 4. Средняя квадратическая ошибка пространственно-временного осреднения ВНГО.

1 — год, $\tau=15$ мин, $l=7,5$ км; $\tau=30$, $l=0$; $\tau=0$, $l=15$; 2 — год, $\tau=30$, $l=7,5$; $\tau=15$, $l=15$; лето, $\tau=15$, $l=7,5$; 3 — зима, $\tau=15$, $l=7,5$.

Формулы (13) и (14) являются частными случаями пространственно-временной интерполяции по (15). Задавая, например, $\tau=30$ мин, $l=0$, $k=1$, $j=2$, найдем ошибку $E(\tau, 0)$ (рис. 4, кривая 1). При $\tau=15$ мин, $l=7,5$ км и $jk=4 \div 8$ ошибка определения средней ВНГО зимой и летом отличается от среднегодовой ошибки примерно на 1% H . Поэтому при дальнейшем анализе результатов, имея в виду относительно стабильную программу автоматической станции в течение года и стационарную установку датчиков, будем ориентироваться на среднегодовую ошибку осреднения. Учтем при этом, что хотя ошибка определения средней ВНГО зимой меньше,

однако облачность бывает обычно плотная, низкая и потому более опасная, чем летом.

Определение оптимальных параметров осреднения представляется достаточно сложной задачей, которая может быть предметом специальных исследований, поэтому коротко обсудим только некоторые вопросы, не претендуя на окончательное их решение.

3. Репрезентативность измерений ВНГО по экспериментальным данным. Анализ параметров осреднения

В авиации критерием ВНГО служит признак потери летчиком видимости горизонта. В общем верный, но субъективный критерий зависит в свою очередь от многих объективных причин, и некоторые из них часто трудно учесть. Это та же изменчивость ВНГО, зависящая от их высоты, формы, синоптического положения, сезона года и т. д., прозрачность атмосферы, время суток и освещенность, наличие и характер аэрозолей, скорость полета и особенности выполняемой летчиком задачи. Исследование этих вопросов далеко не закончено. Ошибка измерения облачности прибором зависит от ее структуры и высоты, стратификации атмосферы, сезона года и других причин. При этом бывает трудно сравнить результаты измерений ВНГО, получаемые с помощью приборов, различающихся по принципу действия и физическим характеристикам.

1. Сопоставление результатов измерений ВНГО наблюдателем и летчиком проведено М. В. Рубинштейном. По его данным можно заключить, что средняя абсолютная ошибка измерений нижней границы летчиком в диапазоне высот 150—220 м и при видимости более 6 км равна 12—13% высоты, а на высоте 220 м и при видимости 2 км достигает 30%.

Специально поставленный эксперимент показал, что имеется хорошее совпадение средних за 30 минут высот, полученных по результатам ежеминутных измерений прибором «Облако» ($\bar{H}_1$) и летчиком ($\bar{H}_2$). Высота $\bar{H}_2$ вычислялась по 20 измерениям, которые производились на высоте около 350 м и точно в тот момент, когда самолет находился над датчиком. Разность между $\bar{H}_1$ и $\bar{H}_2$ оказалась равной 1,5% средней высоты, в то время как среднее квадратическое отклонение от $\bar{H}$ результатов единичных измерений H_1 и H_2 примерно одинаково и равно 7,5%, что соответствует расчетам ошибки осреднения ВНГО по (15) — 1,7%, а суммарная средняя квадратическая ошибка сопоставления равна 10% и близка к оценкам М. В. Рубинштейна. Это лишний раз подтверждает достоверность найденной по структурной функции ошибки наблюдений и пригодность физического принципа измерения облачности светолокационными датчиками.

К. Г. Абрамович, исследуя точность осреднения ВНГО в слое 0—600 м над точкой, пришла к выводу, что удовлетворительное

осреднение за 30 минут можно получить по 7, 4 или 3 измерениям. Из рис. 1 (кривая 1) видно, что осреднение по 3 и 7 измерениям не идентично (ошибки соответственно 7 и 4% H).

2. Если рассматривать среднюю высоту облаков в качестве контрольной, датчики ВНГО будут контрольным групповым прибором, а самолет контролируемым. Как известно из метрологии, отношение погрешностей контрольного и контролируемого приборов должно быть не более 0,3 [9]. Примем среднюю квадратическую ошибку единичного измерения ВНГО летчиком равной 12% H , тогда максимальная допустимая ошибка $E(\tau, l) \leq 4\%$.

Как уже говорилось выше, устойчивую среднюю ВНГО можно получить в 30-минутном интервале осреднения. Этот вывод справедлив в том случае, если измерения производятся одним датчиком. Очевидно, что при установке двух-трех датчиков время осреднения может быть уменьшено до 10—15 мин. Максимальный период осреднения должен выбираться с таким расчетом, чтобы на момент осреднения ВНГО измеренная облачность смещалась относительно центра аэродрома не столь значительно, т. е. с учетом расстояний, на которых установлены датчики. Таким образом, задавая ошибку $E(\tau, l) \leq 4\% H$, расстояния $l = 15$ км и время $\tau = 15$ мин, из рис. 4 найдем значение $jk = 10$.

3. При измерении ВНГО автоматической станцией датчики включаются через определенные промежутки времени и не учитывается факт наличия облачности непосредственно над ними.

Как показывает анализ работы автоматической станции, даже десятибалльная облачность, особенно тонкая подынверсионная или образовавшаяся из приподнятого тумана, фиксируется не каждым измерением. Репрезентативность единичных измерений облачности 8—9 баллов, еще опасной для авиации, меньше, так как линейные размеры разрывов в ней колеблются от нескольких метров до нескольких сотен метров. В связи с этим время между отдельными измерениями должно быть не менее 1—2 минут, чтобы возможные разрывы в облаках успевали сместиться и ВНГО могла быть получена по следующему измерению. Требования к размещению датчиков аналогичные: расстояния между отдельными датчиками должны быть не менее 500—1000 м. Характерно, что эти выводы согласуются с условиями применения метода линейной интерполяции и условиями определения достаточно устойчивой средней по формуле (15).

Коэффициент захвата единичных измерений облачности 8—10 баллов автоматической станцией (f) получен по материалам синхронных визуальных наблюдений за 1971 г. в пос. Воейково. Учитывались только те дни, когда облачность менялась от 0 до 10 баллов. Расчет произведен по формуле

$$f = \frac{n}{m} \approx 0,6, \quad (16)$$

где n — количество случаев, когда высота облачности 8—10 баллов была измерена станцией; m — число случаев с облачностью 8—

10 баллов по визуальным наблюдениям. Для проверки значения f был вычислен коэффициент захвата $f_1=0,9$ облачности 10 баллов. Принимая далее для облачности 8 и 9 баллов соответственно коэффициенты 0,8 и 0,9, получаем значение $f=f_1f_2f_3=0,58$.

4. В реальных условиях работы автоматической станции неизбежны отказы датчиков. Это обстоятельство необходимо учитывать при составлении программы.

Сделаем поправку на вероятность безотказной работы P_0 и коэффициент готовности q . Расчет произведем по общеизвестным формулам:

$$P_0 = e^{-\frac{\bar{t}_{б.р}}{\bar{T}}}, \quad (17)$$

$$q = \frac{\bar{T}}{\bar{T} + \bar{t}_в}, \quad (18)$$

$$P = P_0 q, \quad (19)$$

где $\bar{T}$ — среднее время наработки датчика на один отказ, $\bar{t}_{б.р}$ — среднее время безотказной работы с вероятностью P_0 , $\bar{t}_в$ — время восстановления одной неисправности.

По испытаниям двух датчиков ВНГО «Облака» на надежность в режиме работы автоматической станции получено $\bar{T}=300$ часов. В общей сложности датчики наработали 7100 часов. Принимая $\bar{t}_{б.р}=15 \div 30$ мин, а $\bar{t}_в=24$ часа, получим значение вероятности безотказной работы датчика в течение каждого периода осреднения $P \approx 0,9$.

Общее количество измерений автоматической станции i с учетом введенных коэффициентов найдем из соотношения

$$i = \frac{jk}{fP} \approx 2jk. \quad (20)$$

Из (20) следует, что для обеспечения заданной точности измерения ВНГО автоматической станцией общее количество измерений должно быть в два раза больше, чем при наблюдениях за ВНГО в соответствии с методикой [11]. При заданных параметрах осреднения $jk=20$.

ВЫВОДЫ

1. Средние значения высоты нижней границы облаков в сочетании с минимальными значениями дают достаточно полную информацию о поле ВНГО. Их использование значительно облегчает анализ условий полета, оценку погоды между сроками наблюдений и повышает точность прогноза.

2. Нормированные по квадрату средней высоты временные и пространственные структурные функции ВНГО для зимы, года и лета описывают изменчивость ВНГО нижнего яруса в целом.

Пространственные структурные и корреляционные функции получены косвенным методом и требуют определенной проверки, хотя влияние погрешности их определения на окончательные результаты будет, вероятно, незначительным.

3. По структурной функции найдено, что относительная средняя квадратическая ошибка измерения ВНГО прибором «Облако» равна 3%.

4. Показано, что соблюдаются условия, при которых ошибка определения средней арифметической ВНГО почти не отличается от ошибки оптимального расчета.

5. Произведен расчет средних квадратических ошибок линейной интерполяции (определения средней арифметической) для зимы, года и лета в зависимости от времени и площади осреднения, количества измерений и датчиков.

6. При измерении ВНГО автоматическими станциями общее число измерений должно быть примерно в два раза больше, чем при наблюдениях по методике [11], а оптимальные параметры осреднения, вероятно, близки к следующим:

а) при полетах в сложных метеорологических условиях допустимая средняя квадратическая ошибка осреднения ВНГО составляет 4—5% H , время осреднения, предпочтительно «скользящего», 10—15 минут, радиус «площади осреднения» 6—8 км, число датчиков 3—4, количество измерений каждым датчиком 4—5;

б) при полетах в простых метеорологических условиях средняя квадратическая ошибка осреднения должна быть не более 8—10% H , время осреднения 30 минут, число датчиков 1—2, количество измерений каждым датчиком 3—4;

в) для повышения эффективности измерений время между ними должно быть не менее 1—2 минут, а расстояние между датчиками не менее 500—1000 м, но установку датчиков на реальной местности необходимо производить с учетом рельефа, макро- и микросиноптических особенностей района.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович К. Г. Об изменчивости высоты нижней границы облачности. — Метеорология и гидрология, 1968, № 5.

2. Гандин Л. С. О планировании сети климатологических станций. — Труды ГГО, 1968, вып. 228.

3. Бютнер Э. К. О вычислении структурных и корреляционных функций по конечному интервалу наблюдений. — Труды ГГО, 1963, вып. 144.

4. Каплан С. Н. О временной структуре облачности. — Труды ЛГМИ, 1967, вып. 31.

5. Каплан С. Н. О характеристиках временной структуры облачности. — Метеорология и гидрология, 1968, № 5.

6. Каплан С. Н. О временной структуре нижней границы облачности. — Труды ЛГМИ, 1968, вып. 34.

7. Волков Л. О. К вопросу об изменчивости нижней границы низкой облачности в нижнем 500-метровом слое атмосферы. — Труды ЦВГМО, 1971, вып. 1.

8. Кожарин В. С. О закономерностях колебаний высоты нижней границы облаков. — Метеорология и гидрология, 1967, № 6.

9. Маликов С. Ф., Тюрин Н. И. Введение в метрологию. М., Стандарт-издат, 1966.

10. Михель В. М. Изменчивость высоты нижней границы облаков нижнего яруса. — Труды ГГО, 1960, вып. 88.

11. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3, ч. 1. Л., Гидрометеиздат, 1969.

12. Рубинштейн М. В. О сравнимости высот нижней границы облаков, измеренных различными способами. — Труды ГМЦ, 1967, вып. 7.

13. Рубинштейн М. В. Некоторые характеристики изменчивости высоты нижней границы облаков. — Труды ГМЦ, 1967, вып. 13.

14. Честная И. И. О колебании высоты нижней границы слоистых облаков. — Труды ГГО, 1955, вып. 54.

15. Clarkson L. S. On the representativeness of measurements of height of low-cloud base at an airfield. — Met. Mag., 1970, No. 99.

16. Süring R. Die Wolken. Leipzig, 1936.

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ДЛЯ РАСЧЕТА ЕГО СОСТАВЛЯЮЩИХ

1. В качестве основного метода определения минутных значений вертикального турбулентного потока тепла L и затрат тепла на испарение V гидрометеорологическим станциям рекомендован метод теплового баланса [1]. При его использовании расчет L и V производится по формулам:

$$L = \frac{(B - P) \Delta t}{\Delta t + 1,56 \Delta e} \quad (1)$$

и

$$V = \frac{(B - P) \Delta e}{\Delta e + 0,64 \Delta t}, \quad (2)$$

где B и P — минутные значения радиационного баланса деятельного слоя и потока тепла в почве; Δt и Δe — разности температур воздуха и упругости водяного пара на стандартных высотах градиентных измерений 0,5 и 2,0 м.

Из структуры формул (1) и (2) ясно, что если одновременно малы числитель и знаменатель каждой из них, то относительная погрешность вычисляемых по ним значений L и V может оказаться очень большой. В связи с этим в [1] оговорено, что метод теплового баланса следует использовать только при выполнении следующих условий:

$$(B - P) \geq 0,10 \text{ кал/}(\text{мин} \cdot \text{см}^2), \quad (3)$$

$$\Delta t \geq 0,1^\circ \text{C}, \quad (4)$$

$$\Delta e \geq 0,1 \text{ мб}, \quad (5)$$

причем в отношении условия (3) дополнительно подчеркивается, что разность между B и P должна быть положительной. В отношении же условий (4) и (5) указано, что речь идет об абсолютной вели-

чине значений Δt и Δe . Однако это указание является, по-видимому, случайным, ибо:

1) если бы оно было обязательным, то условия (4) и (5) должны были быть записаны в виде $|\Delta t| \geq 0,1^\circ \text{C}$ и $|\Delta e| \geq 0,1 \text{ мб}$;

2) в отношении приведенной в [1] формулы (10), построенной аналогично формулам (1) и (2) настоящей работы, прямо оговорено, что Δt и Δe должны быть положительными;

3) в отношении формулы (2) особо указывается, что в некоторых (т. е. не во всех) случаях она может применяться и при $\Delta t < 0,1^\circ \text{C}$. В отношении формулы (1) такого указания не сделано, хотя вспомогательная таблица для расчетов по ней содержит не только положительные, но и некоторые отрицательные Δe .

Однако, если даже отбросить эти формальные соображения, то все же следует отметить, что в большинстве практически встречающихся случаев (лишь кроме положений, иногда имеющих место над водоемами, избыточно увлажненными или орошаемыми участками суши и т. п.) при выполнении условия (3) выполняются также условия (4) и (5), т. е. действительно наблюдаются положительные Δt и Δe . В самом деле, в умеренных широтах на суше летом в ночные часы, а зимой в течение всех суток B и P обычно отрицательны, невелики по абсолютной величине и $|P| < |B|$, так что условие (3) выполняется преимущественно лишь в дневные часы летнего времени, когда условия (4) и (5) обычно тоже выполнены. Наоборот, если в выражениях (4) и (5) понимать под Δt и Δe их абсолютные величины, т. е. использовать в расчетах не только положительные, но и отрицательные их значения, то возможности применения формул (1) и (2) все же увеличатся лишь незначительно, ибо при отрицательных Δt и Δe часто не будет выполняться условие (3). Последнее оказывается, таким образом, главным препятствием к широкому использованию метода теплового баланса для расчета L и V . Ниже это положение будет подтверждено на фактическом материале.

В связи с изложенным, условия (4) и (5) будут рассматриваться именно так, как они приведены в [1], т. е. без оговорки об абсолютной величине. Иначе говоря, отрицательные (и нулевые) Δt и Δe будут считаться признаком невозможности использования формул (1) и (2).

2. Из сказанного следует, что случаи невыполнения условий (3)—(5) практически могут встречаться довольно часто. В частности, к их числу будут относиться все инверсионные условия, которые на суше умеренных широт являются типичными для зимнего времени года, а летом для ночных часов. Однако до настоящего времени в литературе еще не приводились какие-либо количественные характеристики, которые показывали бы, насколько часто в тех или иных условиях в действительности выполняются или не выполняются условия (3)—(5). Получение и анализ таких характеристик и составляют цель настоящей работы.

3. Для изучения выполняемости условий (3)—(5) необходимо иметь результаты одновременных актинометрических (B), почвенных (P) и градиентных (Δt и Δe) наблюдений. Такой материал, и

притом полученный достаточно квалифицированным персоналом при высоком методическом уровне работ, можно в первую очередь получить из опубликованных результатов наблюдений различных экспедиций Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова и других научных учреждений. В настоящей работе использованы материалы наблюдений:

а) Арысской экспедиции ГГО в районе г. Арысь Казахской ССР в августе—сентябре 1945 г. [2];

б) Пахта-Аральской экспедиции ГГО и САГУ в районе совхоза Пахта-Арал Узбекской ССР в июле 1952 г. [3];

в) Махталинской экспедиции ГГО и САНИГМИ в районе совхоза Махталы Узбекской ССР в сентябре 1959 г. [4];

г) Днепровской экспедиции ГГО и УкрНИГМИ в селе Жовтневом Днепропетровской области УССР в июле—августе 1961 г. [5].

Кроме того, были использованы материалы наблюдений на базе Ленинградского гидрометеорологического института в с. Даймище Гатчинского района Ленинградской области в июле 1970 г. Обработка последней группы материалов полностью проведена студентами ЛГМИ Г. Сергейко и В. Устименко.

4. При обработке перечисленных материалов наблюдений встретились указанные ниже особенности.

а) В материалах Арысской экспедиции [2] данные о радиационном балансе и результаты градиентных наблюдений относятся к четным часам суток, а значения потока тепла в почве приведены для нечетных часов. Поэтому для рассмотрения условия (3) брались средние из значений этого потока в два соседних нечетных часа.

