

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И КОНТРОЛЮ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

ТРУДЫ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГЛАВНОЙ
ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
им. А. И. ВОЕЙКОВА

Выпуск

493

МЕТОДИКА И АППАРАТУРА
ДЛЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

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



ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1986

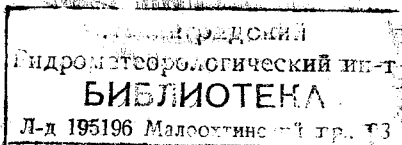
В сборнике содержатся результаты исследований в области усовершенствования методики метеорологических измерений, разработки современных методов измерений и метеорологической измерительной аппаратуры. Содержание статей по усовершенствованию методики измерений составляют результаты разработки методических основ построения и анализа полей основных метеорологических элементов. В этих же статьях приводятся сведения о возможности использования численных моделей атмосферных процессов для анализа и интерполяции результатов наблюдений сети.

Статьи по разработке методов и измерительной аппаратуры содержат в основном результаты по разработке автоматизированных комплексов метеорологической аппаратуры для сети станций и аэропортов.

Сборник рассчитан на специалистов научно-исследовательских учреждений, занимающихся разработкой и совершенствованием системы получения и анализа гидрометеорологической информации, постановкой и производством метеорологических измерений, разработкой измерительной аппаратуры и ее эксплуатацией, а также обобщением и контролем достоверности результатов наблюдений. Сборник может также служить полезным пособием для учащихся вузов при изучении соответствующих разделов курса метеорологических измерений.

The publication contains the results of studies on improving techniques for meteorological measurements, developing up-to-date methods for measurements and meteorological measuring equipment.

The publication is meant for specialists of research institutions dealing with development and improvement of the system for obtaining and analysis of hydrometeorological information, organization and carrying out meteorological measurements, development of measuring equipment and its operation as well as generalization and reliability control of observations.



335565

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ОБ ИНТЕНСИВНОСТИ ОСАДКОВ НА СЕТИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Интенсивность выпадения атмосферных осадков, как жидких, так и твердых, относится сейчас к числу тех метеорологических характеристик, заинтересованность в которых нарастает лавинообразно. Еще совсем недавно традиционными потребителями информации об интенсивности осадков, преимущественно жидких, были гидрологи, занятые изучением и прогнозированием динамики стока, а также почвоведы и агрофизики, исследующие эрозию почв и динамику почвенной влаги. Если первых интересуют лишь сведения о ливнях, дающих за короткое время значительное количество осадков, то вторым важны все дожди, в том числе и длительные, малоинтенсивные.

С развитием и усложнением современной системы хозяйствования не только расширяется круг потребителей сведений об интенсивности осадков, но и требуются такие ее характеристики, которые ранее не определялись и не обобщались. Извлечение же этой информации из существующего архива массовых наблюдений за интенсивностью либо чрезвычайно трудоемко, либо вообще невозможно, так как исходный материал наблюдений — записи плевниографов — не хранится.

В числе наиболее важных можно назвать следующие направления использования сведений об интенсивности осадков.

1. В хозяйственной деятельности и охране окружающей среды:

- при проектировании и эксплуатации гидроэнергетических и гидромелиоративных сооружений на реках с дождевым питанием;
- при проектировании и эксплуатации строительных объектов и ограждающих конструкций;
- при эксплуатации высоковольтных линий электропередачи — для учета потерь электроэнергии при осадках;
- при эксплуатации систем радиосвязи — для учета влияния осадков разной интенсивности на ослабление радиоволн;
- при определении скорости вымывания из воздуха атмосферных загрязнений;
- при прогнозировании лавиноопасности и селеопасности в горных районах;
- при обслуживании авиалиний и судовождения — для определения дальности видимости во время осадков.

Обширная библиография, отражающая растущее внимание к этим вопросам, содержится в работах /2, 3, 15/.

2. В сфере научных исследований:

- для косвенного расчета количества осадков на акватории океанов и в полярных широтах, где непосредственное измерение количества осадков невозможно или ненадежно /10, 21—24/;
- для определения труднонаблюдаемых, но тесно связанных с интенсивностью характеристик осадков, таких, как распределение капель дож-

дей по размерам (обзор таких работ содержится в /15/) или распределение количества и продолжительности осадков по грациям их интенсивности /6, 9/;

— для исследования полей осадков радиолокационным методом, который основан на связи характеристик радиолокационной отражаемости с интенсивностью осадков (см. библиографию в /15/);

— для решения методических вопросов при конструировании измерителей количества и интенсивности осадков, например для определения их пороговой чувствительности и рабочего диапазона.

Кроме того, лишь в самой начальной стадии находится исследование интенсивности как климатической характеристики режима выпадения осадков. В пределах СССР существуют лишь сведения о максимальном количестве осадков за интервалы времени от 24 часов до 5 минут (табл. 7 "Справочника по климату СССР" /20/), а какие-либо обобщения в масштабах континентов или всего мира, необходимые для глобальных водно-балансовых исследований, вообще отсутствуют.

Рассматривая вопрос о том, насколько современные потребности в информации удовлетворяются существующей системой ее получения, следует остановиться на таких его аспектах:

— в каком виде нужна эта информация, т. е. какие именно ее характеристики используются;

— насколько существующие приборы и методы определения интенсивности способны дать эти характеристики;

— насколько эти возможности осуществляются в общей системе метеорологических наблюдений.

Как показывает длительный опыт использования метеорологической информации в хозяйственной деятельности, вид и степень ее использования в большой мере зависят от квалификации потребителя, от его осведомленности о существующих видах информации и способах ее применения. Не всегда потребитель может самостоятельно выбрать наиболее рациональный вид и способ использования информации и нуждается в квалифицированной консультации специалиста-метеоролога. Кроме того, круг потребителей и специфика требований непрерывно расширяются, и не всегда легко предугадать тот вид информации, который окажется необходимым в ближайшее время. Поэтому, очевидно, целесообразно исходить из такого принципа: получать максимум информации, который способно дать существующее средство измерения, и представлять ее с максимальной полнотой и точностью — насколько позволяет разумная мера стоимости и трудоемкости.

Следует признать, что существующая система наблюдений и обработки данных об интенсивности осадков не соответствует такому принципу.

Плүвиограф — стандартный сетевой прибор, предназначенный для регистрации интенсивности жидких осадков, как всякий самописец способен давать разнообразную информацию об измеряемом элементе, гораздо более полную, чем можно получить из дискретных измерений. Вид информации, получаемой от самописца, определяется методикой обработки записей прибора и способом представления результатов. Качество этой ин-

формации зависит от конструктивных свойств прибора и методов его эксплуатации. Что касается качества данных плувиографа, то в последние годы появилось несколько работ, посвященных исследованию погрешностей этого прибора и оценке достоверности получаемых с его помощью сведений /5, 12, 13/. Показано, что при надлежащем надзоре и правильной эксплуатации прибор способен давать сведения с достаточной для практики точностью. Систематические погрешности при определении интенсивности оказались в тех же пределах, что и при измерении осадков стандартным осадкомером. В работе /5/ предложена методика их учета.