Измерения температуры и влажности воздуха в данной экспедиции производились не на стандартных высотах, а на уровнях 0,2 (или 0,5) и 1,5 м. Для перехода от разностей соответствующих метеозлементов на этих уровнях к значениям Δt и Δe брался переводной множитель из приложения 6 к [1], т. е. использовалось представление о логарифмическом характере профилей температуры и влажности.

б) Из материалов Пахта-Аральской экспедиции [3] были взяты результаты, относящиеся к площадке в полупустыне. Значения потока тепла в почве для 1-й серии наблюдений получены из работы [6], а для остальных серий — из [3]. Значения Δt и Δe были найдены с помощью логарифмического закона по результатам измерений на уровнях 0,5 и 1,5 м.

в) При обработке материалов Махталинской экспедиции значения потока тепла в почве были взяты из работы [7], причем пришлось находить средний из потоков в два соседних четных часа. Значения Δt вычислялись непосредственно по опубликованным в [4] данным о температуре на стандартных уровнях. Несколько труднее было находить Δe , так как в [4] приведена лишь относительная влажность воздуха на уровнях 0,25 и 2,0 м. Но поскольку имеется и температура на этих уровнях, пришлось, используя упругость насыщения, взятую из психрометрических таблиц, перейти от относи-

тельной влажности к упругости пара на указанных высотах, а затем с помощью логарифмического закона получить значения Δe .

Материалы наблюдений, полученные в Днепровской экспедиции [5] и на базе ЛГМИ, непосредственно содержат все исходные данные, необходимые для вычисления величин, входящих в условия (3)—(5).

5. По всем перечисленным выше материалам были рассчитаны значения $B - P$, Δt и Δe и определено число случаев, когда выполнялись все три условия (3)—(5), т. е. когда, согласно [1], метод теплового баланса мог быть использован, и число случаев, когда хотя бы одно из этих условий не выполнялось и метод теплового баланса применять было нельзя. Отдельно подсчитывалось число случаев невыполнения каждого из условий (3)—(5) и число случаев невыполнения одновременно всех трех условий. Полученные результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики применимости метода теплового баланса по результатам экспедиционных наблюдений

Экспедиция	Общее число случаев	Условия (3)—(5) выполнены		Условия (3)—(5) не выполнены		Не выполнены условия							
						(3)		(4)		(5)		(3), (4), (5)	
		ч. с.	%	ч. с.	%	ч. с.	%	ч. с.	%	ч. с.	%	ч. с.	%
Арысская	112	38	34	74	66	32	29	30	27	32	29	27	24
Пахта-Аральская	89	25	28	64	72	41	46	35	39	42	47	17	19
Махталинская	106	16	15	90	85	67	63	61	58	78	74	49	46
Днепровская	87	32	37	55	63	47	54	49	56	30	34	24	28
База ЛГМИ	134	41	31	93	69	85	63	61	46	33	25	26	19
Весь материал	528	152	29	376	71	272	51	236	45	215	41	143	27

Из табл. 1 видно, что по отдельным группам имевшегося материала условия (3)—(5) оказываются выполненными всего в 15—37%, а по всему материалу — только в 29% таких случаев, когда все необходимые исходные данные для применения метода теплового баланса имеются. Иначе говоря, в среднем более чем в $2/3$ всех случаев (71%) метод теплового баланса, рекомендуемый в [1] в качестве основного, фактически не может быть использован. При этом в некоторых группах исходных данных, а также в целом по всему материалу чаще всего действительно не выполняется условие (3). В двух группах материала это имеет место в 63% всех случаев, а в среднем более чем в половине (51%) всех случаев. Несколько реже, но тоже достаточно часто, иногда даже более чем в половине всех случаев, не выполняются условия (4) и (5).

6. Случаи невыполнения условий (4) или (5) — соответственно 45 и 41% от всего числа случаев — действительно встречаются лишь немного реже, чем случаи невыполнения условия (3). Этим подтверждается то, что если бы даже условиями (4) и (5) подразуме-

вались не только положительные, но и отрицательные значения Δt и Δe , то возможности применения метода теплового баланса увеличились бы лишь незначительно, так как при отрицательных Δt и Δe часто не выполнялось бы условие (3). Для уточнения этого положения было подсчитано число случаев, когда Δt или Δe или обе эти величины были отрицательными, но условие (3) выполнялось. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Повторяемость случаев экспедиционных наблюдений, когда $\Delta t < 0$ или $\Delta e < 0$, но условие (3) выполнено

Экспедиция	Общее число случаев	$\Delta t < 0$ или $\Delta e < 0$, но условие (3) выполнено	
		ч. с.	%
Арысская . . .	112	5	4
Пахта-Аральская	89	16	18
Махталинская	87	21	24
Днепроовская . .	106	5	5
База ЛГМИ . .	134	7	5
Весь материал .	528	54	10

Данные табл. 2 подтверждают, что если бы условия (4) и (5) были сформулированы даже в более «мягком» виде, чем в [1], а именно в виде $|\Delta t| \geq 0,1^\circ \text{C}$ и $|\Delta e| \geq 0,1 \text{ мб}$, т. е. если допускалось бы использование не только положительных, но и отрицательных Δt и Δe , то метод теплового баланса можно было бы применять дополнительно еще в 10% всех рассмотренных случаев, что в сумме с 29% случаев выполнения всех трех условий (3)—(5) давало бы лишь 39%, т. е. все еще заметно менее половины всех случаев. (Сумма этого числа с 51% случаев невыполнения условия (3) не дает 100% ввиду наличия случаев с $\Delta t = 0,0^\circ \text{C}$ и $\Delta e = 0,0 \text{ мб}$.)

7. Все материалы наблюдений, использованные в настоящей работе, относятся к суше умеренных широт и к летнему времени года. Выше было указано, что при этом условия (3)—(5) должны выполняться преимущественно в дневные часы и, как правило, не будут выполняться ночью. Для проверки этого утверждения все имевшиеся случаи, независимо от района наблюдений, были разбиты на группы по часам суток. В 1-ю группу вошли случаи, относящиеся к интервалу 0—1 час, во 2-ю группу — случаи для интервала 2—3 часа и т. д. Для каждой группы подсчитывалось общее число и повторяемость случаев выполнения и случаев невыполнения условий (3)—(5). Результаты помещены в табл. 3. Для наглядности данные 3-й строки этой таблицы представлены графически на рис. 1.

Из табл. 3 и рис. 1 видно, что высказанное выше утверждение о связи между возможностью использования метода теплового баланса и временем суток подтверждается фактическими данными. Действительно, из 264 случаев, относящихся к интервалу 18—5 ч,

Таблица 3

Повторяемость случаев выполнения и невыполнения условий (3)—(5)
в разные часы суток (экспедиционные данные)

	Часы											
	0—1	2—3	4—5	6—7	8—9	10—11	12—13	14—15	16—17	18—19	20—21	22—23
Всего случаев	47	38	48	41	44	43	45	46	45	46	49	36
Условия (3)—(5) выполнены												
Число случаев	0	0	0	7	22	21	31	34	25	9	2	1
%	0	0	0	17	50	49	69	74	56	20	4	3
Условия (3)—(5) не выполнены												
Число случаев	47	38	48	34	22	22	14	12	20	37	47	35
%	100	100	100	83	50	51	31	26	44	80	96	97

условия (3)—(5) оказались выполненными всего 12 раз (менее 5%), причем 11 из этих 12 случаев получены на базе ЛГМИ, т. е. в самом северном из всех рассмотренных пунктов, где в это время

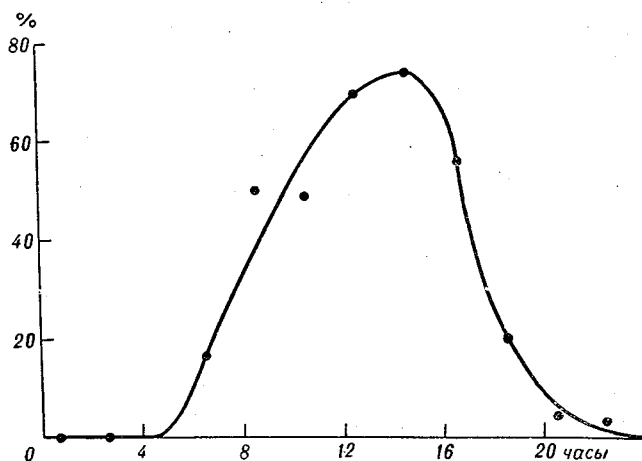


Рис. 1. Повторяемость случаев выполнения условий (3)—(5) в разные часы суток.

года (начало июля) день намного длиннее, чем в остальных пунктах, и часы с 18 до 22 еще не могут считаться «чисто» ночными. В интервале же 0—5 ч (133 случая) условия (3)—(5) не были выполнены ни разу. Таким образом, можно считать, что все 152 случая, когда условия (3)—(5) были выполнены, практически

пришлись на дневные или, в крайнем случае, на ранние вечерние часы (последние 3 случая).

8. Изложенные выше результаты получены на материале экспедиционных наблюдений. Представлялось целесообразным проверить их также по результатам наблюдений на стандартных сетевых теплобалансовых станциях ГУГМС. На этих станциях актинометрические, почвенные и градиентные наблюдения производятся в соответствии с [1] в сроки 1, 7, 10, 13, 16 и 19 ч. Одна из особенностей обработки этих наблюдений состоит в том, что в сводные таблицы ТМ-16 заносятся значения B , Δt и Δe не только отдельно за каждый срок каждого дня, но и средние для каждого срока за декаду, а значения P вообще рассчитываются только по исходным данным, осредненным за декаду. Поэтому для сопоставления с P могли быть использованы тоже только среднедекадные значения B , Δt и Δe за каждый срок наблюдений.

С целью охвата возможно более разнообразных физико-географических и метеорологических условий к рассмотрению были привлечены среднедекадные результаты наблюдений во все указанные выше сроки за июнь, июль и август 1969 и 1970 гг. на станциях Нолинск (Кировская область), Небольсино (Московская область), Полтава (Украинская ССР), Карасуат (Восточно-Казахстанская область), Душанбе (Таджикская ССР) — всего по 108 случаев для каждой станции, что вполне сравнимо с объектом исходных данных для разных экспедиций, представленных выше (табл. 1). Вся обработка материала наблюдений на станциях выполнена С. М. Гольдман.

9. В результате обработки данных наблюдений на станциях прежде всего была составлена табл. 4.

Таблица 4

Характеристики применимости метода теплового баланса по результатам наблюдений на станциях

Станция	Общее число случаев	Условия (3) — (5) выполнены		Условия (3) — (5) не выполнены		Не выполнены условия							
						(3)		(4)		(5)		(3), (4) и (5)	
		ч. с.	%	ч. с.	%	ч. с.	%	ч. с.	%	ч. с.	%	ч. с.	%
Нолинск	108	62	57	46	43	33	31	37	34	16	15	16	15
Небольсино	108	66	61	42	39	32	30	36	33	31	29	23	21
Полтава	108	52	48	56	52	43	40	37	34	31	29	19	18
Карасуат	108	52	48	56	52	43	40	27	25	32	30	13	12
Душанбе	108	49	45	59	55	45	42	49	45	2	2	1	1
Весь материал	540	281	52	259	48	196	36	186	34	112	21	72	13

Из сравнения табл. 4 и 1 видно, что при использовании данных наблюдений на станциях метод теплового баланса оказывается применимым несколько чаще, чем при использовании экспедиционных материалов: в среднем в 52% случаев против 29%. Этот результат

несомненно, объясняется тем, что были рассмотрены только летние месяцы, когда «чисто» ночным на большинстве рассмотренных станций является только один срок (1 ч), а ближайшие к нему сроки (19 и 7 ч) таковыми не являются. В экспедициях же наблюдения, как правило, проводились не только днем, но и ночью, через каждые 2—3 часа, так что число ночных сроков было не меньше, чем дневных (см. табл. 3). Привлечение же материалов наблюдений на станциях не только за летние, но и за зимние месяцы, несомненно, заметно уменьшило бы долю случаев выполнения условий (3)—(5).

10. По-прежнему наиболее часто (36% случаев) не выполняется условие (3) и лишь несколько реже (34%) — условие (4), но, в отличие от экспедиционных материалов, условие (5) и все три условия одновременно оказываются невыполненными значительно реже (21 и 13% против 41 и 27% случаев), что конечно тоже объясняется уменьшением доли ночных случаев при наблюдениях на станциях по сравнению с экспедиционными наблюдениями.

Таким образом, с учетом изменения результатов, представленных в табл. 4, в случае включения в нее зимних материалов привлечение данных наблюдений на станциях вполне подтверждает полученный из табл. 1 вывод о том, что при использовании условий (3)—(5) возможности использования метода теплового баланса для расчета L и V оказываются весьма ограниченными.

11. Как и в п. 6, на материале наблюдений на станциях также был рассмотрен вопрос о расширении области применения метода теплового баланса, которое могло бы быть достигнуто, если бы в условиях (4) и (5) фигурировали абсолютные величины Δt и Δe . С этой целью была составлена табл. 5.

Таблица 5

Повторяемость случаев наблюдений на станциях, когда $\Delta t < 0$ или $\Delta e < 0$, но условие (3) выполнено

Станция	Общее число случаев	$\Delta t < 0$ или $\Delta e < 0$, условие (3) выполнено	
		ч. с.	%
Нолинск	108	11	10
Небольсино	108	2	2
Полтава	108	7	6
Карасуат	108	11	10
Душанбе	108	7	6
Весь материал .	540	38	7

Из табл. 5 видно, что такое «смягчение» условий (4) и (5) увеличивает возможность использования метода теплового баланса еще меньше, чем это получилось на материале экспедиционных наблюдений: соответствующие случаи составляют лишь 7% общего их числа против 10% в табл. 2. С привлечением этих случаев общая

их доля среди всего материала составит 59%, т. е. все еще лишь немногим более половины всех случаев.

12. Подтверждением вывода, полученного в п. 10, служит составленная по результатам обработки данных станций табл. 6, в которой весь имеющийся материал, независимо от станций, сгруппирован по срокам наблюдений.

Таблица 6

Повторяемость случаев выполнения и невыполнения условий (3)—(5) в разные сроки наблюдений (данные станций)

	Срок					
	1	7	10	13	16	19
Всего случаев	90	90	90	90	90	90
Условия (3)—(5) выполнены						
Число случаев	0	39	86	82	72	2
%	0	43	96	91	80	2
Условия (3)—(5) не выполнены						
Число случаев	90	51	4	8	18	88
%	100	57	4	9	20	98

Данные табл. 6 вновь подтверждают, что в умеренных широтах на суше в летнее время года условия (3)—(5) допускают возможность использования метода теплового баланса в основном только в дневное время (10—16 ч), резко уменьшают ее в переходные утренние и вечерние часы (сроки 7 и 19 ч) и совершенно исключают ее ночью. Очевидно, что в зимнее время сроки 7 и 19 ч тоже оказались бы полностью или почти «ночными» и возможности использования метода теплового баланса уменьшились бы еще сильнее.

ВЫВОДЫ

1. Условия (3)—(5), при которых, согласно [1], турбулентный поток тепла и затрата тепла на испарение могут вычисляться методом теплового баланса, приводят к тому, что этот метод фактически может использоваться в среднем не более чем в 30—50% случаев, для которых имеются результаты теплобалансовых наблюдений.

2. Чаще всего (в среднем в 36—51% всех случаев) не выполняется условие (3) и лишь несколько реже (в 34—45 и 21—41% случаев) — условия (4) и (5). В среднем в 13—27% случаев не выполняются одновременно все три условия.

3. В умеренных широтах на суше летом условия (3)—(5) совершенно исключают возможность использования метода теплового баланса в ночные часы.

4. Условия (3)—(5) настолько сильно ограничивают возможность применения метода теплового баланса, что либо следует отказать от рекомендации его как основного [1], либо необходимо изыскать возможности «смягчения» указанных условий, причем в первую очередь условия (3). В случае выбора второго из этих двух путей необходимо, в частности, исследовать погрешности результатов расчета по формулам (1) и (2) при «смягченных» условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по градиентным наблюдениям и определению составляющих теплового баланса. Л., Гидрометеиздат, 1965.
2. Труды НИУ ГУГМС, 1947, сер. 1, вып. 39.
3. Труды института математики и механики АН УзбССР, 1953, вып. 19.
4. Труды ГГО, 1961, вып. 107.
5. Труды ГГО и УкрНИГМИ, 1963, вып. 144/40.
6. Айзенштат Б. А. и др. Изменение теплового баланса деятельной поверхности при орошении. — Труды ГГО, 1953, вып. 39 (101).
7. Айзенштат Б. А. и др. Тепловой баланс деятельной поверхности. — Труды ГГО, 1961, вып. 107.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОКАЗАНИЙ НЕСКОЛЬКИХ ПРИБОРОВ (ОПТИМАЛЬНОЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ)

В настоящее время точность измерения некоторых метеорологических параметров не удовлетворяет требованиям практики [1, 2, 3]. Поэтому ведутся широкие работы по повышению точности метеорологических приборов. С этой целью производится совершенствование их конструкции, применяются новые материалы, а также разрабатываются приборы, работающие на новых физических принципах.

Кроме того, существенного повышения точности измерения метеорологических параметров можно достичь применением совместной статистической обработки показаний нескольких приборов, измеряющих одну и ту же или функционально связанные величины. Такая обработка в технике получила название комплексирования. Различают инерционные и безынерционные алгоритмы комплексирования. Безынерционные алгоритмы весьма просты, но не учитывают частотные характеристики ошибок приборов. Однако, если метеорологические приборы имеют близкие по спектральному составу ошибки измерения, то точность безынерционного комплексирования близка к потенциально достижимой. Такие алгоритмы применяют также и при комплексировании различных измерителей в случае отсутствия информации о спектральных плотностях их ошибок. Для метеорологических приборов в настоящее время характерно отсутствие такой информации. В связи с этим данная работа посвящается исследованию безынерционных методов комплексирования метеорологических приборов.

В общем случае комплексная измерительная система состоит из измерителей I_i ($i=1, N$) метеорологического параметра x и устройства обработки УО (рис. 1).

Показания y_i каждого из N измерителей поступают на вход УО и имеют вид

$$y_i = x + \eta_i, \quad (1)$$

где η_i — ошибка i -того измерителя.

На выходе УО вырабатывается оценка z параметра x с некоторой ошибкой

$$\varepsilon = z - x \quad (2)$$

по критерию оптимизации

$$M[\varepsilon]^2 = \min, \quad (3)$$

причем математические ожидания M_x , M_{η_i} и дисперсии D_x , D_{η_i} считаются априорно известными.

Алгоритм оптимального безынерционного линейного преобразования имеет вид [4]

$$z = \sum_{i=1}^N a_i y_i + a_0, \quad (4)$$

где весовые коэффициенты a_i в случае независимости η_i между собой и от x определяются через D_{η_i} и D_x [5] по формуле

$$a_i = \frac{1}{D_{\eta_i} \left(\sum_{j=1}^N \frac{1}{D_{\eta_j}} + \frac{1}{D_x} \right)}. \quad (5)$$

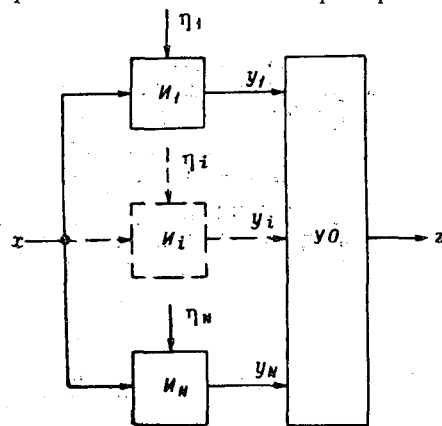


Рис. 1. Блок-схема комплексной измерительной системы.

В этом случае (2) с учетом (1) и (4) имеет вид

$$\varepsilon = \left(\sum_{i=1}^N a_i - 1 \right) x + \sum_{i=1}^N a_i \eta_i + a_0. \quad (6)$$

Условие несмещенности оценки z

$$M[\varepsilon] = 0 \quad (7)$$

выполняется при равенстве

$$a_0 = - \left(\sum_{i=1}^N a_i - 1 \right) M_x - \sum_{i=1}^N a_i M_{\eta_i}. \quad (8)$$

При этом критерий оптимальности (3) сводится к минимуму дисперсии ε

$$D[\varepsilon] = \min, \quad (9)$$

которая в случае преобразования (4), (5) определяется выражением

$$D_{\varepsilon \min} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{D_{\eta_i}} + \frac{1}{D_x}}. \quad (10)$$

При комплексировании идентичных измерителей ($a_i = a$; $D_{\eta_i} = D_{\eta}$) (5) и (10) приобретают соответственно вид

$$a = \frac{1}{N + \frac{D_{\eta}}{D_x}}, \quad (11)$$

$$D_{\varepsilon_{\min}} = \frac{D_{\eta}}{N + \frac{D_{\eta}}{D_x}}. \quad (12)$$

Согласно (10) и (12), дисперсия ошибки оптимальной комплексной измерительной системы при аддитивных ошибках у комплексированных приборов всегда меньше дисперсии ошибки самого точного из них и существенно уменьшается при увеличении числа N этих приборов (при $N \rightarrow \infty$ $D_{\varepsilon_{\min}} \rightarrow 0$).

Метеорологические приборы наряду с аддитивной составляющей ξ_i ошибки η_i обычно имеют и мультипликативную составляющую v_i , т. е. для них η_i зависит от измеряемого параметра x :

$$\eta_i = \xi_i + v_i = \xi_i + b_i x \quad (i = \overline{1, N}), \quad (13)$$

где b_i — случайный коэффициент.

Дисперсия D_{η_i} ошибки i -того метеорологического прибора при этом будет иметь вид

$$D_{\eta_i} = D_{b_i}(D_x + M_x^2) + D_x M_{b_i}^2 + D_{\xi_i}. \quad (14)$$

Для этого случая перепишем (1) и (6) соответственно в следующем виде:

$$y_i = x(1 + b_i) + \xi_i, \quad (15)$$

$$\varepsilon = x \left(\sum_{i=1}^N a_i - \sum_{i=1}^N a_i b_i - 1 \right) + \sum_{i=1}^N a_i \xi_i + a_0. \quad (16)$$

На основании теорем о числовых характеристиках функций определим дисперсию ошибки ε , имеющей вид (16):

$$\begin{aligned} D_{\varepsilon} = D_x & \left[\left(\sum_{i=1}^N a_i - 1 \right)^2 + \sum_{i=1}^N a_i^2 D_{b_i} + \sum_{i=1}^N a_i^2 \bar{b}_i^2 + \right. \\ & + 2 \sum_{i < j} a_i a_j \bar{b}_i \bar{b}_j + 2 \sum_{i < j} a_i a_j K_{b_i b_j} + 2 \left(\sum_{i=1}^N a_i - 1 \right) \sum_{i=1}^N a_i \bar{b}_i \left. \right] + \\ & + \bar{x}^2 \left(\sum_{i=1}^N a_i^2 D_{b_i} + 2 \sum_{i < j} a_i a_j K_{b_i b_j} \right) + \sum_{i=1}^N a_i^2 D_{\xi_i} + 2 \sum_{i < j} a_i a_j K_{\xi_i \xi_j}, \end{aligned} \quad (17)$$

причем математические ожидания $M_x = \bar{x}$, $M_{\xi_i} = \bar{\xi}_i$, $M_{b_i} = \bar{b}_i$, дисперсии D_x , D_{ξ_i} , D_{b_i} и корреляционные моменты $K_{\xi_i \xi_j}$, $K_{b_i b_j}$ предполагаем априорно известными; величины ξ_i , b_i считаем независимыми от x и между собой.

Минимизируя (17), найдем оптимальные в смысле (9) весовые коэффициенты преобразования (4)

$$a_i = \frac{D_x \left[1 + \bar{b}_i - (1 + \bar{b}_i) \sum_{\substack{\alpha=1 \\ \alpha \neq i}}^N a_\alpha - \sum_{\substack{\alpha=1 \\ \alpha \neq i}}^N a_\alpha \bar{b}_\alpha - \bar{b}_i \sum_{\substack{\alpha=1 \\ \alpha \neq i}}^N a_\alpha \bar{b}_\alpha - \sum_{\substack{\alpha=1 \\ \alpha \neq i}}^N a_\alpha K_{b_i b_\alpha} \right] - \sum_{\substack{\alpha=1 \\ \alpha \neq i}}^N a_\alpha K_{\xi_i \xi_\alpha} - \bar{x}^2 \sum_{\substack{\alpha=1 \\ \alpha \neq i}}^N a_\alpha K_{b_i b_\alpha}}{D_x (1 + \bar{b}_i)^2 + D_{b_i} (D_x + \bar{x}^2) + D_{\xi_i}} \quad (18)$$

При комплексировании идентичных измерителей, предполагая

$$b_i = b_j; \quad \bar{b}_i = \bar{b}_j; \quad K_{\xi_i \xi_j} = 0, \quad (19)$$

выражение (18) упрощаем:

$$a = \frac{D_x (1 + \bar{b})}{ND_b (D_x + \bar{x}^2) + ND_x (1 + \bar{b})^2 + D_{\xi}} \quad (20)$$

Дисперсию ошибки ε оптимальной линейной комплексной системы, состоящей из идентичных измерителей, при условии (19) получим, подставляя (20) в (17), в виде

$$D_{\varepsilon_{\min}} = \frac{D_x [ND_b (D_x + \bar{x}^2) + D_{\xi}]}{ND_b (D_x + \bar{x}^2) + ND_x (1 + \bar{b})^2 + D_{\xi}}, \quad (21)$$

откуда при $N \rightarrow \infty$ получим потенциальную точность такой комплексной системы:

$$D_{\varepsilon_{\min \min}} = \frac{D_x D_b (D_x + \bar{x}^2)}{D_b (D_x + \bar{x}^2) + D_x (1 + \bar{b})^2}. \quad (22)$$

С целью упрощения дальнейшего анализа $D_{\varepsilon_{\min}}$ и D_{η} произведем сравнение (14), (21) и (22) при центрировании величин x и b , что не изменит общности рассмотрения.

В результате сделанного допущения (14) и (21) примут соответственно вид

$$D_{\eta} = D_b D_x + D_{\xi}, \quad (23)$$

$$D_{\varepsilon_{\min}} = \frac{D_b D_x + D_{\xi} / N}{1 + D_b + D_{\xi} / ND_x}. \quad (24)$$

Из (23) и (24) следует, что линейное комплексирование N метеорологических приборов повышает точность измерения x лишь

за счет уменьшения дисперсии D_{ε} аддитивной составляющей ошибки.

Если в (24) $N \rightarrow \infty$, то получим, что потенциальная точность комплексной системы

$$D_{\varepsilon \min \min} = \frac{D_b \cdot D_x}{1 + D_b}, \quad (25)$$

отличаясь от нуля, определяется только мультипликативной составляющей ошибки. Такой же вид имеет и выражение для дисперсии ошибки системы, у приборов которой отсутствует аддитивная составляющая, т. е. $D_{\varepsilon} = 0$. Из (25) следует, что дисперсия ошибки такой системы не зависит от числа N комплексироваемых приборов.

Следовательно, линейное безынерционное комплексирование идентичных приборов, обладающих лишь мультипликативной ошибкой, при выполнении (19) не имеет смысла, тогда как комплексирование приборов с обеими составляющими ошибок дает эффект, степень которого зависит от соотношения мультипликативной и аддитивной составляющих ошибок комплексироваемых приборов.

Заметим, что наблюдаемое в (25) уменьшение дисперсии ошибки ε по сравнению с дисперсией $D_v = D_b \cdot D_x$ ошибки прибора, имеющего только мультипликативную ошибку измерения, имеет место в результате учета априорных сведений об измеряемой величине x при обработке показаний этого прибора. Действительно, «комплексирова» один такой измеритель с априорным каналом, получим дисперсию ошибки оценки

$$D'_{\varepsilon} = \frac{D_x \cdot D_v}{D_x + D_v}, \quad (25')$$

которая легко преобразуется к виду (25).

Полученные выводы справедливы и для нецентрированных величин x и b , что можно проверить, анализируя (14), (21) и (22). Отметим, что эти результаты имеют особенно большое значение при комплексировании метеорологических приборов, мультипликативные составляющие ошибок которых часто весьма значительны.

Для реализации оптимального безынерционного линейного алгоритма с весовыми коэффициентами (18) или (20) необходимо определение статистических характеристик $\bar{b}$ и D_b случайного коэффициента b при мультипликативной ошибке измерения, что обычно связано с большими вычислительными трудностями.

Таким образом, наличие мультипликативной составляющей ошибки измерения не только снижает эффективность комплексирования, но и затрудняет определение алгоритма обработки показаний приборов.

Эти недостатки в значительной степени могут быть устранены, если в УО учитывать также и показания прибора, измеряющего или величину b , или ее функцию. Вначале для простоты положим, что прибор, контролирующий величину b , идеальный. В этом случае ко-

ээффициент b будет неслучайной величиной, и (20) и (21) примут вид

$$a^* = \frac{D_x(1+b)}{ND_x(1+b)^2 + D_{\xi}}, \quad (26)$$

$$D_{\varepsilon \min}^* = \frac{D_x D_{\xi}}{ND_x(1+b)^2 + D_{\xi}}. \quad (27)$$

Сравнение (21) и (27) показывает, что контроль b существенно повышает эффективность комплексирования приборов с аддитивной и мультипликативной составляющими ошибок. Причем в этом случае при $N \rightarrow \infty$ $D_{\varepsilon \min}^* \rightarrow 0$.

Если контроль b осуществляется неидеальным прибором, дисперсией D_{b_k} ошибки которого нельзя пренебречь по сравнению с D_b , то коэффициент b по-прежнему будет случайной величиной, но уже с параметрами $D_b = D_{b_k}$; $\bar{b} = \bar{b}_k$.

В этом случае (20) и (21) будут иметь следующий вид:

$$a^{**} = \frac{D_x(1+\bar{b}_k)}{ND_{b_k}(D_x + \bar{x}^2) + ND_x(1+\bar{b}_k)^2 + D_{\xi}}, \quad (28)$$

$$D_{\varepsilon \min}^{**} = \frac{D_x [ND_{b_k}(D_x + \bar{x}^2) + D_{\xi}]}{ND_{b_k}(D_x + \bar{x}^2) + ND_x(1+\bar{b}_k)^2 + D_{\xi}}. \quad (29)$$

Потенциальная точность такой комплексной системы отличается от нуля и определяется выражением

$$D_{\varepsilon \min \min}^{**} = \frac{D_x D_{b_k}(D_x + \bar{x}^2)}{D_{b_k}(D_x + \bar{x}^2) + D_x(1+\bar{b}_k)^2}. \quad (30)$$

Однако известно, что у исправного прибора дисперсия ошибки всегда намного меньше дисперсии измеряемого параметра. Поэтому $D_{b_k} \ll D_b$, и из сравнения (21) и (29), (22) и (30) следует, что $D_{\varepsilon \min}^{**} < D_{\varepsilon \min}$, $D_{\varepsilon \min \min}^{**} < D_{\varepsilon \min \min}$.

Итак, включение показаний дополнительного прибора, контролирующего величину b , в автоматическую совместную обработку дает тем больший выигрыш в точности, чем меньше D_{b_k} по сравнению с D_b . Кроме того, достоверность работы такой системы в целом выше, так как в (28) не входят такие сложно и приближенно определяемые параметры, как $\bar{b}$ и D_b . Необходимые в (28) и (29) значения $\bar{b}_k$ и D_{b_k} измерительного прибора обычно всегда известны. Но в рассматриваемом случае следует учитывать достоверность осуществляемого контроля, которая зависит как от вероятности исправной работы контролирующего прибора, так и от степени охвата контролем факторов, определяющих ошибки комплексируемых приборов. Однако подобные вопросы выходят за рамки настоящей статьи.

Все сделанные выводы можно распространить и на случай контроля n аргументов, определяющих величину b , т. е. наличия n контролирующих приборов в измерительной системе.

Заметим, что предлагаемое использование в комплексной метеорологической измерительной системе приборов, контролирующих мультипликативные ошибки комплексируемых метеорологических приборов, по существу, переводит систему обработки в класс нелинейных систем, так как при этом весовые коэффициенты в алгоритме обработки зависят от показаний контролирующих приборов.

Использование в комплексной системе контролирующих приборов на метеорологических станциях вполне осуществимо, так как они оснащены различными приборами, измеряющими физические процессы и явления, происходящие в атмосфере и обуславливающие мультипликативные ошибки комплексируемых приборов.

Заметим также, что допущение (19) при комплексовании идентичных метеорологических измерителей, установленных достаточно близко друг к другу, является правомерным, так как влияние на них изменений в атмосфере фактически одинаково.

В качестве иллюстрации эффективности рассмотренных методов повышения точности измерения метеорологических параметров рассмотрим безынерционное оптимальное линейное комплексование двух идентичных термоанемометров, измеряющих скорость ветрового потока v по методу постоянного сопротивления R_n или постоянной температуры t_n нагретой нити, помещенной в этот поток.

Известно, что такие термоанемометры имеют значительную мультипликативную составляющую ошибки, обусловленную изменением температуры ветрового потока $t_{окр}$. Линеаризуя зависимость между скоростью потока и током I_n через нить, т. е. предполагая отклонения рассматриваемых величин от их средних значений небольшими, можно легко показать, что ошибка Δv , связанная с изменением $t_{окр}$, определяется следующим выражением:

$$\Delta v = \left(\sqrt{\frac{\theta}{\theta_0}} - 1 \right) \left[4 \frac{A}{B} + \left(\frac{A}{B} + 4 \right) v_0 \right], \quad (31)$$

где $\theta = t_n - t_{окр}$; θ_0 , v_0 — значения, соответствующие нормальным условиям эксплуатации ($t_{окр0} = 20^\circ \text{C}$); A , B — постоянные, зависящие от физических свойств нити и среды.

Возвращаясь к старым обозначениям $\Delta v = v$, $v = x$, перепишем (31) в виде

$$v = b(C + Ex), \quad (32)$$

где

$$b = \sqrt{\frac{\theta}{\theta_0}} - 1; \quad C = 4 \frac{A}{B}; \quad E = \frac{A}{B} + 4.$$

В связи с тем, что температура воздуха рассматривается как случайный процесс, коэффициент b в (32) также случайный. Его математическое ожидание и дисперсию определим методом статисти-

ческой линеаризации через соответствующие числовые характеристики $t_{\text{окр}}$:

$$\bar{b} = \sqrt{\frac{t_{\text{н}} - \bar{t}_{\text{окр}}}{\theta_0}} - 1, \quad (33)$$

$$D_b = \frac{D_{t_{\text{окр}}}}{4\theta_0 \sqrt{t_{\text{н}} - \bar{t}_{\text{окр}}}}. \quad (34)$$

Дисперсия ошибки η термоанемометра, включающей ν вида (32), будет равна

$$D_{\eta} = E^2 D_x (D_b + \bar{b}^2) + D_b (C + E\bar{x})^2 + D_{\xi}. \quad (35)$$

Учитывая (32), преобразуем (20), (21), (26), (27) соответственно в следующие выражения:

$$a = \frac{D_x (1 + E\bar{b})}{ND_b [E^2 (D_x + \bar{x}^2) + 2CE\bar{x} + C^2] + ND_x (1 + E\bar{b})^2 + D_{\xi}}, \quad (36)$$

$$D_{\varepsilon_{\text{min}}} = \frac{D_x \{ND_b [E^2 (D_x + \bar{x}^2) + 2CE\bar{x} + C^2] + D_{\xi}\}}{ND_b [E^2 (D_x + \bar{x}^2) + 2CE\bar{x} + C^2] + ND_x (1 + E\bar{b})^2 + D_{\xi}}, \quad (37)$$

$$a^* = \frac{D_x (1 + E\bar{b})}{ND_x (1 + E\bar{b})^2 + D_{\xi}}, \quad (38)$$

$$D_{\varepsilon_{\text{min}}}^* = \frac{D_x D_{\xi}}{ND_x (1 + E\bar{b})^2 + D_{\xi}}. \quad (39)$$

Сравнение (35) и (37) производится для термоанемометров с вольфрамовой позолоченной нитью диаметром $d=5$ мкм, длиной $l=1$ мм. При $t_{\text{н}}=300^\circ\text{C}$ и $t_{\text{окр}}=20^\circ\text{C}$ имеем $R_{\text{н}}=7$ Ом, $A=15,5 \times 10^{-6}$ Вт/ $^\circ\text{C}$, $B=22,3 \cdot 10^{-6}$ Вт $\cdot$ с $^{1/2}$ / $^\circ\text{C} \cdot \text{м}^{1/2}$.