Сложнее обстоит дело с методикой обработки записей плувиографа и способом представления полученной информации. Описанная в действующем на сети Наставлении /19/ методика обработки приспособлена, главным образом, для гидрологических целей. Обрабатываются и публикуются в ежемесячниках лишь значительные дожди (с количеством осадков $\geq 2,5$ мм), причем их интенсивность фиксируется весьма приближенно — с 10-минутным интервалом осреднения. Такая обработка не позволяет получить ни максимальных значений интенсивности, наблюдающихся обычно в течение более коротких периодов, ни осредненных месячных значений, важных для исследования режима выпадения осадков. Кроме того, получаемая информация оказывается несравнимой с данными основного режимного обобщения — "Справочника по климату СССР" /20/, где приводится максимальная интенсивность за 5-минутный интервал, чего по результатам современной обработки получить уже нельзя. Следует также подчеркнуть, что большинство известных исследований, так или иначе касающихся интенсивности осадков (например, /1—3, 5, 6, 11/), сделаны на материале плувиографических наблюдений за те годы, когда применялся другой вид обработки плувиограмм — так называемая обработка дождей по характерным точкам. Введенная с 1946 г. /16/, она несколько упрощалась и огрублялась в последующих изданиях Наставлений /17, 18/ и просуществовала до 1969 г.

Главной причиной отмены в 1969 г. обработки по характерным точкам была ее трудоемкость, большая мера субъективности при выделении характерных точек на кривой записи дождя и значительная случайная погрешность определения средней интенсивности за каждый отдельный интервал времени, тем большая, чем меньше этот интервал и чем слабее дождь.

Однако, как показано выше, существующая с 1969 г. система обработки плувиограмм не удовлетворяет усложняющимся запросам к информации об интенсивности, и основной базой для получения необходимых сведений остается архив данных с обработкой по характерным точкам. При этом оказывается, что для различного рода обобщений и режимных характеристик упомянутые значительные случайные погрешности этой обработки не имеют существенного значения, и главным дефектом ее являются те упрощения в обработке малоинтенсивных дождей, которые вызывают систематические искажения кривых распределения сумм и продолжительности дождей по градациям их интенсивности /1, 2, 5/. Нужно отметить, что эти кривые распределения (дифференциальные или

интегральные), впервые приведенные в работе /1/, являются наиболее емкой и разносторонней формой представления сведений об интенсивности, позволяющей без потерь реализовать информативные возможности самописца. Однако по данным современной обработки они получаются сильно деформированными из-за большого интервала осреднения и потери малых дождей, а материалы, обработанные по характерным точкам, оказываются искаженными в области малых интенсивностей (см. /5/).

Таким образом, для существующей системы получения информации об интенсивности жидких осадков характерно явное несоответствие: при настоятельной потребности в данной информации и наличии прибора, способного удовлетворить эту потребность, методика обработки и представления его данных чрезвычайно затрудняет или делает невозможным их использование. Несоответствие состоит еще и в том, что практика требует все более детальных и точных сведений об интенсивности, а развитие системы массового ее определения происходит в обратном направлении — в сторону огрубления и упрощенного представления результата.

Предложенная в работе /14/ система автоматизированной обработки лент плювиографа является, на наш взгляд, весьма перспективной для устранения этих несоответствий. Сокращая трудоемкость обработки по характерным точкам в 6—10 раз и устраняя субъективность при выделении участков записи дождей с одинаковой интенсивностью, эта система оказывается свободной от главных недостатков, из-за которых в свое время была отменена ручная обработка по характерным точкам. Данная система осуществляется с помощью автономного прибора, который является устройством ввода для ЭВМ. Программа обработки предусматривает расчет характеристик дождя, распечатку их на бланке печатающего устройства ЭВМ и перфорацию на перфоленте. Таким образом, включение этой системы в общий комплекс механизированной обработки стандартных метеорологических наблюдений оказывается вполне органичным и практически осуществимым.

Следует упомянуть еще один вид информации об интенсивности осадков, получаемой из сетевых наблюдений. Начиная с 1875 г., метеонаблюдатель, фиксируя наличие атмосферных явлений, в том числе и осадков, должен визуально оценивать их интенсивность по трем градациям: "слабые" (индекс 0), "умеренные" (без индекса) и "сильные" (индекс 2). Если бы оказалось возможным определить количественные эквиваленты для этих визуальных характеристик, мы получили бы хотя и приближенную, но обширнейшую дополнительную информацию об интенсивности дождей за весьма длительный период и не только на территории СССР, но и на акватории Мирового океана (по судовым наблюдениям). Однако специальное исследование /4/, проведенное на основе сопоставления визуальных отметок интенсивности и ее численных значений, полученных по данным плювиографа, привело к следующим выводам:

— в каждом конкретном пункте измерения существуют некоторые закономерные соотношения между количественными характеристиками интенсивности разных видов дождей, но на разных станциях они совершенно различны;

— определить универсальные численные эквиваленты для визуальных характеристик интенсивности дождей оказалось невозможным, т. е. количественной информации визуальные отметки не дают;

— в связи с этим никаких количественных обобщений характеристик интенсивности дождей на основе визуального ее определения сделать, очевидно, невозможно.

Все вышесказанное относится к интенсивности дождей. Что же касается интенсивности снегопадов, то об этой характеристике почти ничего не известно. То обстоятельство, что до сих пор нет стандартного сетевого прибора для определения интенсивности твердых осадков, объясняется двумя причинами. Во-первых, достаточно точное измерение количества твердых осадков — задача сама по себе чрезвычайно непростая и до сих пор в нужной мере не решенная. Во-вторых, практические потребности в оперативных данных об интенсивности снегопадов до последнего времени были несравненно меньше, чем для жидких осадков. Поэтому возникшие сейчас требования к сведениям о режиме интенсивности твердых осадков приходится удовлетворять не данными непосредственных наблюдений, а приближенными результатами косвенных расчетов, основанных на связи средних характеристик интенсивности с другими хорошо изученными метеорологическими параметрами [7—9]. Однако не вызывает сомнений необходимость создания устройства для непосредственного измерения интенсивности твердых осадков, способного давать регулярную информацию об этой характеристике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Г. А. О практическом использовании кривых распределения продолжительностей и слоев дождевых осадков по интенсивности их выпадения. — Тр. ГГО, 1966, вып. 195, с. 113—119.
2. Алибегова Ж. Д. Структура полей жидких осадков за короткие интервалы времени. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. — 134 с.
3. Алибегова Ж. Д., Элизбарашвили Э. Ш. Статистическая структура атмосферных осадков в горных районах. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 136 с.
4. Ашкинази Т. В., Богданова Э. Г. О количественной оценке визуальных характеристик интенсивности дождей. — Тр. ГГО, 1980, вып. 435, с. 52—55.
5. Богданова Э. Г., Горбунова И. Г., Макаров Ю. В. Погрешности определения интенсивности дождей с помощью стандартного плевниографа. — Тр. ГГО, 1978, вып. 416, с. 20—35.
6. Богданова Э. Г. О расчете некоторых характеристик интенсивности дождей. — Метеорология и гидрология, 1979, № 2, с. 40—44.
7. Богданова Э. Г. О возможности косвенного определения интенсивности твердых осадков. — В кн.: Материалы гляциологических исследований. Хроника, обсуждения, 1980, вып. 37, с. 161—165.
8. Богданова Э. Г., Струзер Л. Р., Ашкинази Т. В. Продолжительность и интенсивность твердых осадков в Северной Америке. — В кн.: Материалы гляциологических исследований. Хроника, обсуждения. М., 1980, вып. 37, с. 89—

9. Б о г д а н о в а Э. Г. Использование стандартной метеорологической информации для определения режимных характеристик продолжительности и интенсивности осадков. — Тр. ГГО, 1982, вып. 461, с. 44—56.
10. Б о г д а н о в а Э. Г. Метод расчета интенсивности и количества осадков на океанах по связи с метеопараметрами, измеряемыми на акватории. — Метеорология и гидрология, 1982, № 8, с. 54—61.
11. В и н о г р а д о в Ю. Б. Вопросы гидрологии дождевых паводков на малых водосборах Средней Азии и Южного Казахстана. — Л.: Гидрометеоздат, 1967. — 262 с. (Тр. КазНИГМИ. Вып. 28.)
12. Г о л у б е в В. С., З о т и м о в Н. В., З ы к о в Н. А. Некоторые результаты исследований жидких осадков в районе Валдайской возвышенности. — Тр. ГГИ, 1965, вып. 123, с. 5—14.
13. Г о р б у н о в а И. Г., Б о ж е н к о В. Г., П а в л о в а Н. П. О систематических погрешностях стандартного плевниографа. — Тр. ГГО, 1968, вып. 215, с. 125—134.
14. Л и в а н о в а Н. А. и др. Система автоматизированной обработки лент плевниографа. — Тр. ГГИ, 1981, вып. 279, с. 35—42.
15. Л и т в и н о в И. В. Осадки в атмосфере и на поверхности земли. — Л.: Гидрометеоздат, 1980. — 208 с.
16. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3, ч. I. — Л.: Гидрометеоздат, 1946. — 200 с.
17. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3, ч. I. — Л.: Гидрометеоздат, 1954. — 308 с.
18. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3, ч. II. — Л.: Гидрометеоздат, 1958. — 86 с.
19. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3, ч. II. — Л.: Гидрометеоздат, 1969. — 115 с.
20. Справочник по климату СССР. — Л.: Гидрометеоздат, 1967—1970. Ч. IV, вып. 1—34.
21. С т р у з е р Л. Р., Б р я з г и н Н. Н. Методика вычисления поправок к измеренным величинам атмосферных осадков в полярных районах. — Тр. ГГО, 1971, вып. 260, с. 61—76.
22. Тихий океан. Т. I. Метеорологические условия над Тихим океаном. — М.: Наука, 1966.
23. Oceanic Water Balance. A report prepared by a joint JOC/WMO Panel of Experts. WMO, N 442, Geneva, Switzerland, 1976, p. 23—66.
24. Т u c k e r G. B. Precipitation over the North Atlantic Ocean. Quarterly Journal of the Royal Met. Soc., vol. 87, N 372, April 1961, p. 147—159.

А. В. Завьялова, В. С. Копычева, Т. П. Светлова

О ВЫБОРЕ АЛГОРИТМА ДЛЯ ЗАДАЧИ КОНТРОЛЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕЖИМНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО СРОКАМ

Анализ результатов контроля режимной метеорологической информации, реализованного в системе оперативной обработки метеорологичес-

ких данных на ЭВМ "Минск-22", выявил низкую эффективность алгоритмов обнаружения ошибочной информации в средних за месяц значениях по срокам.

Было подсчитано /6/, что для дополнительного анализа специалисту, принимающему решение о достоверности информации, выдается около 10 % всех контролируемых средних значений элементов за месяц по срокам. Аналогичный показатель для средних месячных значений составляет не более 1-2 %.

Основной недостаток алгоритма заключается в том, что количество значений, выданных в качестве "сомнительных" для последующего контроля специалисту в сроки 0, 3, 12 и 15 часов, вдвое превышает этот показатель за любой другой срок.

В действующей в настоящее время программе контроля режимной информации для ЭВМ "Минск-32" предпринята попытка повысить эффективность контроля значений за счет увеличения критериев достоверности /7/. Такое решение представляется вообще неверным, т. к. оно не устраняет влияния суточного хода на результат интерполяции. Это означает, что горизонтальный контроль методом интерполяции с использованием в качестве критерия достоверности невязок, равных по величине 4σ , где σ — средняя квадратическая невязка интерполяции (вместо критерия, равного 2σ), не в состоянии обеспечить отбраковку неправильных значений в сроки 06, 09, 18 и 21, хотя и приводит к некоторому уменьшению ложных отбраковок в сроки 0, 3, 12 и 15 часов. Оценки средних и средних квадратических значений невязок интерполяции основных метеорологических элементов по восьми срокам, выполненные в работе /6/ по результатам оперативного контроля, только подтверждают выказанные выше соображения.

Отмеченные выше недостатки обуславливают необходимость разработки принципиально новых алгоритмов контроля режимной информации по срокам, способных в условиях отсутствия норм для этих данных обеспечить не только уверенное распознавание ошибочной информации, но и восстановление пропущенных и забракованных значений.

Идея использования временной интерполяции суточного хода для контроля и восстановления метеорологических элементов не нова. Возможность аппроксимации суточного хода метеорологических элементов и использования различных интерполяционных формул и вариантов выбора опорных сроков при интерполяции неоднократно обсуждалась в литературе /2, 5, 8, 10 и др./, однако большинство предложенных формул и вариантов выбора опорных сроков при восстановлении режимной информации, как правило, позволяют аппроксимировать с удовлетворяющей практические цели точностью только часть кривой суточного хода элемента в окрестности восстанавливаемого срока. При этом точность аппроксимации и восстановления значений по срокам существенно зависит от положения восстанавливаемого срока на кривой суточного хода элемента /3/.

Анализ показывает, что максимальные ошибки восстановления для элементов, имеющих достаточно хорошо выраженный суточный ход, ха-

рактены для сроков, близких к экстремумам кривых, и нередко в несколько раз превосходят ошибки восстановления в другие сроки (см., например, /2/). В работе /3/ было показано, что существенный выигрыш в точности аппроксимации кривых суточного хода можно получить, если фиксировать положение аппроксимирующей параболы соответственно положению максимума и минимума кривой суточного хода элемента.

Восполнение отсутствующих и восстановление забракованных при контроле средних месячных значений элементов может достаточно успешно осуществляться с использованием интерполяционных полиномов, построенных по набору заданных для каждой станции "влияющих" станций, т. е. путем пространственной интерполяции. Такая методика, как показали расчеты, обеспечивает с вероятностью 0,95 интерполяцию средних за месяц значений с погрешностями, не превышающими $0,5^{\circ}\text{C}$ по температуре воздуха, 1°C по температуре почвы, 3% по относительной влажности, 1 м/с по скорости ветра.

Возможность контроля и восстановления средних месячных значений по срокам путем пространственной интерполяции при оперативной обработке данных ограничивается отсутствием норм; между тем, различия в суточном ходе метеорологических элементов на контролируемых и "влияющих" станциях при контроле информации по срокам сказываются еще более заметно, чем для средних за месяц. По этой причине пространственная интерполяция средних значений по срокам при ее практической реализации в системе контроля не обеспечивает необходимой эффективности последнего.

Нормативных документов, содержащих требования к точности восстановления пропущенных и забракованных данных для получения рядов непрерывных наблюдений и обеспечения полноты выборок, в настоящее время нет.