Статистические характеристики $\bar{x}=4$ м/с, $D_x=3$ (м/с) 2 , $\bar{t}_{\text{окр}}=16^\circ\text{C}$, $D_{t_{\text{окр}}}=37$ ($^\circ\text{C}$) 2 определены для 1 июня на основании детального статистического исследования скорости ветра и температуры в приземном слое воздуха на станции ГМО в Ленинграде [6].

Из (33) и (34) при $\theta_0=280^\circ\text{C}$ получим $\bar{b}=5 \cdot 10^{-3}$, $D_b=11,6 \times 10^{-5}$. Значение $D_{\xi}=0,028$ (м/с) 2 для $\xi=\pm 0,5$ м/с определяем в предположении нормальности закона распределения величины ξ .

На основании (35) получим значения среднеквадратичных ошибок термоанемометра $\sigma_v=0,25$ м/с, $\sigma_{\eta}=0,3$ м/с.

Таким образом, в рассматриваемом примере наиболее существенной составляющей ошибки термоанемометра является мультипликативная.

При оптимальном безынерционном линейном комплексировании двух таких термоанемометров среднеквадратичная ошибка оценки скорости ветра, согласно (37), равна $\sigma_{\varepsilon_{\text{min}}}=0,0245$ м/с, т. е. меньше соответствующей ошибки одного термоанемометра в 1,2 раза.

Если же в устройство обработки ввести показания термометра, всегда имеющегося на метеорологических станциях, то эффективность комплексирования резко повышается. В этом случае, согласно (39), получим $\sigma_{\varepsilon_{\min}}^* = 0,114$ м/с при $b = \bar{b}$, т. е. среднеквадратичная ошибка оценки уменьшилась по сравнению с такой же ошибкой одного термоанемометра в 2,15 раза.

Причем, если в случае отсутствия контроля b весовой коэффициент алгоритма обработки постоянен, то при учете показаний термометра, согласно (32), (38) и (39), имеем диапазоны изменения $b = 0,1 \div (-0,035)$; $a^* = 0,23 \div 0,71$; $\sigma_{\varepsilon_{\min}}^* = 0,08 \div 0,14$; $\sigma_{\eta}/\sigma_{\varepsilon_{\min}}^* = 3,75 \div 2,15$ при изменении $t_{\text{отр}}$ от -40 до $+40^\circ\text{C}$.

Таким образом, рассмотренный метод комплексирования измерителей при сравнительной простоте технической реализации дает значительное повышение точности измерения скорости ветра.

Дальнейшее повышение точности измерения метеорологических параметров можно получить путем применения нелинейной безынерционной обработки показаний комплекслируемых измерителей.

Причем при нелинейном комплексировании эффект тем больше по сравнению с линейным, чем сильнее отличаются законы распределения измеряемого параметра и ошибок измерения от нормального, так как известно, что оптимальные линейное и нелинейное преобразования совпадают при нормальных законах распределения этих величин.

Алгоритм оптимального нелинейного преобразования, удовлетворяющего условию (3), определяется как условное математическое ожидание измеряемого параметра x относительно показаний y_i [7] и в случае статистической независимости x и η_i между собой записывается в виде

$$z = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x f_x(x) \prod_{i=1}^N f_{\eta_i}(y_i - x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} f_x(x) \prod_{i=1}^N f_{\eta_i}(y_i - x) dx}. \quad (40)$$

Из (40) следует, что нелинейное преобразование требует априорного знания плотностей распределения $f_x(x)$ и $f_{\eta_i}(y_i - x)$ измеряемого параметра x и ошибок измерения η_i ($i = \overline{1, N}$) и является более сложным по сравнению с линейным.

В случае отсутствия таких сведений об измеряемом параметре x применяют оптимальное, инвариантное по отношению к x , нелинейное комплексирование. Этот метод по точности практически совпадает с оптимальным при измерении достаточно точными приборами, т. е. когда $D_{\eta_i} \ll D_x$ ($i = \overline{1, N}$). В этом случае плотность распределения $f_x(x)$ в (40) отсутствует.

Алгоритм нелинейного преобразования, так же как и линейного, можно представить в виде суммы показаний, взятых с разными весами $a_i(y_1, \dots, y_N)$, которые в этом случае зависят от показаний

y_i , причем для оптимально-инвариантного преобразования [5] накладывается условие

$$\sum_{i=1}^N a_i(y_1, \dots, y_N) = 1. \quad (41)$$

Законом распределения, существенно отличающимся от нормального, обладают ошибки измерения приборов, измеряющих некоторую нелинейную функцию $\varphi(x)$ измеряемого параметра x . При комплексировании таких приборов нелинейным методом следует ожидать [8] значительно большего эффекта по сравнению с линейным.

Эта проблема имеет большое значение при комплексировании метеорологических приборов, измеряющих существенно нелинейную функцию $\varphi(x)$. К такого рода приборам принадлежит и термоанемометр. В рассмотренном ранее случае линейного комплексирования двух термоанемометров был применен метод линеаризации функции $\varphi(x)$, который вносит значительные погрешности при больших изменениях скорости ветра.

Нелинейное комплексирование термоанемометра с винтовым анемометром, обладающим линейной зависимостью между числом оборотов винта и скоростью ветра, позволит в значительной степени освободиться от этих погрешностей.

Для термоанемометра функция $\varphi(x) = I_n(v)$ приведена на рис. 2 и имеет вид

$$\varphi(x) = \sqrt[4]{Q + P\sqrt{x}}, \quad (42)$$

где

$$Q = -\frac{A}{R_n} \theta, \quad P = \frac{B}{R_n} \theta.$$

Как видно из рис. 2, нелинейность термоанемометра приводит к различному усилению скорости ветра x на различных участках диапазона изменения x . Для $x \geq 12$ м/с при изменении x на 1 м/с показания прибора отличаются менее чем на 1 мА, в то время как погрешность отсчета при цене деления, равной 2 мА, составляет ± 1 мА. Следовательно, нелинейность термоанемометра приводит к ошибкам $\eta \geq \pm 1$ м/с при измерении скорости ветра в поддиапазоне 12—40 м/с.

С целью упрощения вывода алгоритма обработки вместо функции $\varphi(x)$ будем рассматривать нелинейную функцию

$$\varphi_1(x) = \sqrt[4]{k_1 x}. \quad (42^*)$$

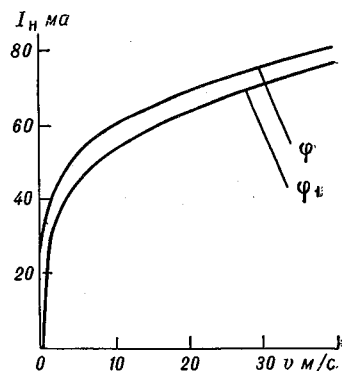


Рис. 2. Зависимость между током термоанемометра и скоростью ветрового потока.

Зависимость $\varphi_1(x)$ как функция $I_H(v)$ приведена на рис. 2. $\varphi_1(x) = \varphi(x)$ при $Q=0$ и $K_1=P^2$.

Причем, как показывает рис. 2, качественно характер графика $\varphi_1(x)$ практически не отличается от характера графика $\varphi(x)$. При $x=12 \div 40$ м/с по-прежнему имеем $\eta \geq \pm 1$ м/с, лишь на участке $x=0 \div 4$ м/с наблюдается отличие, но здесь в том и другом случае разница между соседними показаниями при изменении x на 1 м/с много больше 1 мА.

Поскольку винтовой анемометр измеряет x без нелинейных искажений, то для него будем полагать

$$\varphi_2(x) = x. \quad (43)$$

Предположим, что термоанемометр имеет эффективное устройство термокомпенсации. В этом случае оба прибора имеют только аддитивные ошибки, и их показания имеют вид

$$y_1 = \sqrt[4]{k_1 x} + \eta_1, \quad (44)$$

$$y_2 = x + \eta_2. \quad (45)$$

Пусть η_1 равномерно распределена в диапазоне от $-c = -1$ мА до $+c = 1$ мА. Плотность распределения η_1 запишем, используя понятие единичной функции u :

$$f_{\eta_1}(y_1 - \sqrt[4]{k_1 x}) = \frac{1}{2c} [u(y_1 - \sqrt[4]{k_1 x} + c) - u(y_1 - \sqrt[4]{k_1 x} - c)]. \quad (46)$$

Закон распределения η_2 положим нормальным ввиду наличия множества примерно равноценных причин возникновения этой ошибки:

$$f_{\eta_2}(y_2 - x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} e^{-\frac{(y_2 - x)^2}{2\sigma_2^2}}. \quad (47)$$

Будем считать, что оба комплексируемых прибора достаточно точны, и воспользуемся оптимально-инвариантным преобразованием:

$$z = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x f_{\eta_1}(y_1 - \sqrt[4]{k_1 x}) f_{\eta_2}(y_2 - x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} f_{\eta_1}(y_1 - \sqrt[4]{k_1 x}) f_{\eta_2}(y_2 - x) dx}. \quad (48)$$

Подставив (46) и (47) в (48), получим алгоритм оптимально-инвариантного нелинейного преобразования в виде

$$z = y_2 + \sigma_2 \frac{\Phi' \left[\frac{y_2 - \frac{1}{k_1} (y_1 - c)^4}{\sigma_2} \right] - \Phi' \left[\frac{y_2 - \frac{1}{k_1} (y_1 + c)^4}{\sigma_2} \right]}{\Phi \left[\frac{y_2 - \frac{1}{k_1} (y_1 - c)^4}{\sigma_2} \right] - \Phi \left[\frac{y_2 - \frac{1}{k_1} (y_1 + c)^4}{\sigma_2} \right]}, \quad (49)$$

где $\Phi(y)$ — интеграл вероятности, $\Phi'(y)$ — его производная.

Таким образом, определение оценки z измеряемого метеорологического параметра x при использовании нелинейного алгоритма требует более сложного вычислительного устройства по сравнению с линейным. Но, поскольку на автоматических метеорологических станциях обычно предусматривается механизированная обработка показаний приборов и они оснащаются вычислительными устройствами, для таких станций обработка по алгоритму (49) не представляет затруднений. То же самое можно сказать и для случая передачи показаний приборов с метеорологических станций в центры, оснащенные электронно-вычислительными машинами.

Если же предусматривается только простейшая обработка данных, без применения вычислителей, то алгоритм (49) с достаточно высокой степенью точности можно свести к значительно более простому.

С этой целью с помощью таблиц [9] были вычислены по (49) значения оценки z измеряемой скорости ветра в диапазоне изменения $x=1 \div 40$ м/с для случаев наиболее вероятных расхождений

$$\Delta_y = y_2 - \psi(y_1) \quad (50)$$

между показаниями исправных комплексируемых приборов, равных $\Delta'_y = \pm 1$ м/с, $\Delta''_y = \pm 2$ м/с. В (50) $\psi(y_1)$ есть функция, обратная функции $\varphi_1(x)$. При вычислении z положили $\sigma_2 = 0,33$ м/с, исходя из максимально возможной ошибки $\eta_{2\max} = \pm 1$ м/с.

Поскольку (49) — оптимально-инвариантное преобразование, то, согласно (41), алгоритм (49) можно представить в виде

$$z = a_1(y_1, y_2) \psi(y_1) + a_2(y_1, y_2) y_2, \quad (51)$$

где

$$a_1(y_1, y_2) + a_2(y_1, y_2) = 1.$$

Таким образом, по вычисленным оценкам z из (51) определяем весовые коэффициенты, соответствующие различным показаниям приборов. Для показаний y_1 термоанемометра весовые коэффициенты a_1 определяются выражением

$$a_1 = \frac{z - y_2}{\frac{1}{k_1} y_1^4 - y_2}. \quad (52)$$

Зависимость a_1 от y_1 для Δ'_y и Δ''_y представлена на рис. 3.

Анализ этой зависимости показывает, что при изменении x от 1 до 40 м/с a_1 изменяется практически от 1,0 до 0, что соответствует изменению a_2 от 0 до 1,0. Причем при изменении x от 1 до 12 м/с a_1 изменяется в пределах 1,0—0,5, а для $x=12 \div 40$ м/с $a_1=0,5 \div 0$.

Таким образом, полученный нами алгоритм имеет определенный физический смысл. При достаточно малых значениях x показания y_2 винтового анемометра, обладающего линейной характеристикой, но менее точного по сравнению с термоанемометром, практически можно не учитывать; оценка скорости ветра определяется в основном показаниями термоанемометра. По мере роста значения

x доверие к показаниям y_1 термоанемометра, обладающего нелинейной характеристикой, уменьшается. При значении скорости ветра $x=12$ м/с, при котором нелинейность прибора начинает существенно сказываться на его точности, доверие к обоим приборам примерно одинаковое. Дальнейшее увеличение значения x приводит к увеличению доверия к показаниям y_2 линейного прибора. При достаточно больших значениях x (≥ 40 м/с) показаниями y_1 целиком можно пренебречь без потери в точности получения оценки z .

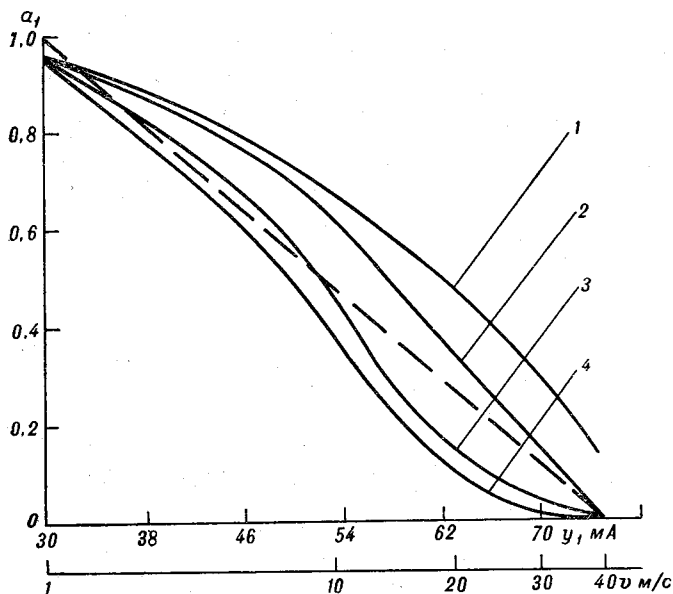


Рис. 3. Зависимость весового коэффициента нелинейного алгоритма от показаний термоанемометра.

1) $\Delta y'' = -2$ м/с, 2) $\Delta y'' = 2$ м/с, 3) $\Delta y' = -1$ м/с, 4) $\Delta y' = 1$ м/с.

Из рис. 3 видно, что в диапазоне изменения $x=1 \div 40$ м/с зависимость $a_1(y_1)$ с достаточно большой точностью можно аппроксимировать линейной зависимостью (пунктирная прямая).

Такая аппроксимация приводит к разделению нелинейного алгоритма (49) на две технически легко реализуемые части: линейную область в диапазоне $x=0 \div 40$ м/с и область отсечки для $x \geq 40$ м/с. Предлагаемый субоптимальный алгоритм имеет вид

$$z = a_1(y_1) \frac{1}{k_1} y_1^4 + [1 - a_1(y_1)] y_2, \quad (53)$$

где

$$a_1(y_1) = \begin{cases} 1 - m y_1 & \text{при } y_1 < \frac{1}{m} = 75,3 \text{ мА } (x < 40 \text{ м/с}), \\ 0 & \text{при } y_1 \geq \frac{1}{m} = 75,3 \text{ мА } (x \geq 40 \text{ м/с}). \end{cases}$$

Отметим, что этот алгоритм, имеющий квазилинейную форму, при достаточной точности аппроксимации преобразования (49) весьма прост и легко реализуем в условиях отсутствия специализированного вычислительного устройства.

ВЫВОДЫ

1. Получены алгоритмы безынерционного линейного комплексирования метеорологических приборов, имеющих мультипликативную составляющую ошибки. Выведены выражения, позволяющие определить эффективность подобного комплексирования. Показано, что наличие существенной мультипликативной составляющей ошибки резко снижает эффективность такого комплексирования.

2. С целью значительного повышения точности линейной комплексной системы предлагается учитывать показания дополнительных приборов, измеряющих либо коэффициент при мультипликативной составляющей ошибки, либо функционально с ним связанные величины. В условиях метеорологической станции это вполне осуществимо, так как природа возникновения контролируемого коэффициента обычно связана с изменениями в атмосфере, которые измеряются на станции.