Из общих соображений ясно, что указанная точность должна быть близка к точности гидрометеорологических наблюдений. Сведения о существующей точности метеорологических наблюдений в пункте за срок, сутки и месяц, публикуемых в метеорологических ежемесячниках и месячных таблицах наблюдений, приводятся в работе /8/, где точность наблюдений выражена через значение средней квадратической ошибки. В качестве средней ошибки приводится средняя квадратическая погрешность σ , а в качестве предельной — величина 2σ . Известно, что при временном осреднении ошибки наблюдений уменьшаются пропорционально \sqrt{n} , где n — число наблюдений. Исходя из этого, можно утверждать, что требуемая точность интерполяции средних месячных значений по срокам для всех элементов близка к значениям, приведенным для месяца.

Это означает, например, для температуры воздуха, имеющей наиболее резко выраженный суточный ход, что средняя квадратическая невязка интерполяции (и восстановления) средних за месяц значений ее по срокам не должна быть более $0,3\text{--}0,4^{\circ}\text{C}$, а предельная — не более $0,6\text{--}0,7^{\circ}\text{C}$.

Естественно, что интерполяционные формулы, не обеспечивающие такой точности интерполяции для всех сроков наблюдения, не могут быть взяты за основу при разработке оперативной программы, поскольку в

этом случае процент обнаруживаемых ошибок окажется несоизмеримо малым по сравнению с количеством выделенных сомнительных значений.

С другой стороны, как было показано в /3/, чтобы выявлять неверные значения метеорологических элементов с достаточной надежностью, интерполяционные формулы должны удовлетворять двум, до некоторой степени противоречивым требованиям: обладать высокой точностью аппроксимации наблюдаемых значений метеорологических элементов и одновременно высокой чувствительностью к ошибкам в исходных данных. Иначе говоря, невязки интерполяции должны быть малы при интерполяции правильных значений и достаточно велики, когда в исходной информации содержатся ошибки.

К сожалению, формулы, предлагаемые в работах /2, 5, 8 и 9/, в отсутствие норм всем перечисленным требованиям (или какому-либо одному) не отвечают.

В указанном смысле более всего отвечающей требованиям, перечисленным выше, можно считать формулу

$$T(\tau) = A\tau^2 + B\tau + C. \quad (1)$$

Аппроксимация отдельных участков суточного хода элемента с помощью полинома 2-го порядка обеспечивает, по данным работы /4/, для 30 станций Латвийской ССР максимальное значение невязки интерполяции между вычисленным и заданным значениями температуры воздуха в сроки наблюдений, не превышающее $0,35^\circ\text{C}$ в 90 % случаев.

Выбор оптимальной интерполяционной формулы в рассматриваемой задаче определяется конкретными особенностями кривой суточного хода на аппроксимируемом участке. Здесь решающее значение приобретает соответствие дифференциальных свойств аппроксимирующего полинома и кривой суточного хода.

Увеличение степени полинома в рассматриваемой задаче, как правило, не дает выигрыша в точности интерполяции, поскольку при аппроксимации кривой суточного хода полиномом 3-го порядка для описания особенностей последней приходится привлекать как минимум 5 последовательных сроков наблюдений, т. е. описывать поведение кривой суточного хода на 12-часовом отрезке. Такое увеличение интервала аппроксимации ухудшает не только точность интерполяции, но и чувствительность интерполяционной формулы к ошибкам в исходной информации.

Иллюстрацией высказанного соображения могут служить результаты, полученные в работе /2/, где интерполяция с помощью полинома 3-го порядка средних месячных значений температуры воздуха по срокам осуществлялась для станций Минск и Радошковичи, т. е. для условий, близких к условиям Латвийской ССР.

Ограниченность объема материала, на котором проводилась проверка предложенной в /2/ схемы контроля, и отсутствие сведений о дисперсии невязок не дают оснований считать полученные результаты достаточно обнадеживающими. Более того, они свидетельствуют как раз об обратном. Достаточно сказать, что невязки интерполяции температуры воздуха на

станции Минск в июле 1975 г. в условиях, аналогичных Северо-Западному УГКС, изменялись в значительных пределах: от 0,3 до 2,8 °С при одном из вариантов выбора опорных сроков для интерполяции и от 0,0 до 1,6 °С в средних по трем вариантам.

Приведенный в этой же работе пример с искажением температуры воздуха в один из сроков обнаруживает и недостаточную чувствительность схемы контроля к ошибкам в исходной информации, вследствие чего локализовать ошибочный срок по величине невязки не представляется реальным. Максимальные невязки по отдельным вариантам и в средних из 3 вариантов приходится на сроки, отличные от срока с искаженными данными.

Точность интерполяции с помощью параболы третьего порядка возрастает, если интерполировать не сами значения элемента, а их отклонения от какой-либо осредненной характеристики, например средней многолетней, которая повторяет основные особенности суточного хода.

В этом случае амплитуда суточного хода отклонений от средней многолетней будет меньше, чем амплитуда суточного хода самого элемента, поэтому, согласно /1/, точность интерполяции возрастает.

По данным работы /3/, где суточный ход отклонений значений средней месячной температуры по срокам от десятилетних средних аппроксимировался с помощью параболы третьего порядка

$$\Delta T(\tau) = A\tau^3 + B\tau^2 + C\tau + D, \quad (2)$$

средние квадратические значения невязок интерполяции по 6 станциям Северо-Западного УГКС за 12 лет не превосходят 0,27 °С.

Чувствительность формулы (2) к ошибкам в исходной информации иллюстрируется данными таблиц 1—3.

В таблицах 1—2 приведены средние квадратические невязки интерполяции для случаев, когда срок наблюдения 06 часов (близкий к минимуму температуры) искажался на ± 2 °С (табл. 1) и ± 1 °С (табл. 2) соответственно.

В строке 1 обеих таблиц даны невязки для случая, когда кривая суточного хода была проинтерполирована по всем восьми срокам (включая ошибочные данные), а в строке 2 — когда ошибочный срок 06 часов исключали из интерполяции. При рассмотрении невязок видно, что значение невязки интерполяции в срок, где имеется ошибочная информация, резко возрастает по сравнению с остальными сроками. Это особенно заметно, если интерполировать кривую суточного хода по семи срокам наблюдения, исключив ошибочный.

Так, для случая искажения данных за срок 06 часов на 2 и 1 °С (строка 2 табл. 1 и 2) отношение невязки интерполяции в срок наблюдений с ошибкой к средней невязке за остальные сроки составляет соответственно около 8 и 5. Это же отношение при интерполяции по восьми срокам колеблется около 5 и 3 соответственно (строка 1 табл. 1 и 2).