3. Получен алгоритм линейного безынерционного комплексирования с учетом показаний дополнительного прибора. Показано, что этот алгоритм, отличаясь сравнительной простотой, является, по существу, нелинейным, так как его весовые коэффициенты зависят от показаний контролирующего прибора. Исследована эффективность такого комплексирования. Показано, что учет показаний термометра при комплексировании двух идентичных термоанемометров позволяет уменьшить среднеквадратичную ошибку одного термоанемометра в 2,1—3,7 раза при изменении температуры воздуха от -40°C до $+40^{\circ}\text{C}$.

4. Показано, что при комплексировании метеорологических приборов, измеряющих нелинейную функцию интересующего нас параметра, следует применять безынерционную нелинейную обработку. Получены алгоритмы оптимального и упрощенного, легко технически реализуемого, нелинейного комплексирования термоанемометра и винтового анемометра. Этот алгоритм имеет определенный физический смысл. При достаточно малых значениях скорости ветрового потока больший вес придается показаниям термоанемометра, при больших значениях этой скорости показания термоанемометра практически не учитываются. Это связано с существенной нелинейностью характеристики термоанемометра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г ан д и н Л. С. Объективный анализ метеорологических полей. Л., Гидрометеоздат, 1963, 287 с.
2. Материалы Международной конференции по автоматическим станциям погоды, Женева, 1966. — Информационный сборник НИИГМП, 1967, вып. 30—33, 1968, вып. 34.

3. Садовников А. В. К вопросу об оптимальной частоте и точности метеорологических измерений. — Труды ААНИИ, 1967, т. 281, с. 82—85.
4. Романовский В. И. Основные задачи теории ошибок. М., Гостехиздат, 1947, 220 с.
5. Дмитриев С. П., Зарицкий В. С. Оптимально-инвариантное преобразование нескольких сигналов. — Материалы 4-го Всесоюзного совещания «Теория инвариантности и теория чувствительности автоматических систем». Киев, 1971.
6. Киселева Т. Л., Чудновский А. Ф. Статистическое исследование суточного хода температуры воздуха. — Бюлл. научно-технической информации по агрономической физике, № 11. Л., Гидрометеиздат, 1968, с. 13—45.
7. Пугачев В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. М., Гостехиздат, 1962. 883 с.
8. Гильбо Е. П., Розов Ю. Л. Одна задача нелинейного комплексирования. — Труды ЛПИ, 1969, № 307, с. 96—101.
9. Таблицы вероятностных функций. Т. II. Вычислительный центр АН СССР, 1970.

О ПОГРЕШНОСТИ АНАЛОГО-ДИСКРЕТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ КАНАЛАМИ

Измерение метеорологических процессов и полей, как правило, связано с их дискретизацией по времени и пространству и нахождением искоемых характеристик по результатам дискретных наблюдений. Как показано в ряде работ, при получении дискретных отсчетов в общем случае целесообразно осуществлять предварительное осреднение процесса. При рациональном выборе фильтра (например, динамических характеристик измерительного прибора) это нередко позволяет заметно повысить точность по сравнению с обработкой мгновенных значений процесса при той же частоте отсчетов [2, 5, 7, 8].

Выше речь шла о погрешности определения характеристик процесса по результатам дискретных измерений только этого процесса. Обычно метеорологические наблюдения являются многоканальными, т. е. осуществляется измерение ряда элементов. При этом желаемую характеристику в общем случае следует определять по результатам измерений в ряде каналов. При совокупных измерениях, необходимости введения поправок и в других случаях, когда сама эта характеристика является функцией ряда элементов, это соображение представляется очевидным. Однако даже если искомая характеристика есть функция одного элемента, привлечение для ее нахождения результатов измерений в других каналах в общем случае позволяет повысить точность и нередко весьма существенно [1, 4, 6]. Это связано с корреляцией изучаемых сигналов и погрешностей измерений в различных каналах.

Частным случаем многоканальных систем являются комплексные системы, в которых используется измерение одного и того же процесса различными приборами. Это соответствует 100%-ной положительной корреляции входных сигналов в многоканальной системе. Измерение процесса различными датчиками и совместная обработка их показаний нередко позволяют заметно уменьшить систематическую и случайную погрешности. В качестве примера

можно привести возможность периодической или однократной коррекции грубого прибора по показаниям более точного, использование каждого из приборов в той части шкалы, где его точность максимальна, уменьшение случайной погрешности, особенно для приборов, основанных на различных физических принципах, уменьшение динамической погрешности при обработке отсчетов двух датчиков с разными динамическими характеристиками (например, измеряющих значения процесса и его производной) и т. д.

Использование подобных методов, очевидно, связано с усложнением измерительной системы, существенным даже при измерении процесса только двумя приборами. Однако, как показано ниже, в ряде случаев (в частности, при использовании нескольких вторичных преобразователей в одном приборе) это усложнение может быть незначительным.

В данной статье рассматривается погрешность определения заданной характеристики процесса по результатам дискретных измерений, полученных по нескольким приборам, и обсуждается вопрос о выборе параметров приборов и способа обработки. В качестве примера рассматривается задача определения среднего значения процесса за заданный интервал по ряду отсчетов двух приборов первого порядка с разными постоянными времени.

Погрешность комплексной аналого-дискретной измерительной системы

Структурная схема рассматриваемой системы приведена на рис. 1. Здесь $x(t)$ — изучаемый метеорологический элемент; $L(t)$ —

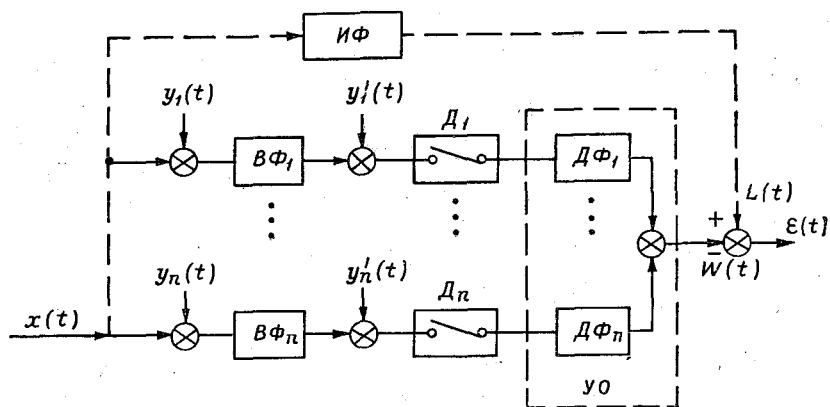


Рис. 1.

желаемая характеристика процесса, определяемая преобразованием:

$$L(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau) x(t - \tau) d\tau; \quad (1)$$

$B\Phi_i$ — датчик (входной фильтр); D_i — устройство временной дискретизации; $УО$ — устройство обработки дискретных отсчетов; $y_i(t)$ и $y'_i(t)$ — помехи на различных этапах преобразования в каналах. Для рассматриваемой линейной задачи оценка $W(t)$ в $УО$ находится как сумма выходных величин дискретных фильтров $D\Phi_i$:

$$W(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_j} b_{ij}(t) z_i(t_{ij}), \quad (1')$$

где

$$z_i(t_{ij}) = \int_0^{\infty} h_i(t) \varphi_i(t_{ij} - t) dt + y'_i(t_{ij}), \quad \varphi_i(t) = x(t) + y_i(t).$$

Весовая функция $h_n(t)$ идеального фильтра $H\Phi$, в отличие от весовых функций $h_i(t)$ ($i=1, \dots, n$) измерительных приборов $B\Phi_i$, может быть физически нереализуемой. Моменты отсчетов (t_{ij}) и число обрабатываемых отсчетов (m_i) для всех каналов могут быть различными.

Полагая для простоты процесс $x(t)$ и помехи стационарными с равными нулю математическими ожиданиями (либо центрируя процессы), для дисперсии погрешности определения $L(t)$ комплексной системой по рис. 1 получим

$$\begin{aligned} \sigma^2(t) = \overline{[L(t) - W(t)]^2} = & \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_n(t') h_n(t'') R_x(t'' - t') dt' dt'' - \\ & - 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} b_{ij}(t) \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} h_n(t') h_i(t'') R_{x\varphi_i}(t - t' - t_{ij} + t'') dt' dt'' + \right. \\ & + \left. \int_{-\infty}^{\infty} h_n(t') R_{xy_i}(t - t' - t_{ij}) dt' \right\} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^n \sum_{e=1}^{m_k} b_{ij}(t) b_{ke}(t) \times \\ & \times \left\{ \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} h_i(t') h_k(t'') R_{\varphi_i\varphi_k}(t_{ij} - t' - t_{ke} + t'') dt' dt'' + R_{y_i y'_k}(t_{ij} - t_{ke}) + \right. \\ & + \left. \int_0^{\infty} h_i(t') R_{\varphi_i y'_k}(t_{ij} - t' - t_{ke}) dt' + \int_0^{\infty} h_k(t'') R_{\varphi_k y'_i}(t_{ke} - t' - t_{ij}) dt' \right\}, \quad (2) \end{aligned}$$

где R с индексом внизу обозначает соответствующую авто- или взаимокорреляционную функцию. Выражения в первой и второй фигурных скобках в (2) равны соответственно $R_{Lz_i}(t - t_{ij})$ и $R_{z_i z_k}(t_{ij} - t_{ke})$.

Выражение (2) позволяет определить погрешность комплексной аналого-дискретной измерительной системы, если известны динамические характеристики приборов, т. е. весовые функции $h_i(t)$, координаты выбираемых отсчетов и способ их обработки. При синтезе

оптимальной системы необходимо иметь в виду, что в общем случае полученные отсчеты используются для определения характеристики $L(t)$ не для одного аргумента, а в некоторой области C . Поэтому при выборе оптимальных характеристик системы в качестве критерия целесообразно использовать осредненную дисперсию

$$\sigma_{\text{ср}}^2 = \int_C f(\tau) \sigma^2(\tau) d\tau, \quad (2')$$

где $f(\tau)$ — весовая функция, учитывающая различные требования к точности в разных точках области C , и $\int_C f(\tau) d\tau = 1$. Выражение (2) — частный случай (2') при $f(\tau) = \delta(t - \tau)$, где $\delta(\tau)$ — дельта-функция.

Если координаты используемых отсчетов известны, синтез оптимальной системы сводится к выбору весовых функций $h_i(\tau)$ и весовых коэффициентов $b_{ij}(t)$, минимизирующему (2'). Находя частные производные $\sigma^2(t)$ по b_{ij} и приравнявая их нулю, получим

$$R_{Lz_i}(t - t_{ij}) = \sum_{k=1}^n \sum_{e=1}^{m_k} b_{ke}^0(t) R_{z_i z_k}(t_{ij} - t_{ke}), \quad (3)$$

$$i=1, \dots, n, j=1, \dots, m_i.$$

При подстановке оптимальных значений $b_{ij}^0(t)$ из (3) в (2) имеем

$$\sigma^2(t) = R_L(0) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} b_{ij}^0 R_{Lz_i}(t - t_{ij}). \quad (4)$$

Из (2'), используя условие минимума функционала, зависящего от n функций $h_i(t)$, получим n интегральных уравнений вида

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{m_i} \int_C \int_{-\infty}^{\infty} f(t) b_{ij}(t) h_i(t'') R_{x\varphi_i}(t - t'' - t_{ij} + t') dt'' dt = \\ & = \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^n \sum_{e=1}^{m_k} \int_C f(t) b_{ij}(t) b_{ke}(t) dt \left[\int_0^{\infty} h_k(t'') R_{\varphi_i \varphi_k}(t_{ij} - t' - \right. \\ & \left. - t_{ke} + t'') dt'' + R_{\varphi_i \varphi_k}(t_{ij} - t' - t_{ke}) \right], \quad t' \geq 0; \quad i=1, \dots, n. \quad (3') \end{aligned}$$

Оптимальные весовые функции $h_i(t)$ и коэффициенты $b_{ij}(t)$ представляют собой решение полученной системы $\left(n + \sum_{i=1}^n m_i\right)$ уравнений (3) и (3')).

Практически задача может быть существенно упрощена, если задаться видом весовых функций $h_i(t)$ приборов, исходя из возмож-

ностей их технической реализации, и полагать неизвестными лишь параметры этих функций. Подобный подход позволяет учесть при синтезе также возможную нестабильность параметров приборов, что может существенно влиять на оптимальные значения параметров и соответствующую минимальную погрешность [2]. Аналогичный подход может быть использован для синтеза системы с учетом неточного знания статистической структуры измеряемого процесса и помех, если отклонение реальных характеристик сигналов от расчетных может быть задано, например, как изменение параметров при известном виде корреляционных функций.

Как отмечалось, если синтез измерительных приборов сводится к определению параметров при известном виде функций $h_i(t)$, вариационная задача заменяется задачей на экстремум функции конечного числа переменных, решение которой принципиально трудностей не представляет. Вместе с тем приходится считаться с вычислительными трудностями, возрастающими с ростом числа обрабатываемых измерений. При равномерной дискретизации и синхронных измерениях во всех каналах (т. е. m_i и t_{ij} , не зависящих от i) для определения оптимальных дискретных фильтров, т. е. оптимальных весовых коэффициентов $b_{ij}(t)$, и результирующей погрешности могут быть использованы методы, основанные на применении Z-преобразования [1]. В получаемые при этом выражения характеристики входных фильтров входят как параметры. Последний синтез сводится к оптимальному выбору этих параметров исходя из минимума погрешности. Такой метод при больших m может упростить решение и тем в большей степени, чем больше m .

Погрешность определения среднего значения за заданный временной интервал по ряду отсчетов двух инерционных приборов

Структура рассматриваемой комплексной измерительной системы определяется рис. 1. В данном случае число каналов $n=2$, а искомой характеристикой является среднее значение процесса за заданный интервал T :

$$L(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(\tau) d\tau, \text{ т. е. } h_n(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{T} & \text{при } 0 \leq \tau < T, \\ 0 & \text{при } \tau \geq T. \end{cases}$$

Примем, что в качестве датчиков используются приборы первого порядка с постоянными времени T_1 и T_2 , т. е. $h_1(t) = \frac{1}{T_1} e^{-t/T_1}$ и $h_2(t) = \frac{1}{T_2} e^{-t/T_2}$, $t \geq 0$. Подставляя приведенные весовые функции в (2), получим выражение для погрешности определения среднего

за интервал T рассматриваемой измерительной системой. Эта погрешность зависит от T_1 и T_2 , числа обрабатываемых отсчетов m_1 и m_2 , их координат, весовых коэффициентов b_{ij} и при известной статистической структуре сигнала и помех может быть минимизирована оптимальным выбором указанных параметров, как об этом говорилось выше.

Примем, что $m_1 = m_2 = m + 1$ и моменты измерений $t_{1j} = t_{2j} = t_j = t - T + j \frac{T}{m}$. Для исключения систематической погрешности определения среднего при математическом ожидании процесса $x(t)$, не равном нулю, наложим на весовые коэффициенты b_{ij} условие: $\sum_{i=1}^2 \sum_{j=0}^m b_{ij} = 1$. В этом случае оценка (1') может быть представлена в виде

$$Y(t) = kW_1 + (1 - k)W_2,$$

где

$$W_1 = \sum_{j=0}^m a_{1j}z_1(t_j), \quad W_2 = \sum_{j=0}^m a_{2j}z_2(t_j),$$

причем $\sum_{j=0}^m a_{1j} = 1$, $\sum_{j=0}^m a_{2j} = 1$, а коэффициент k может быть выбран произвольно. Подобная запись позволяет воспользоваться при анализе выражениями для погрешности определения среднего по взвешенной сумме отсчетов одного прибора, рассмотренными в [3].

Дисперсия погрешности

$$\sigma^2 = \overline{[L - kW_1 + (k-1)W_2]^2} = D_L + k^2 D_{W_1} + (k-1)^2 D_{W_2} - 2kR_{LW_1} + 2(k-1)R_{LW_2} - 2k(k-1)R_{W_1W_2},$$

где D_L — дисперсия среднего значения процесса за интервал T ; D_{W_1} и D_{W_2} — дисперсии оценок W_1 и W_2 ; R_{LW_1} , R_{LW_2} и $R_{W_1W_2}$ — соответствующие корреляционные моменты. Последнее выражение может быть переписано в виде

$$\sigma^2 = kE_1 + (1 - k)E_2 + k(k - 1)E_3, \quad (5)$$

где $E_1 = \overline{(L - W_1)^2} = D_L + D_{W_1} - 2R_{LW_1}$ — дисперсия погрешности определения среднего значения за временной интервал T по взвешенной (и нормированной) сумме W_1 отсчетов одного первого прибора, $E_2 = \overline{(L - W_2)^2}$ — аналогичная характеристика для второго канала, $E_3 = \overline{(W_1 - W_2)^2} = D_{W_1} + D_{W_2} - 2R_{W_1W_2}$ — дисперсия разности оценок W_1 и W_2 .

Приведем выражения для D_L , D_{W_1} и R_{LW_1} (для простоты пренебрегаем погрешностями измерений $y_i(t)$ и $y'_i(t)$):

$$D_L = \frac{2}{T^2} \int_0^T (T-t) R_x(t) dt, \quad (6)$$

$$D_{W_1} = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m a_{1j} a_{1i} R_{z_1} \left[(i-j) \frac{T}{m} \right], \quad (7)$$

$$R_{LW_1} = \sum_{i=0}^m a_{1i} R_{Lz_1} \left(T - i \frac{T}{m} \right), \quad (8)$$

где

$$R_{z_1}(\tau) = \frac{1}{2T_1} \int_0^\infty [R_x(t-\tau) + R_x(t+\tau)] e^{-t/T_1} dt, \quad (9)$$

$$R_{Lz_1}(\tau) = \frac{1}{T} \left\{ \int_0^T R_x(t+\tau-T_0) dt + \int_0^\infty [R_x(t+\tau) - R_x(t+\tau-T)] \times \right. \\ \left. \times e^{-t/T_1} dt \right\}. \quad (10)$$

Для $R_{W_1W_2}$ можно записать

$$R_{W_1W_2} = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m a_{1j} a_{2j} R_{z_1z_2} \left[(i-j) \frac{T}{m} \right], \quad (11)$$

где

$$R_{z_1z_2}(\tau) = \overline{\dot{z}_1(t+\tau) \dot{z}_2(t)} = \frac{1}{T_1 T_2} \int_0^\infty \int_0^\infty R_x(\tau - t' + t'') e^{-(t'/T_1 + t''/T_2)} \times \\ \times dt' dt'' = \frac{1}{T_1 + T_2} \left\{ \int_0^\infty R_x(t-\tau) e^{-t/T_1} dt + \int_0^\infty R_x(t+\tau) e^{-t/T_2} dt \right\}. \quad (12)$$

Несложно убедиться, что при $T_1 = T_2$ из выражения для взаимно-корреляционной функции $R_{z_1z_2}(\tau)$ процессов на выходе двух приборов получаем выражение (9) для автокорреляционной функции $R_{z_1}(\tau)$.

Рассмотрим некоторые частные случаи выбора параметров в выражении (5). При $k=1$ и $k=0$ σ^2 равна E_1 и E_2 , т. е. дисперсии погрешности определения среднего L в соответствующей одноканальной системе. Представляет интерес случай, когда для всех j $a_{1j} = a_{2j} = a_j$, т. е. весовые коэффициенты при обработке всех синфазных отсчетов двух приборов отличаются только масштабом (выбором коэффициентов k и $1-k$). В этом случае рассматриваемая двухканальная система эквивалентна одноканальной, но с входным фильтром, выходной сигнал которого $\xi(t) = k z_1(t) + (1-k) z_2(t)$. Этот случай соответствует определению L по взвешенной сумме отсчетов прибора второго порядка и рассматривается отдельно.

Нахождение оптимальных дискретных фильтров, т. е. оптимальных a_{ij} , зависящих от $R_x(t)$, трудности не представляет, но громоздко; их реализация может заметно усложнять прибор. Поэтому значительный интерес представляют простые дискретные фильтры, некоторые из которых могут быть достаточно эффективны. Воспользуемся в обоих каналах системы обработкой отсчетов, рассмотренной в [3], т. е. примем

$$W = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m z\left(j \frac{T}{m}\right) + \left(b - \frac{1}{2m}\right) [z(T) - z(0)]. \quad (13)$$

Оценку $W_1(W_2)$ получаем из (13) заменой z и b соответственно на z_1 и b_1 (z_2 и b_2). Примем далее $b_1 = T_1/T$ и $b_2 = T_2/T$, что для одноканальной системы соответствует оптимальному выбору b_1 (или b_2) независимо от m и $R_x(t)$. Для одноканальной системы такая обработка при существенной простоте весьма эффективна, в частности, при увеличении T_1 $E_1 \rightarrow 0$ независимо от m и $R_x(t)$.

Рассмотрим выражение для дисперсии разности выбранных оценок W_1 и W_2 . Из (5) с учетом (7) и (11) получим

$$\begin{aligned} E_3 = & \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} (D'_{W_2} - D'_{W_1}) - \frac{2}{m} (b_1 - b_2) \sum_{i=1}^m \left[R_{z_1 z_2} \left(i \frac{T}{m} \right) - \right. \\ & \left. - R_{z_1 z_2} \left(-i \frac{T}{m} \right) \right] + \frac{b_1 - b_2}{m} [R_{z_1 z_2}(T) - R_{z_1 z_2}(-T)] + \\ & + [R_{z_1}(0) - R_{z_1}(T)] \left[2b_1^2 - \frac{1}{2m^2} - \frac{4T_1}{T_1 + T_2} \left(b_1 b_2 - \frac{1}{4m^2} \right) \right] + \\ & + [R_{z_2}(0) - R_{z_2}(T)] \left[2b_2^2 - \frac{1}{2m^2} - \frac{4T_2}{T_1 + T_2} \left(b_1 b_2 - \frac{1}{4m^2} \right) \right], \end{aligned}$$

где $D'_{W_1} = \frac{1}{m^2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m R_{z_1} \left[(i-j) \frac{T}{m} \right]$ — дисперсия среднего арифметического m отсчетов по первому прибору. Подставляя в это выражение $b_1 = T_1/T$ и $b_2 = T_2/T$, с учетом (9), (10) и (12) окончательно получим

$$E_3 = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} (E_2 - E_1). \quad (14)$$

Поскольку дисперсия $E_3 \geq 0$, из (14) следует, что при $T_1 > T_2$, $E_2 \geq E_1$, т. е. при выборе $b = b_{\text{опт}} = T_{\Phi}/T$, дисперсия погрешности $E(T_{\Phi})$ определения среднего L по взвешенной сумме отсчетов прибора первого порядка с постоянной времени T_{Φ} с увеличением T_{Φ} монотонно убывает (независимо от $R_x(t)$ и m), как это отмечалось в [3] без доказательства.

Перепишем выражение (5) с учетом (14):

$$\sigma^2 = kE_1 + (1-k)E_2 + k(k-1) \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} (E_2 - E_1). \quad (14')$$

Приведенное выражение показывает, что в данном случае погрешность σ^2 может быть весьма просто определена через погрешность определения среднего в одноканальной системе $E(T_\Phi)$ ($E_1 = E(T_1)$, $E_2 = E(T_2)$). Дифференцируя σ^2 по k и приравняв производную нулю, найдем оптимальное значение k :

$$k_0 = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = \frac{1}{1 - \gamma}, \quad (15)$$

где $\gamma = T_2/T_1$. Очевидно, при $\gamma \rightarrow 1$ $k_0 \rightarrow \infty$.

Подставляя (15) в выражение (14'), для минимального значения дисперсии σ^2 получим

$$\sigma_0^2 = \frac{E(T_1) - E(\gamma T_1) \gamma^2}{1 - \gamma^2} = E(T_1) \frac{1 - \frac{E(\gamma T_1)}{E(T_1)} \gamma^2}{1 - \gamma^2}. \quad (16)$$

Как было показано выше, для используемого метода обработки зависимость $E(T_\Phi)$ является монотонно убывающей; поэтому при $\gamma < 1$ $\frac{E(\gamma T_1)}{E(T_1)} > 1$ и, следовательно, дисперсия $\sigma_0^2 \leq E(T_1)$. Таким образом, рассматриваемая комплексная система практически всегда дает выигрыш в точности по сравнению с более точной из двух используемых одноканальных систем. При $\gamma = 0$ ($T_2 = 0$) $\sigma_0^2 = E(T_1)$, т. е. здесь привлечение второго канала не дает выигрыша в точности (что связано с неоптимальной обработкой отсчетов). При $\gamma \rightarrow 1$ из (16) получим

$$\lim_{T_2 \rightarrow T_1} \sigma_0^2 = E(T_1) + \frac{T_1}{2} \left. \frac{\partial E}{\partial T_\Phi} \right|_{T_\Phi = T_1}. \quad (16')$$

Поскольку зависимость $E(T_\Phi)$ — убывающая, то в (16') $\lim_{T_2 \rightarrow T_1} \sigma_0^2 \leq E(T_1)$. В отличие от указанного случая оптимального выбора k (при котором $k_0 \rightarrow \infty$), при конечном k и $\gamma \rightarrow 1$, как это видно из (14'), $\sigma_0^2 = E_1 = E_2$.

Из выражения (16) следует, что $\frac{E(\gamma T_1)}{E(T_1)} < \frac{1}{\gamma^2}$, т. е. зависимость $E(T_\Phi)$ убывает не быстрее, чем $1/T_\Phi^2$. Как было показано в [3], при достаточно больших $\alpha = T_\Phi/T$ дисперсия $E(T_\Phi)$ приближенно обратно пропорциональна T_Φ^2 и может быть представлена в виде разложения по степеням $1/\alpha$, начиная со второй, т. е. $E(T_\Phi) \approx \sum_{i=2}^{\infty} \frac{k_{i-1}}{T_\Phi^i}$. Несложно убедиться, что при подстановке этого выражения в (16) составляющая погрешности, пропорциональная T_Φ^{-2} исключается. Ограничиваясь двумя членами разложения, при $k_2 \neq 0$ получим

$$\sigma_0^2 \approx \frac{k_2}{T_1^3 \gamma (1 + \gamma)}. \quad (17)$$

Из (17) следует, что в рассматриваемой комплексной системе с ростом T_Φ σ_0^2 также стремится к нулю, но существенно быстрее, чем в соответствующей одноканальной системе: дисперсия σ_0^2 обратно пропорциональна T_Φ^3 (или более высокой степени при $k_2 = 0$), а не T_Φ^2 . Характер зависимости от T_Φ одинаков для всех $\gamma \neq 0$, но с ростом γ погрешность уменьшается. При $T_1 > T_2$ минимум погрешности имеет место при выборе $T_2 \rightarrow T_1$.

Воспользовавшись выражениями для $E(T_\Phi)$, приведенными в [3] для различных видов статистической структуры изучаемого метеорологического элемента, из (16) несложно определить дисперсию погрешности σ_0^2 для конкретных случаев. В качестве примера на рис. 2 приведены рассчитанные на ЦВМ зависимости дисперсии σ_0^2 от $\alpha_1 = T_1/T$ для корреляционной функции $R_x(t) = \sigma_x^2 e^{-a|t|}$ при $\beta = aT = 10$ и различных значениях m и γ . Приведенные кривые отчетливо иллюстрируют общие выводы, полученные выше. Кривые 1, для которых $\gamma = 0$, соответствуют одноканальной системе, остальные кривые — двухканальной. Как следует из рис. 2, кривые при $\gamma \neq 0$ при всех α лежат ниже кривых 1 и тем в большей степени, чем больше γ .

Поскольку по обеим осям на рис. 2 используется логарифмический масштаб, зависимостям k_1/α^2 и k_2/α^3 соответствуют падающие прямые с разным наклоном (2 и 3 декады по вертикальной оси на 1 по горизонтальной). Из рис. 2 видно (особенно при $m=1$), что в области больших α характер кривых близок к указанному: наклон кривых 2, 3 и 4 примерно одинаков (что связано с одинаковым характером зависимости σ^2 от T_1 при разных γ — выражение (17)) и заметно больше, чем кривых 1.

Использование рассматриваемой системы позволяет заметно повысить точность по сравнению с одноканальной и тем в большей степени, чем больше γ ($\gamma \leq 1$) и постоянная времени прибора T_1 . Например, при $\beta = 10$ и $m=1$ при $\alpha=3$ переход от $\gamma=0$ к $\gamma=0,95$ уменьшает дисперсию почти на два порядка, при $m=5$ уже при $\alpha=0,4$ эта величина составляет 20 раз. Практически выбор γ , весьма близких к 1, нецелесообразен, так как при этом возрастают требования к стабильности приборов и точности измерений.

Сравнение точности двух методов при некотором фиксированном значении постоянной времени прибора требует пояснения, поскольку теоретически для обоих методов, увеличивая T_Φ (или T_1 и T_2), можно получить сколь угодно малую погрешность. Практически возможность увеличения T_Φ (и точности) ограничена влиянием нестабильности T_Φ и случайных погрешностей отсчетов; влияние последних, например, резко возрастает с увеличением T_Φ . Рассматриваемая система позволяет повысить точность с учетом указанных факторов или уменьшить требования к стабильности T_Φ и величине случайной погрешности. В области малых α выигрыш, обеспечиваемый рассматриваемой двухканальной системой, невелик, что

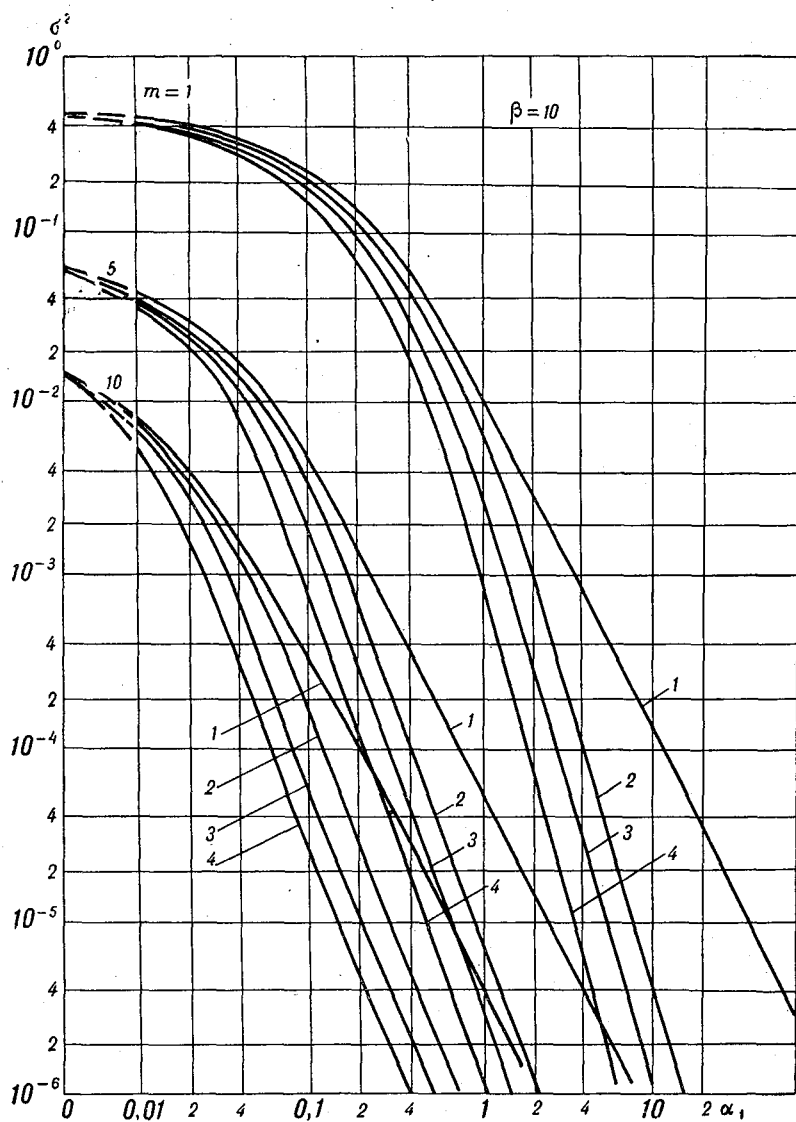


Рис. 2.

1) $\gamma=0$; 2) $\gamma=0,2$; 3) $\gamma=0,5$; 4) $\gamma=0,95$.

говорит о неэффективности используемой обработки для этой области.

В заключение необходимо отметить, что в качестве входных фильтров $B\Phi_1$ и $B\Phi_2$ рассматриваемой двухканальной системы могут выступать не только два независимых датчика с разной инерцией, но и два электрических фильтра, подключенных к общему выходу одного датчика (например, два однозвенных RC -фильтра). Второе решение имеет определенные преимущества с точки зрения стабильности постоянных времени. Приведенный пример показывает, что реализация комплексной системы в ряде случаев не связана с заметным конструктивным ее усложнением. Использование комплексных систем для метеорологических измерений может представлять заметный интерес.

ЛИТЕРАТУРА

1. Катковник В. Я., Полуэктов Р. А. Многомерные дискретные системы управления. М., «Наука», 1966.
2. Персин С. М. Некоторые вопросы синтеза аналого-дискретных фильтров и репрезентативность метеорологических измерений. — Труды Всесоюзного симпозиума по применению статистических методов в метеорологии. Л., Гидрометеониздат, 1971.
3. Персин С. М. Анализ погрешности нахождения средних по результатам ряда дискретных опросов инерционного прибора. — Труды ГГО, 1971, вып. 259.
4. Персин С. М. Способы повышения точности кодирующих устройств посредством автоматического исключения ошибок кодирования. — Труды ГГО, 1963, вып. 112.
5. Чанг Ш. С. Синтез оптимальных систем автоматического управления. М., «Машиностроение», 1964.
6. Челпанов И. Б. Оптимальная обработка сигналов в навигационных системах. М., «Наука», 1967.
7. Юдин М. И. Вопросы методики измерений в связи с закономерностями пульсаций метеорологических элементов. — Труды ГГО, 1972, вып. 292.
8. Petersen D. P., Middleton D. On representative observations. — Tellus, 1963, v. 15, No. 4.

О ВЫБОРЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИБОРА ПРИ ДИСКРЕТНОМ ИНТЕГРИРОВАНИИ

Для метеорологических приложений большой интерес представляют средние значения различных элементов за заданные временные интервалы. Корректное нахождение средних требует интегрирования непрерывного процесса, что связано с определенными техническими трудностями и усложнением схемы, а в ряде случаев практически невозможно. Поэтому широкое распространение получили различные методы численного интегрирования, при которых интегрирование непрерывного процесса заменяется обработкой его дискретных отсчетов [1—3]. При получении отсчетов целесообразно осуществлять предварительное сглаживание процесса, что при рациональном выборе динамических характеристик осредняющего прибора (входного фильтра) позволяет резко повысить точность при том же числе обрабатываемых отсчетов [4]. При взятии отсчетов по осредняющему прибору сравнительная оценка эффективности известных методов численного интегрирования может существенно меняться.

В работе [4] рассматривалась погрешность различных методов дискретного интегрирования при использовании в качестве датчика прибора первого порядка. Ниже приводится аналогичный анализ для аperiodического прибора второго порядка.

Запишем передаточную функцию прибора в виде

$$K(p) = \frac{k}{T_1 p + 1} + \frac{1-k}{T_2 p + 1} = \frac{T_3 p + 1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}, \quad (1)$$

где $T_3 = kT_2 + (1-k)T_1$.

Выходной сигнал такого прибора

$$\xi(t) = kz(t, T_1) + (1-k)z(t, T_2),$$

где $z(t, T_\Phi)$ — результат преобразования измеряемого процесса $x(t)$ прибором первого порядка с постоянной времени T_Φ . В дальнейшем примем, что процесс $x(t)$ — стационарный и процесс на выходе прибора — установившийся, т. е. начальными условиями можно пренебречь.