В таблицах 3 и 4 приведены средние квадратические невязки интерполяции при искажении данных на $\pm 0,5$ и ± 1 °С соответственно срокам на-

Таблица 1

Средние квадратические значения невязок интерполяции
(по 8 срокам — 1-я строка, по 7 срокам — 2-я строка)
для случая искаженных данных в срок 06 ч на 2 °С

Станция		Сроки наблюдений, ч							
		00	03	06	09	12	15	18	21
Любань	1	0,54	0,54	2,55	0,53	0,53	0,44	0,21	0,41
	2	0,37	0,53	2,18	0,24	0,20	0,28	0,20	0,22
Воейково	1	0,41	0,46	2,51	0,50	0,48	0,39	0,15	0,33
	2	0,25	0,34	2,09	0,23	0,18	0,24	0,14	0,16
Ломоносов	1	0,27	0,40	2,47	0,50	0,42	0,40	0,10	0,30
	2	0,09	0,09	2,02	0,22	0,14	0,30	0,10	0,15
Озерки	1	0,43	0,54	2,50	0,51	0,48	0,31	0,23	0,32
	2	0,29	0,45	2,08	0,19	0,18	0,13	0,22	0,16
Мощный	1	0,28	0,42	2,47	0,49	0,43	0,31	0,13	0,28
	2	0,11	0,17	2,01	0,17	0,16	0,18	0,12	0,11
Выборг	1	0,13	0,67	2,87	0,63	0,32	0,18	0,35	0,17
	2	0,07	0,12	2,03	0,07	0,18	0,13	0,23	0,10

Таблица 2

Средние квадратические значения невязок интерполяции для случая
искаженных данных в срок 06 ч на 1 °С
(по 8 срокам — 1-я строка, по 7 срокам — 2-я строка)

Станция		Сроки наблюдений, ч							
		00	03	06	09	12	15	18	21
Любань	1	0,49	0,42	1,40	0,34	0,40	0,38	0,21	0,34
	2	0,37	0,53	1,32	0,24	0,20	0,28	0,20	0,22
Воейково	1	0,34	0,32	1,31	0,29	0,33	0,33	0,14	0,25
	2	0,25	0,34	1,16	0,23	0,18	0,24	0,14	0,16
Ломоносов	1	0,17	0,21	1,25	0,30	0,25	0,34	0,10	0,21
	2	0,09	0,09	1,04	0,22	0,14	0,30	0,10	0,15
Озерки	1	0,37	0,42	1,30	0,32	0,33	0,22	0,23	0,24
	2	0,29	0,45	1,14	0,19	0,18	0,13	0,22	0,16
Мощный	1	0,18	0,25	1,24	0,28	0,26	0,23	0,12	0,18
	2	0,11	0,17	1,02	0,17	0,16	0,18	0,12	0,11

Станция		Сроки наблюдений, ч							
		00	03	06	09	12	15	18	21
Выборг	1	0,41	0,32	1,35	0,26	0,40	0,41	0,17	0,30
	2	0,07	0,12	1,23	0,07	0,18	0,13	0,23	0,10

Таблица 3

Средние квадратические значения невязок интерполяции
для случая искажения данных на 1°C в срок наблюдения
15 ч (строка 1) и 12 ч (строка 2)

Станция		Сроки наблюдений, ч							
		00	03	06	09	12	15	18	21
Любань	1	0,13	0,22	0,28	0,36	0,38	1,43	0,40	0,14
	2	0,49	0,38	0,69	0,36	1,33	0,43	0,24	0,32
Воейково	1	0,10	0,19	0,20	0,23	0,35	1,42	0,39	0,11
	2	0,34	0,24	0,49	0,32	1,31	0,38	0,19	0,23
Ломоносов	1	0,17	0,07	0,24	0,28	0,28	1,27	0,22	0,21
	2	0,17	0,10	0,29	0,33	1,29	0,39	0,16	0,17
Озерки	1	0,37	0,37	0,44	0,30	0,36	1,24	0,30	0,24
	2	0,37	0,37	0,47	0,35	1,31	0,29	0,26	0,20
Мощный	1	0,18	0,16	0,21	0,26	0,29	1,25	0,23	0,18
	2	0,18	0,17	0,26	0,31	1,29	0,30	0,17	0,13
Выборг	1	0,41	0,25	0,57	0,23	0,42	1,29	0,26	0,30
	2	0,07	0,10	0,24	0,26	1,33	0,34	0,32	0,17

Таблица 4

Средние квадратические значения невязок интерполяции
для случая искаженных данных на $0,5^{\circ}\text{C}$ в срок наблюдения
15 ч (строка 1) и 12 ч (строка 2)

Станция		Сроки наблюдений, ч							
		00	03	06	09	12	15	18	21
	1	0,48	0,37	0,67	0,28	0,73	0,38	0,22	0,32

Станция		Сроки наблюдений, ч							
		00	03	06	09	12	15	18	21
Любань	2	0,48	0,39	0,91	0,27	0,37	0,37	0,21	0,32
	1	0,33	0,25	0,46	0,22	0,69	0,33	0,16	0,22
Воейково	2	0,33	0,27	0,76	0,21	0,29	0,31	0,14	0,23
	1	0,13	0,08	0,23	0,24	0,66	0,34	0,12	0,17
Ломоносов	2	0,13	0,12	0,65	0,23	0,18	0,32	0,10	0,18
	1	0,35	0,37	0,44	0,26	0,69	0,21	0,23	0,20
Озерки	2	0,35	0,38	0,75	0,25	0,29	0,19	0,23	0,21
	1	0,14	0,16	0,19	0,21	0,66	0,22	0,14	0,13
Мощный	2	0,14	0,18	0,66	0,20	0,20	0,20	0,12	0,14
	1	0,40	0,26	0,56	0,17	0,73	0,40	0,18	0,27
Выборг	2	0,40	0,27	0,83	0,16	0,36	0,39	0,16	0,28

блюдений 15 часов (строка 1) и 12 часов (строка 2).

Ошибку $0,5^{\circ}\text{C}$ локализовать, пользуясь формулой (2), достаточно трудно, об этом свидетельствуют данные табл. 4.

При создании алгоритма контроля и восстановления режимной информации по срокам все приведенные выше соображения должны быть приняты во внимание.

Контролю и восстановлению подлежат следующие элементы: температура и атмосферное давление воздуха, ветер, температура поверхности почвы, влажность и облачность. Анализируется суточный ход элементов, осредненных за месяц по срокам, т. е. такой суточный ход, когда непериодические изменения элементов, приходящиеся на все сроки, в известной степени погашаются.

Основная трудность такого анализа заключается в том, что суточный ход различных элементов выражен существенно неодинаково; более того, характер последнего, даже для одного и того же элемента, может различаться в разных физико-географических условиях.

Неучет указанного обстоятельства при создании оперативной программы логического контроля ежедневной метеорологической информации обусловил, в частности, крайне низкую эффективность алгоритмов, основанных на интерполяционных формулах Лагранжа [9]. Отсутствие критериев достоверности информации, дифференцированных по времени и пространству, хотя и имело определенное значение, но не столь решающее, как это утверждается в [11].

На рис. 1—4 приводятся кривые суточного хода температуры и относительной влажности воздуха, скорости ветра и общей облачности для станций: Четырехстолбовый (а), Воейково (б) и Репетек (в), резко различающихся по своим физико-географическим особенностям.