Дисперсия погрешности определения среднего $L = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(t') dt'$

по взвешенной сумме отсчетов прибора с передаточной функцией (1)

$Y = \sum_{j=0}^m a_j \xi(t_j)$, где $\sum_{j=0}^m a_j = 1$, может быть представлена в виде

$$\sigma^2 = \overline{(L - Y)^2} = kE(T_1) + (1 - k)E(T_2) + k(k - 1)E', \quad (2)$$

где $E(T_\Phi) = \overline{[L - W(T_\Phi)]^2}$ — дисперсия погрешности определения среднего L по взвешенной сумме отсчетов прибора первого порядка

$W(T_\Phi) = \sum_{j=0}^m a_j z(t_j, T_\Phi)$ («веса» a_j и моменты отсчетов t_j здесь те же,

что и в Y); $E' = \overline{[W(T_1) - W(T_2)]^2} = D_W(T_1) + D_W(T_2) - 2R_W(T_1, T_2)$, $D_W(T_\Phi)$ — дисперсия оценки $W(T_\Phi)$, E' и $R_W(T_1, T_2)$ — дисперсия разности оценок $W(T_1)$ и $W(T_2)$ и их корреляционный момент.

Выражения (1) и (2) могут быть получены как частный случай из [5], где рассматривалась погрешность определения среднего по отсчетам двух приборов первого порядка с постоянными времени T_1 и T_2 (случай, когда отсчеты двух приборов синхронны и их обработка имеет одинаковый характер, т. е. отличается лишь масштабом — выбором коэффициента k).

Выражение для $R_W(T_1, T_2)$ может быть представлено в виде

$$\begin{aligned} R_W(T_1, T_2) &= \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m a_i a_j R_{z, z_2}(t_i - t_j) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m a_i a_j \frac{1}{T_1 + T_2} \times \\ &\times \left\{ \int_0^\infty R_x(t - t_i + t_j) e^{-t/T_1} dt + \int_0^\infty R_x(t + t_i - t_j) e^{-t/T_2} dt \right\} = \\ &= \frac{T_1}{T_1 + T_2} D_W(T_1) + \frac{T_2}{T_1 + T_2} D_W(T_2), \end{aligned} \quad (3)$$

где $R_{z, z_2}(\tau)$ — взаимнокорреляционная функция процессов $z(t, T_1)$ и $z(t, T_2)$, выражение для которой приведено в [5]; $R_x(\tau)$ — корреляционная функция изучаемого процесса. Выражение для $D_W(T_\Phi)$ может быть получено из (3) при $T_1 = T_2 = T_\Phi$.

С учетом (3) имеем

$$E' = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} [D_W(T_2) - D_W(T_1)]. \quad (4)$$

Поскольку дисперсия E' всегда не отрицательна, из (4) следует, что при $T_1 > T_2$ $D_W(T_2) \geq D_W(T_1)$, т. е. практически независимо от $R_x(\tau)$ и выбора t_j и a_j дисперсия D_W с ростом T_Φ монотонно убывает.

Перепишем выражение (2) в виде

$$\sigma^2 = kE(T_1) + (1 - k)E(T_2) + k(k - 1) \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} [D_W(T_2) - D_W(T_1)]. \quad (2')$$

Выражение (2') связывает погрешность определения среднего по отсчетам прибора второго порядка с дисперсиями $E(T_\Phi)$ и $D_W(T_\Phi)$ для прибора первого порядка.

Не останавливаясь на случае оптимального выбора a_j и t_j , рассмотрим погрешность дискретного интегрирования при использовании весьма простых дискретных фильтров, описанных в [4], т. е.

примем $t_j = j \frac{T}{m}$, $j = 0, 1, \dots, m$ (отсчет времени ведется от начала интервала T), $a_0 = 1/2m - b$, $a_1 = \dots = a_{m-1} = 1/m$, $a_m = 1/2m + b$. При $b = 1/2m$ и $b = 0$ такой фильтр соответствует двум распространенным методам численного интегрирования — методам прямоугольников и трапеций.

Рассмотрим два случая выбора коэффициента k (постоянной T_3) в выражении (1).

1. Примем $k = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$. При этом $T_3 = 0$, т. е. прибор может быть представлен в виде последовательного соединения двух апериодических звеньев первого порядка с постоянными T_1 и T_2 . Для этого случая из выражения (2') имеем:

$$\sigma^2 = \frac{1}{1-\gamma} \left\{ E(T_1) - \gamma E(T_1\gamma) + \frac{\gamma}{1+\gamma} [D_W(\gamma T_1) - D_W(T_1)] \right\}, \quad (5)$$

где $\gamma = T_2/T_1$.

Для используемого дискретного фильтра значения $E(T_\Phi)$ и $D_W(T_\Phi)$ при разном выборе b связаны соотношениями [4]:

$$E(b, T_\Phi) = E\left(\frac{T_\Phi}{T}, T_\Phi\right) + 2\left(\frac{T_\Phi}{T} - b\right)^2 [R_z(0) - R_z(T)], \quad (6)$$

$$D_W(b, T_\Phi) = D_W\left(\frac{T_\Phi}{T}, T_\Phi\right) + 2\left(b^2 - \frac{T_\Phi^2}{T^2}\right) [R_z(0) - R_z(T)], \quad (7)$$

где $R_z(\tau)$ — корреляционная функция процесса $z(t, T_\Phi)$; $E(T_\Phi/T, T_\Phi)$ и $D_W(T_\Phi/T, T_\Phi)$ — значения $E(T_\Phi)$ и $D_W(T_\Phi)$ при $b = T_\Phi/T$. Такой выбор b при обработке отсчетов прибора первого порядка является оптимальным независимо от m и $R_x(t)$. При этом зависимость $E(T_\Phi)$ является убывающей и $\lim_{T_\Phi \rightarrow \infty} E(T_\Phi) = 0$.

Подставляя (6) и (7) в (5), дифференцируя полученное выражение для σ^2 по b и приравнявая производную нулю, получим

$$b_{\text{опт}} = \frac{T_1 + T_2}{T} = \frac{T_1}{T} (1 + \gamma). \quad (8)$$

Таким образом, оптимальное значение b при обработке отсчетов апериодического прибора второго порядка не зависит от m и $R_x(t)$.

При $T_2 = 0$ ($\gamma = 0$) из (5) и (8) приходим к выражениям для прибора первого порядка.

Запишем предельные соотношения для дисперсии σ^2 . При $b=0$ и $b=1/2m$ с учетом выражений для $E(T_\Phi)$ и $D_W(T_\Phi)$ из (5) получим

$$\lim_{T_1 \rightarrow \infty} \sigma^2 = \frac{2}{T^2} \int_0^T (T-t) R_x(t) dt = D_L.$$

$$\text{При } b = b_{\text{опт}} = \frac{1}{T} (T_1 + T_2)$$

$$\lim_{T_1 \rightarrow \infty} \sigma^2 = 2 \frac{T_2^2}{T^2} [R_{z_2}(0) - R_{z_2}(T)],$$

где $R_{z_2}(\tau)$ — корреляционная функция процесса $z(t, T_2)$. Последний предел — дисперсия погрешности нахождения среднего L по среднему за тот же интервал значению процесса $z(t, T_2)$ на выходе прибора с постоянной T_2 . Этот предел равен нулю только при $T_2=0$ (т. е. при использовании прибора первого порядка), при $T_2 \rightarrow \infty$ он равен дисперсии D_L среднего L .

Рассмотрим характер зависимостей σ^2 от параметров T, T_1, T_2, m, b . Пусть $R_x(t) = e^{-\alpha|t|}$. Для этого случая выражения для $E(b, T_\Phi)$ и $D_W(b, T_\Phi)$ приведены в [4].

На рис. 1 в качестве примера приведены зависимости дисперсии погрешности σ^2 от $\alpha_1 = T_1/T$ при $\beta = \alpha T = 1, m$, равном 1 и 5, $b = \alpha_1(1+\gamma)$ и разных значениях γ , меньших 1 (0, 0,1 и 0,95 — соответственно кривые 1, 2 и 4). На этом же рисунке приведены кривые для $b = 1/2m$ при $\gamma=0$ и $\gamma=0,95$ (кривые 5 и 6) и для $b=0$ при тех же γ (кривые 8 и 7), а также кривые 3 для рассмотренной в [5] двухканальной системы (при $b_1 = \alpha_1, b_2 = \alpha_2$ и $\gamma=0,95$).

Как видно из рис. 1, зависимости погрешности определения среднего по отсчетам прибора второго порядка (для всех b и γ , кроме случая $b = \alpha_1(1+\gamma)$ при $\gamma=0$) от постоянной времени T_1 имеют качественно одинаковый характер: σ^2 достигает минимума при конечном значении T_1 , не равном нулю. Независимо от m и $R_x(t)$ кривые для случая $b = \alpha_1(1+\gamma)$ при всех T_1 лежат ниже соответствующих кривых для методов прямоугольников и трапеций, кроме двух точек: при $T_1=0$ оптимальный выбор b соответствует методу трапеций, а при $T_1 = \frac{T}{2m(1+\gamma)}$ — методу прямоугольников. При $T_1 \rightarrow \infty$ и фиксированном γ все кривые стремятся к одному пределу, равному D_L .

Как и для прибора первого порядка, метод трапеций при малых α_1 обеспечивает большую точность, чем метод прямоугольников, при больших α_1 это соотношение меняется на обратное. При оптимальном выборе T_1 и γ метод прямоугольников (более простой и требующий на одно измерение меньше) существенно более точен, чем метод трапеций.

На рис. 2 приведены зависимости от β минимальной дисперсии σ_m^2 , а на рис. 3 — соответствующие оптимальные значения T_1 ($\alpha_1 m$).

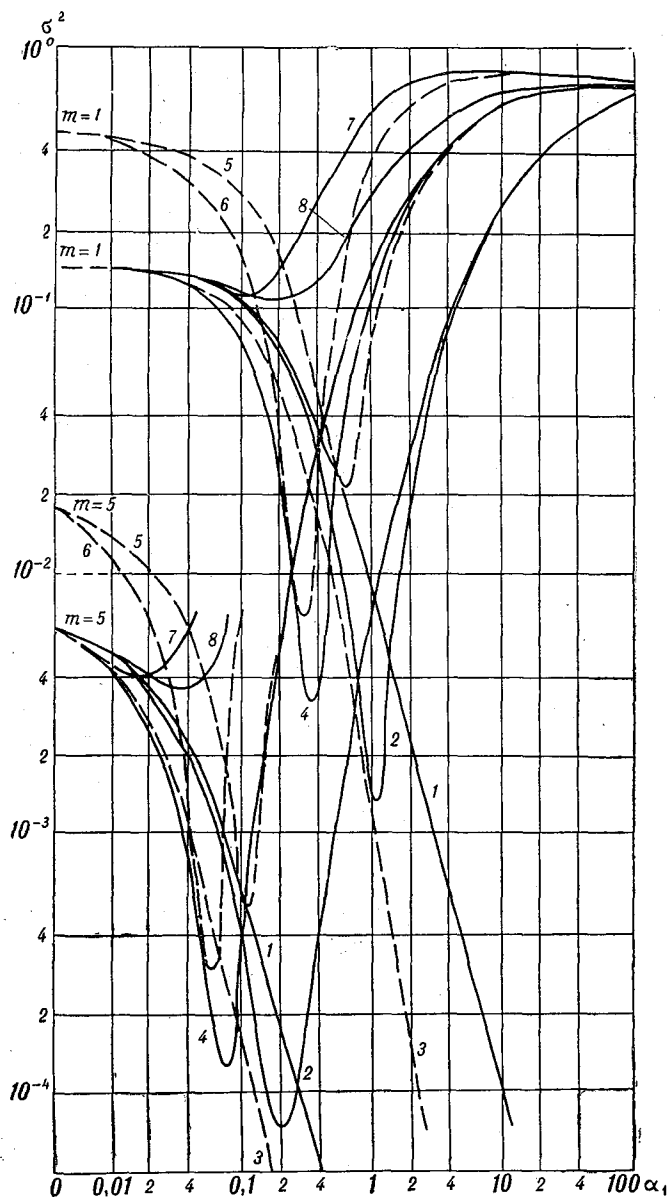


Рис. 1.

Из рис. 1 и 2 видно, что прибор второго порядка позволяет повысить потенциальную точность метода прямоугольников, т. е. уменьшить минимальную погрешность по сравнению с использованием прибора первого порядка ($\gamma=0$). С ростом γ значение σ_m^2 уменьшается, а положение минимума сдвигается в область меньших T_1 .

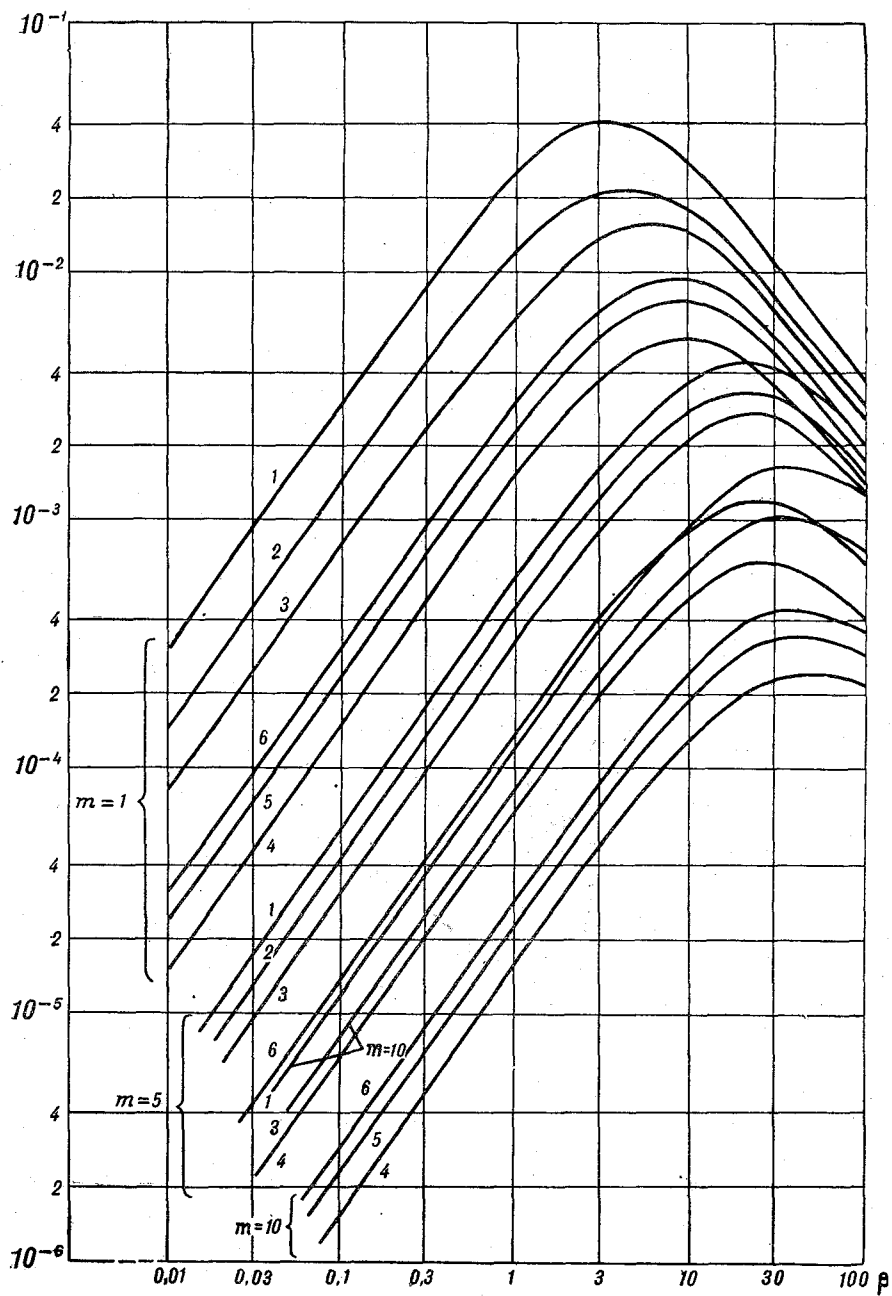


Рис. 2.

Для $b=1/2m$: 1) $\gamma=0$, 2) $\gamma=0,25$, 3) $\gamma=0,95$; для $b=\alpha_1(1+\gamma)$: 4) $\gamma=0,1$, 5) $\gamma=0,25$, 6) $\gamma=0,95$.

Наибольший интерес, очевидно, представляет выбор $b = \alpha_1(1+\gamma)$. Как видно из рис. 1 и 2, для этого случая, в отличие от метода прямоугольников, σ_m^2 возрастает с увеличением γ ($\gamma < 1$).