Гидрометеорологическая станция Четырехстолбовый расположена на

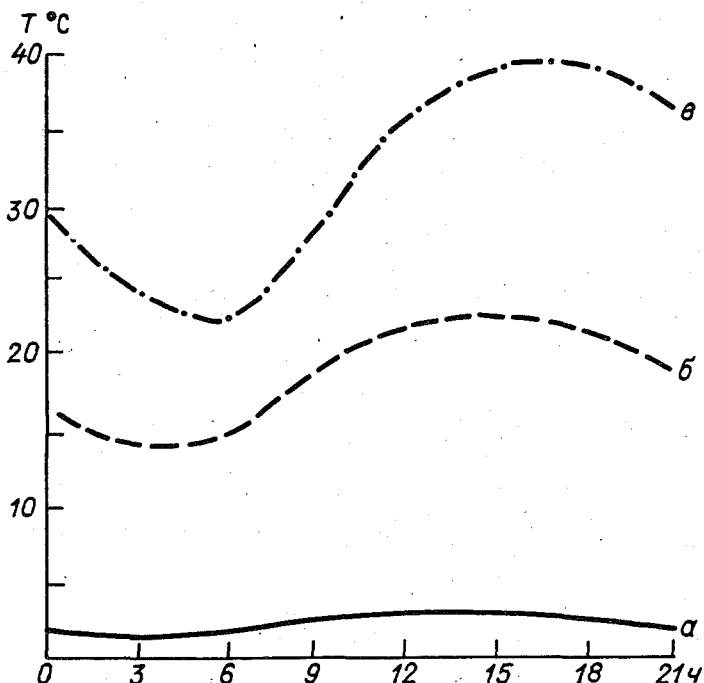


Рис. 1.

острове, являющимся самым восточным в архипелаге "Медвежий острова" Восточно-Сибирского моря, в 90 км от дельты реки Колымы. Прибрежная полоса острова изрезана бухтами. Берега песчаные, местами каменистые. Растительность тундровая. Высота станции 32 метра над уровнем моря.

Гидрометеорологическая станция Воейково расположена в центральной приподнятой части Приневской низменности на Колтушской гряде на высоте 72 метра над уровнем моря. Окружающая местность холмистая со множеством озер и болот.

Гидрометеорологическая станция Репетек расположена в восточной части пустыни Каракумы на высоте 185 метров над уровнем моря. Водных объектов вблизи нет, а окружающие земли не обрабатываются.

Наиболее резко суточный ход выражен для температуры воздуха и температуры почвы. Довольно хорошо по усредненным за месяц данным прослеживается и суточный ход скорости ветра — максимум ее наблюдается днем, минимум — ночью.

Таблица 5 иллюстрирует возможности контроля и восстановления режимной информации по срокам с помощью аппроксимации суточного хода параболой 2-го порядка в различных физико-географических усло-

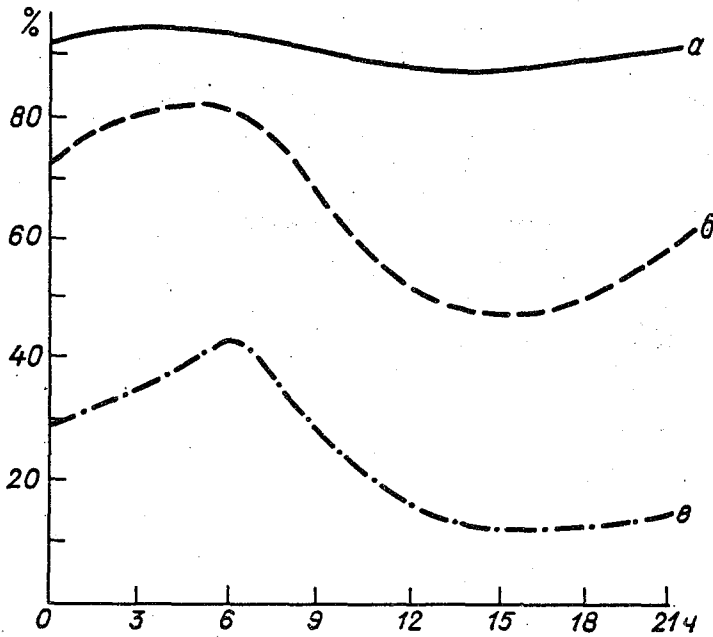


Рис. 2.

000000

виях. В ней приводятся сведения о минимально-возможных амплитудах невязок интерполяции при различных вариантах выбора опорных сроков для аппроксимации. Они получены на основании обобщения невязок интерполяции значений метеорологических элементов для каждого из 8 сроков наблюдений за 10 лет при 4 вариантах выбора опорных для аппроксимации (два до и один после; один до и два после; два до и два после; три до и один после срока) для июля.

Из всех полученных невязок отдельно для каждого срока и варианта выбора опорных сроков определялась максимальная амплитуда изменений невязок за 10 лет, т. е. предельная погрешность, с которой мы можем осуществлять интерполяцию элемента в данный срок.

Наконец, из отобранных по каждому сроку значений амплитуды выбиралась минимальная, т. е. тем самым устанавливался вариант выбора опорных сроков, который в состоянии обеспечить интерполяцию с наименьшей погрешностью.

Данные таблицы 5 показывают, что при соответствующем выборе опорных сроков для аппроксимации полиномом второго порядка для станции Четырехстолбовый удастся обеспечить необходимую точность интерполяции практически для всех элементов, имеющих выраженный суточный ход.

Для станций Воейково и Репетек (находящейся в особых физико-гео-

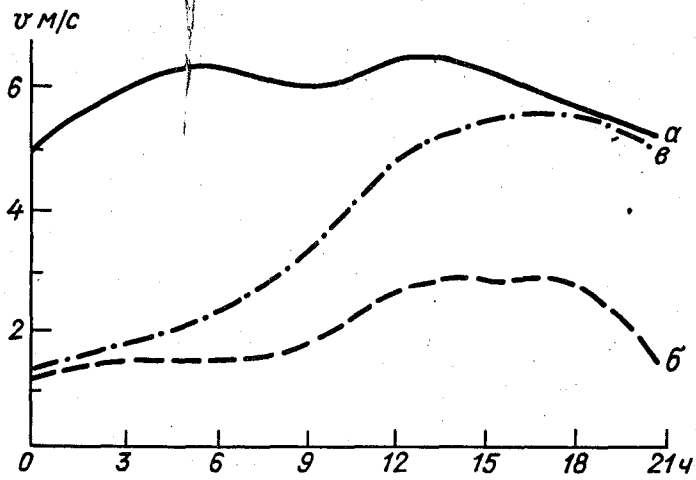


Рис. 3.

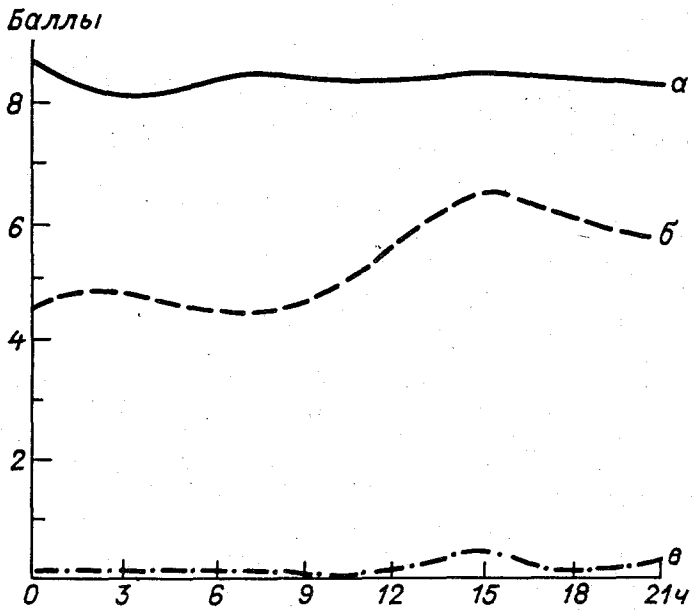


Рис. 4.

Амплитуда невязок интерполяции при различном
выборе опорных сроков. Июль

Станция	Элемент	Номер срока наблюдения от начала суток							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Репетек	Температура	0,9	1,0	0,6	0,8	0,8	0,6	1,1	0,4
Воейково	воздуха, °С	0,4	0,5	0,6	0,8	0,5	0,5	0,7	0,6
Четырех- столбовый		0,2	0,2	0,2	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3
Репетек	Температура	0,8	1,0	1,5	1,3	1,0	0,7	1,2	1,7
Воейково	поверхности	0,9	0,7	1,0	1,7	1,5	1,3	2,6	1,4
Четырех- столбовый	почвы, °С	1,0	0,6	0,7	1,3	1,0	1,2	0,9	2,0
Репетек	Относитель-	3,0	2,5	1,7	3,2	2,7	1,7	1,3	1,0
Воейково	ная влаж-	1,9	1,3	2,3	4,5	2,7	2,1	2,4	3,3
Четырех- столбовый	ность, %	2,1	1,3	1,6	2,0	2,0	1,3	1,6	1,8
Репетек	Дефицит	1,8	2,2	1,5	2,7	2,7	1,2	0,7	1,3
Воейково	насыщения,	0,9	0,7	0,6	1,0	1,1	0,9	1,0	0,6
Четырех- столбовый	гПа	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Репетек	Парциальное	0,7	0,5	0,4	0,7	0,3	0,6	0,3	0,5
Воейково	давление	0,4	0,4	0,2	0,5	0,4	0,5	0,3	0,4
Четырех- столбовый	водяного	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Репетек	Скорость	0,4	0,5	0,3	0,4	0,8	0,7	0,5	0,5
Воейково	ветра,	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,3	0,6	0,2
Четырех- столбовый	м/с	0,2	0,4	0,5	0,7	0,4	0,4	0,4	0,3
Репетек	Общая	0,3	0,6	0,3	0,5	0,8	0,7	0,3	0,5
Воейково	облачность,	0,8	0,8	0,6	0,8	0,7	0,4	0,9	0,9
Четырех- столбовый	баллы	0,3	0,2	0,4	0,5	0,5	0,4	0,8	0,5
Репетек	Нижняя	0,6	0,4	0,3	0,3	0,9	0,6	0,5	0,5
Воейково	облачность,	0,8	0,6	0,8	0,8	0,9	0,4	0,8	0,9
Четырех- столбовый	баллы	0,4	0,5	0,3	0,2	0,6	0,7	0,6	0,6

графических условиях) по некоторым элементам максимальные невязки интерполяции в отдельные сроки наблюдений выходят за пределы допустимой погрешности при любом выборе опорных сроков, что свидетель-

существует об ограниченной пригодности формулы для рассматриваемых условий.

Анализ опубликованных материалов и результатов, приведенных в настоящей работе, свидетельствует о том, что использовать процедуру контроля, единую для всех метеорологических элементов и любых физико-географических условий, нельзя.

Процедура контроля и восстановления должна быть выбрана заранее в зависимости от характера суточного хода контролируемого (восстанавливаемого) элемента и задана соответствующим признаком.

Решая вопрос о пригодности той или иной процедуры для задачи контроля и восстановления средних месячных значений по срокам, необходимо проанализировать, какую точность обеспечивает последняя в точках экстремума суточного хода и близких к ним.

При оптимальном выборе опорных сроков для аппроксимации участка кривой суточного хода можно в значительной мере повысить точность контроля и восстановления режимной метеорологической информации по срокам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспалов Д. П., Светлова Т. П. О точности представления суточного хода метеорологических элементов по срочным данным. — Труды ГГО, 1971, вып. 260, с. 124–128.
2. Беспалов Д. П., Грошева Л. А. О восполнении пропущенных данных в материалах наблюдений. — Труды ГГО, 1982, вып. 461, с. 19–24.
3. Завьялова А. В., Копычева В. С., Светлова Т. П. Исследование возможности восстановления суточного хода средней месячной температуры методом временной интерполяции. — Труды ГГО, 1982, вып. 461, с. 25–29.
4. Завьялова А. В., Светлова Т. П. Об одном способе контроля и восстановления метеорологической информации по срокам. — Труды ГГО, 1978, вып. 435, с. 15–19.
5. Каган Р. Л., Дроздовская П. П. Об интерполяции метеорологических элементов во времени. — Труды ГГО, 1966, вып. 194, с. 3–10.
6. Копычева В. С., Светлова Т. П. Контроль средних месячных значений метеорологических элементов. — Труды ГГО, 1978, вып. 396, с. 25–31.
7. Методические указания по проведению критического контроля результатов метеорологических наблюдений на сети станций. — Л.: Гидрометеоиздат, 1981. — 70 с.
8. Наблюдения на гидрометеорологической сети СССР. Определение понятий гидрометеорологических элементов и оценка точности наблюдений /Под ред. О. А. Горюцкого. — Л.: Гидрометеоиздат, 1970. — 90 с.
9. Назарова И. В. Автоматический контроль ежедневных данных основных метеорологических наблюдений. — В кн.: Автоматическая проверка и исправление данных метеорологических наблюдений. Экспресс-информация. Вып. 6 (II). Обнинск, 1971, с. 30–40.
10. Чубенко М. А. Исследование ошибок временной интерполяции основных

метеорологических элементов. — Тр. Новосибирского регионального метеорологического центра, 1969, вып. 2, с. 20—27.

11. Пуголовкин В. В., Петрик В. П. Анализ эффективности автоматизированного контроля метеорологической информации. — Труды ВНИИГМИ-МЦД, 1978, вып. 31, с. 64—70.

А. В. Завьялова

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЕЖЕДНЕВНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА ПО СРОКАМ МЕТОДОМ ВРЕМЕННОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ

В связи с развитием автоматизированных систем сбора, обработки, контроля и восстановления информации на ЭВМ во многих работах последнего времени большое внимание уделялось проблеме повышения точности временной интерполяции метеорологических элементов. В частности, рядом авторов были разработаны алгоритмы, основанные на такой интерполяции, позволившие наметить перспективные пути решения контроля и восстановления данных по температуре воздуха в срок наблюдения /1, 2, 3/. В работах /2, 3/ было показано, что точность временной интерполяции находится в обратной зависимости от величины амплитуды суточного хода. Там же было установлено, что для элементов с четко выраженным суточным ходом точность интерполяции различна в разное время суток и зависит также от количества сроков наблюдения, используемых в интерполяционной формуле. Наиболее заметно упомянутое различие проявляется при интерполяции температуры воздуха по срокам. Если для интерполяции температуры воздуха привлекать все восемь сроков наблюдения, можно, как правило, получать интерполированные значения в любой момент времени между сроками с достаточно высокой точностью. По данным работы /3/, для средних многолетних значений температуры воздуха максимальная погрешность такой интерполяции составляет $0,17^{\circ}\text{C}$ на ст. Ленинград, ГМО в июне и $0,09^{\circ}\text{C}$ — в январе. Если же возникает необходимость интерполяции значений температуры в срок наблюдения (например, для контроля или восстановления информации по данным в остальные сроки), т. е. для интерполяции может быть использована только часть информации за сутки, точность интерполяции падает. В этом случае возможная точность интерполяционных формул определяется величиной амплитуды температуры в ближайшие к интерполируемому сроку наблюдения. Учитывая конкретные особенности суточного хода, можно подобрать интерполяционную формулу, позволяющую получать средние месячные значения в срок при одном пропущенном сроке наблюдения с удовлетворительной для целей контроля точностью. В качестве примера можно сослаться на работу /2/, согласно которой для ряда станций Прибалтики, по данным наблюдений за июль, средняя квадратическая невязка интерполяции для сроков, где она максимальна, не превышает $0,5^{\circ}\text{C}$.