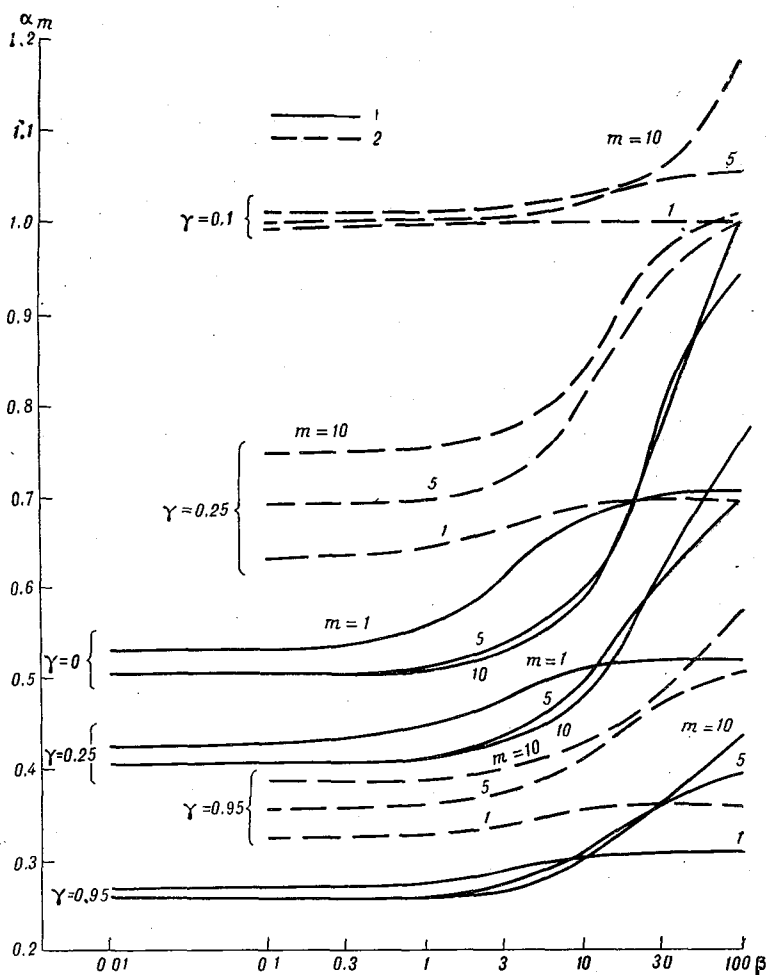


Рис. 3.

1) $b=1/2m$, 2) $b=\alpha_1(1-\gamma)$.

а положение минимума сдвигается также в область меньших α_1 . Эффективность оптимального выбора b по сравнению с $b=1/2m$ тем больше, чем меньше γ .

Теоретически потенциальная точность при $b=b_{\text{опт}}$ и использовании прибора второго порядка ($\gamma \neq 0$) меньше, чем для прибора первого порядка, поскольку при $\gamma \neq 0$ погрешность не может быть

получена сколь угодно малой. Практически же, поскольку возможность увеличения постоянных времени обычно ограничена (в частности, из-за влияния погрешностей отсчетов и нестабильности этих постоянных), прибор второго порядка нередко может дать заметно большую точность. При малых α_1 погрешность для прибора второго порядка существенно меньше; например, при $m=1$, $\beta=1$ и $\alpha_1=0,3$ изменение γ с 0 до 0,95 уменьшает σ^2 более чем на порядок.

При ограничении большей постоянной T_1 некоторой величиной T'_1 и $b=\alpha_1(1+\gamma)$ при $T'_1 < T''_1$ оптимальным является выбор $\gamma=1$, при $T'_1 > T''_1$ зависимость σ^2 от γ имеет минимум при $0 < \gamma < 1$ (T'_1 — положение минимума при $\gamma=1$). Оптимальное значение γ при $T'_1 > T''_1$ тем меньше, чем больше отношение T'_1 к T''_1 . Для метода прямоугольников ($b=1/2m$) оптимальным является выбор $\gamma=1$.

Как следует из рис. 1, в начальной части и в области минимума кривые 4 лежат ниже не только кривой с $\gamma=0$, но и кривых 3 для комплексной двухканальной системы, рассмотренной в [5], при том же γ (здесь $\gamma=0,95$). Это говорит о том, что выбор $b_1=\alpha_1$ и $b_2=\alpha_2$ в комплексной системе в [5] далек от оптимума и при оптимальном выборе b_1 , b_2 и k точность подобной системы может быть существенно повышена.

2. Рассмотрим случай оптимального выбора T_3 (или k) в выражении (1).

Приравнявая производную σ^2 по k нулю, из (2) получим

$$k_{\text{опт}} = \frac{E(T_2) - E(T_1) + E'}{2E'}.$$

Подставляя значение $k_{\text{опт}}$ в (2), имеем

$$\sigma^2 = E(T_1) - \frac{[E(T_1) - E(T_2) + E']^2}{4E'}. \quad (9)$$

Поскольку $E' > 0$ $\sigma^2 \leq E(T_1)$, т. е. в этом случае независимо от выбора дискретного фильтра и соотношения постоянных T_1 и T_2 (в том числе и при $T_2=0$) получаемая погрешность меньше, чем для апериодического прибора первого порядка и прибора второго порядка с $T_3=0$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гандин Л. С. Объективный анализ метеорологических полей. Л., Гидрометеоиздат, 1963.
2. Гандин Л. С., Каган Р. Л. К точности определения средней величины по дискретным данным. — Труды ГГО, 1963, вып. 112.
3. Каган Р. Л. Оптимальные формулы численных квадратур для случайных функций специального вида. — Труды ГГО, 1966, вып. 191.
4. Персин С. М. О погрешности методов нахождения средних с помощью аналого-дискретных фильтров. — Труды ГГО, 1971, вып. 259.
5. Персин С. М. О погрешности аналого-дискретных измерительных систем с параллельными каналами. — См. наст. сб.

М. В. ПОПОВ, Р. А. КРУГЛОВ

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ВЕТРА И ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА АКУСТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ

Известная зависимость скорости распространения C акустических колебаний в движущемся потоке жидкости или газа от их состояния позволяет определять по измеренной C температуру, скорость движения и другие параметры исследуемой среды.

Существует несколько ультразвуковых способов определения скорости распространения акустических колебаний: время-импульсный, основанный на измерении времени прохождения сигнала от излучателя акустических колебаний до приемника; фазовый, основанный на измерении фазового сдвига, возникающего при распространении колебаний в исследуемой среде; частотный импульсно-модулированный, основанный на измерении частоты повторения пакетов или коротких импульсов ультразвуковых колебаний, когда каждый последующий пакет или импульс возбуждается предыдущим, пришедшим на приемник акустических колебаний [1]; частотно-автоколебательный, основанный на измерении частоты колебаний, возникающих в автоколебательной системе с запаздывающей акустической обратной связью [2]; частотно-фазовый, основанный на измерении изменения частоты генератора излучаемых колебаний, компенсирующего фазовый сдвиг, обусловленный движением среды [3].

Из перечисленных частотно-импульсные и фазовый методы являются наиболее изученными и давно уже стали традиционными. Они чаще других применяются для исследования физико-химических свойств различных сред, для измерения расходов и уровней жидкостей, а также для измерения параметров ветра, температуры воздуха и других метеоэлементов, характеризующих состояние атмосферы.

Частотно-импульсные методы имеют ряд недостатков по сравнению с фазовым (влияние задержки в электрической части схемы на точность измерений, меньшая чувствительность, большая

инерционность и, наконец, зависимость погрешности измерения от крутизны фронтов импульсов, снимаемых с приемников ультразвуковых колебаний). Поэтому, несмотря на ряд недостатков фазового метода (нелинейность, принципиальная невозможность исключения взаимного влияния скорости звука и скорости потока друг на друга при их раздельном измерении), последний нашел наибольшее применение [1, 4].

Вместе с тем, получение частотного выхода обеспечивает известные преимущества по сравнению с фазовым (линейность, исключение влияния скорости звука при измерении скорости потока и др.). Поэтому изыскание возможностей устранения недостатков частотно-импульсных методов представляется весьма полезным.

Наиболее существенной, можно сказать, основной трудностью частотно-импульсного метода является невозможность получения достаточно крутых фронтов импульсов, снимаемых с приемников акустических колебаний. Дело в том, что форма акустического импульса при прохождении через исследуемую среду и при преобразовании его в электрический сигнал в приемнике сильно искажается. Возникает запаздывание запуска очередного импульса (или пакета импульсов), причем величина этого запаздывания зависит от крутизны фронтов и длительности импульса, а также от чувст-

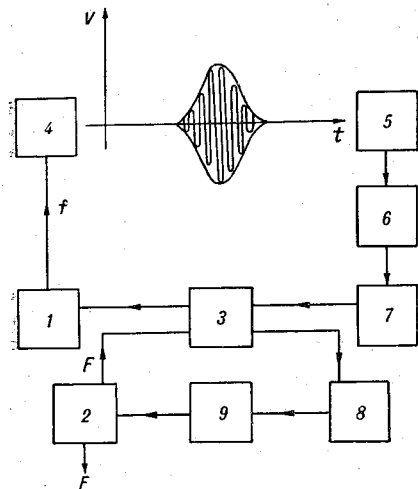


Рис. 1. Блок-схема ультразвукового импульсного устройства с электронным гребенчатым фильтром.

вительности усилителя. Поскольку искажения формы акустического импульса зависят от многих переменных факторов, это паразитное запаздывание непостоянно и компенсировать его полностью не представляется возможным. Положение еще более усугубляется при работе в газовых средах.

Некоторые конструктивные решения [5] позволяют улучшить согласование приемно-передающих преобразователей со средой и несколько уменьшить затягивание фронтов акустических импульсов. Однако при этом значительно усложняется конструкция, увеличиваются габариты излучателей и приемников акустических колебаний.

Исключить указанный недостаток частотно-импульсного метода можно, применяя косвенное измерение частоты следования импульсов по частоте настройки электронного гребенчатого фильтра, определяемой запаздыванием сигнала в цепи обратной связи.

На рис. 1 представлена блок-схема ультразвукового импульсного устройства для измерения скорости распространения акустиче-

ских колебаний в воздухе. В качестве измерительного элемента здесь используется электронный гребенчатый фильтр 3 с запаздывающей акустической обратной связью, цепь которой образована генератором ультразвуковых колебаний 1, излучателем 4 и приемником 5, находящимися в воздушном потоке, а также усилителем 6 и детектором 7.

Генератор с помощью импульсного модулятора 2 создает импульсы ультразвуковых колебаний с частотой заполнения f и частотой следования F . Импульсы с выхода модулятора поступают на генератор через электронный гребенчатый фильтр.

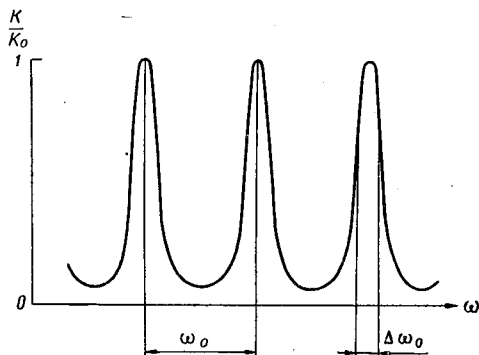


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика электронного гребенчатого фильтра.

Время распространения акустических импульсов от излучателя до приемника определяет степень запаздывания обратной связи и, следовательно, частоту настройки электронного гребенчатого фильтра.

Как известно [6], усилительное устройство с запаздывающей обратной связью представляет собой колебательную систему, в которой может наблюдаться явление резонанса. При достаточно большой величине запаздывания в цепи обратной связи для изменения фазы на 180° требуется относительно малое изменение частоты. Поэтому основной особенностью устройств с запаздывающей обратной связью является то, что в достаточно широкой полосе частот обязательно имеются частоты, при которых обратная связь положительна. При этом явление резонанса может иметь место на всех частотах, кратных $\omega_0 = 2\pi/\tau_{\text{зап}}$, где $\tau_{\text{зап}}$ — время запаздывания в цепи обратной связи.

Такие устройства имеют гребенчатую амплитудно-частотную характеристику (рис. 2) и носят название гребенчатых фильтров. Максимумы характеристики соответствуют положительной обратной связи, минимумы — отрицательной.

Ширина зубца характеристики определяется выражением [7]

$$\Delta\omega_0 = \frac{1-K}{\tau_{\text{зап}}},$$

где K — коэффициент усиления всего кольца.

С точки зрения уменьшения затухания сигнала при его циркуляции в цепи обратной связи гребенчатого фильтра желательно иметь K близким к единице. Однако при $K \rightarrow 1$ резко снижается запас устойчивости системы и обостряется возникновение самовозбуждения, т. е. паразитной генерации.

Если $\tau_{\text{зап}}$ равно периоду следования импульсов на входе гребенчатого фильтра, то спектр сигнала попадает в полосу пропускания фильтра, и с выхода последнего импульсы поступают на амплитудный дискриминатор 8.

При несовпадении частоты следования импульсов с частотой настройки гребенчатого фильтра импульсы через него проходить не будут.

Если изменять частоту следования импульсов F (вручную или автоматически с помощью системы экстремального регулирования 9), то можно добиться равенства этой частоты частоте настройки фильтра (имеется в виду равенство времени запаздывания квазипериоду следования импульсов). Нетрудно показать, что частота F на выходе импульсного модулятора 2 пропорциональна скорости распространения акустических колебаний S относительно излучателя и приемника.

Поскольку $S = C \pm V$, где C — скорость звука относительно среды, V — проекция вектора скорости движения среды на направление распространения акустических колебаний, то измеряемая частота F будет зависеть как от C , так и от V .

Когда направления распространения потока и звука совпадают, частота на выходе 2 равна $F_1 = \frac{C+V}{l}$, при встречных направлениях $F_2 = \frac{C-V}{l}$, где l — расстояние между излучателем и приемником.

Для того чтобы раздельно определить скорость движения среды V или скорость звука относительно среды C , измеряют соответственно разность $F_1 - F_2$, или сумму $F_1 + F_2$ частот при встречном распространении акустических колебаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Катус Г. П. Системы автоматического контроля полей скоростей и расходов. М., «Наука», 1965.
2. Афиногенов Л. П., Попов М. В. Устройство для измерения скорости ветра. Авт. свид. № 236877. Бюлл. изобретений № 7, 1969.
3. Персин С. М., Попов М. В., Персина Э. Л. Способ измерения скорости распространения акустических колебаний в движущейся среде. Авт. свид. № 304503. Бюлл. изобретений № 17, 1971.
4. Бовшеверов В. М., Мордухович М. И. Локальные акустические методы исследования атмосферы. Вестн. АН СССР, 1961, № 9.
5. Kritz J. Flowmeter. Патент США № 2949772, 1962.
6. Моругин Л. А. Импульсные устройства с запаздывающей обратной связью. М., «Советское радио», 1961.
7. Финкельштейн М. И. Гребенчатые фильтры. М., «Советское радио», 1969.

СОДЕРЖАНИЕ

Л. П. Афиногенов, Н. П. Русин. Задачи автоматизации геофизических измерений и научных исследований	3
Г. П. Резников. Анализ физических процессов и погрешностей гигрометрического комплекса, основанного на термодинамическом принципе	15
Д. П. Беспалов. К вопросу об определении влажности воздуха стационарным психрометром	40
В. Е. Боханов. Некоторые характеристики структуры облаков и их приложение к методике измерений нижней границы	50
А. Г. Бройдо. О возможности использования метода теплового баланса для расчета его составляющих	64
С. М. Мандельштам, А. Г. Шулова. Повышение точности определения метеорологического параметра при оптимальном использовании показаний нескольких приборов (оптимальное комплексирование)	74
С. М. Персии. О погрешности аналого-дискретных измерительных систем с параллельными каналами	89
С. М. Персии. О выборе параметров прибора при дискретном интегрировании	101
М. В. Попов, Р. А. Круглов. Усовершенствование частотно-импульсного метода измерения скорости ветра и температуры воздуха акустическими датчиками	109

Труды ГГО, вып. 300

МЕТОДИКА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Редактор Г. И. Слабкович
Техн. редактор И. К. Пелипенко
Корректор Т. В. Алексеева

Сдано в набор 17/I 1973 г. Подписано к печати 4/V 1973 г. М-07307. Бумага 60×90/16, типогр. № 1. Печ. л. 7,25. Уч.-изд. л. 7,76. Тираж 1150 экз. Индекс МЛ-57. Заказ 23. Цена 54 коп. Гидрометеонздат, 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

Задачи автоматизации и геофизических измерений и научных исследований.
А. Финогенов Л. П., Русин Н. П. Труды ГГО, 1973, вып. 300, стр. 3—14.

Кратко рассмотрены история развития и состояние сети, обеспечивающей сбор геофизической информации (актинометрия, тепловой баланс, атмосферное электричество). Обсуждается значение этой информации для народного хозяйства и научных исследований и основные требования к ней по объему, точности и другим характеристикам. Приводится типовая структурная схема полуавтоматической установки для получения геофизической информации. Рассмотрены задачи автоматизации научных исследований в области гидрометеорологии и приведена блок-схема автоматической метеостанции для научных исследований.

Табл. 2. Илл. 2.

УДК 543.275.1

Анализ физических процессов и погрешностей гигрометрического комплекса, основанного на термодинамическом принципе. Резников Г. П. Труды ГГО, 1973, вып. 300, стр. 15—39.

Подробно анализируются физические процессы, происходящие в метрологическом комплексе, для задания и измерения влажности в области положительной и отрицательной температуры. Количественный анализ сопровождается численными оценками составляющих погрешностей. При максимальной погрешности измерения температуры $0,09^{\circ}\text{C}$ максимальная относительная погрешность воспроизведения значения упругости оценивается в $0,62\%$ при $+30^{\circ}\text{C}$ и $1,23\%$ при -43°C . Указывается на возможность применения комплекса в качестве исходного образцового измерительного средства в Гидрометслужбе. Материалы статьи могут быть использованы при инженерных расчетах комплекса и в практике его эксплуатации.

Табл. 4. Илл. 5. Библ. 19.

УДК 551.501.771

К вопросу об определении влажности воздуха стационарным психрометром. Беспалов Д. П. Труды ГГО, 1973, вып. 300, стр. 40—49.

Рассматриваются погрешности определения упругости водяного пара, точки росы и относительной влажности воздуха по измерениям стационарным психрометром без искусственной вентиляции термометров. Приводятся оценки погрешности характеристик влажности, обусловленные инструментальными погрешностями термометров, а также погрешности, связанные с учетом фазового состояния воды на резервуаре смоченного термометра (на батисте); оценены погрешности, связанные с перегревом термометров солнечной радиацией и с флуктуациями температуры сухого и смоченного термометров. Приведены рекомендации по учету систематических погрешностей стационарного психрометра.

Табл. 1. Библ. 15.