При использовании этой же методики для станций с большими амплитудами суточного хода невязки интерполяции заметно возрастают. В табл. 1 даны значения невязок интерполяции для 8 сроков наблюдений за июль с 1968 по 1977 г. для ст. Репетек (амплитуда суточного хода в июле около 18°C).

Таблица 1

Значения невязок интерполяции для ст. Репетек за июль

Год	Номер срока наблюдения							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1968	-4,1	-5,2	-0,1	3,0	5,0	3,4	-0,6	-3,1
1969	-4,4	-4,4	-0,3	2,5	5,1	3,4	-0,6	-2,8
1970	-4,2	-4,5	0,1	3,4	5,2	3,3	0,4	-3,2
1971	-4,7	-5,0	-0,4	3,7	5,7	3,5	0,4	-2,9
1972	-5,0	-4,3	-0,2	3,6	5,3	3,4	-0,3	-3,1
1973	-4,5	-4,7	-0,2	3,3	5,3	3,7	0,4	-3,2
1974	-4,0	-4,4	-0,2	3,1	5,1	3,2	0,4	-2,8
1975	-4,9	-4,9	-0,2	3,9	5,6	3,8	0,5	-3,3
1976	-4,1	-4,2	-0,5	3,0	4,8	3,6	0,3	-2,9
1977	-4,3	-4,5	-0,3	3,3	4,9	3,4	0,4	-2,8
Ср.	-4,4	-4,6	-0,2	3,3	5,2	3,5	0,1	-3,0
Δmax	0,6	0,7	0,3	0,8	0,5	0,2	0,7	0,3

В двух последних строках таблицы приведены средние за 10 лет значения невязок интерполяции по каждому сроку и максимальные отклонения от средних.

Для интерполяции был использован полином 2-го порядка и учтены выводы, полученные в работе /2/. Из таблицы 1 видно, что даже в сроки, где из-за асимметрии суточного хода получаются большие абсолютные значения невязок интерполяции (например, в срок 01, для которого среднее значение невязки составляет $-4,4^{\circ}\text{C}$), невязки от года к году изменяются незначительно, максимальное отклонение от средней $\Delta\text{max} = 0,6^{\circ}\text{C}$. Последнее обстоятельство позволяет обеспечить эффективный контроль, если в качестве критерия достоверности взять величину $\Delta f \pm \pm k\sigma$, где Δf — среднее значение невязки, а σ — среднее квадратическое отклонение.

При интерполяции ежедневных данных устойчивости величин невязок, характерной для средних месячных значений, не наблюдается. Это хорошо просматривается по данным табл. 2, где приведены результаты интерполяции ежедневных значений температуры воздуха для ст. Воейково за июль 1978 г. вышеупомянутым методом.

Таблица 2

Значения невязок интерполяции ежедневных значений температуры воздуха для ст. Воейково за июль 1978 г.

	Номер срока наблюдения							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Средняя невязка	-0,4	-0,3	-0,5	1,2	0,3	0,0	0,0	-0,6
Дисперсия невязки	3,2	1,7	0,8	1,4	2,6	1,7	1,7	1,7
Δt_{max}	3,4	2,7	1,7	3,1	2,4	2,8	2,4	2,4

В первой строке таблицы даны средние значения невязки по срокам, во второй — ее среднее квадратическое отклонение по каждому сроку наблюдения, в третьей — максимальные отклонения от средних невязок в данном месяце. Большие значения средних квадратических отклонений указывают на неустойчивость ото дня ко дню невязок интерполяции, что не дает возможности обеспечить в этом случае достаточную эффективность контроля или восстановления.

Таблица 3 содержит данные по ст. Четырехстолбовый за июль (амплитуда суточного хода $\approx 2,5^\circ\text{C}$), из которых следует, что для станций с незначительными амплитудами суточного хода точность интерполяции срочных значений выше, а неустойчивость невязок ото дня ко дню заметно меньше.

Таблица 3

Значения невязок интерполяции ежедневных значений температуры воздуха для ст. Четырехстолбовый за июль 1978 г.

	Номер срока наблюдения							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Средняя невязка	-0,3	-0,2	0,0	0,0	0,2	0,1	-0,2	0,0
Дисперсия невязки	0,8	0,6	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,8
Δt_{max}	4,0	1,5	1,1	1,4	1,3	1,2	1,0	2,1

Приведенные примеры показывают, что возможность использования разработанных интерполяционных формул /3/ для контроля и восстановления ежедневной информации по температуре воздуха в срок ограничена.

В частности, это объясняется тем, что кривая суточного хода температуры воздуха, осредненная за месяц, более гладкая, чем кривая суточного хода за отдельные сутки. А так как любая интерполяция в большей или меньшей степени приводит к сглаживанию интерполируемой функции, то ход интерполируемого элемента должен быть достаточно плавным, чтобы с помощью выбранной формулы можно было достичь требуемой точности. Ранее автором был предложен алгоритм, использующий экстремальные значения температуры воздуха за период между соседними сроками наблюдения для интерполяции значений температуры в срок. Он предусматривает замену значения температуры в текущий срок наблюдения ее экстремальным значением за период между предшествующим сроком наблюдения и контролируемым, если информация контролируется, или следующим сроком наблюдения и восстанавливаемым — при восстановлении значений. В зависимости от характера изменения температуры между сроками (повышение или понижение) привлекается либо максимальная, либо минимальная температура. Характер изменения температуры между сроками определяется путем анализа соотношения разностей срочной и экстремальных температур за период между сроками наблюдения.

В настоящей работе дан анализ эффективности предложенного алгоритма при контроле и восстановлении ежедневных значений температуры воздуха в срок наблюдения на станциях, расположенных в различных климатических условиях СССР. На рис. 1 (а и б) представлены кривые, характеризующие обеспеченность контроля (рис. 1 а) и восстановления (рис. 1 б). По оси абсцисс отложены абсолютные величины невязок интерполяции ежедневных значений температуры воздуха в срок наблюдения (Δ), по оси ординат — отношение числа случаев с заданной величиной невязки к общему числу рассмотренных случаев, выраженное в процентах. Данные кривые получены при обработке информации двух лет за июль для нескольких станций, расположенных в различных климатических зонах территории СССР (1 — Четырехстолбовый, 2 — Воейково, 3 — Томск, 4 — Алма-Ата, 5 — Репетек). Для каждой станции рассмотрено по 500 случаев. Аналогичные кривые были построены и для января, но поскольку они качественно не отличаются от приведенных, в дальнейшем обсуждении мы их касаться не будем. В соответствии с /4/, где сформулированы требования основных потребителей к точности метеорологической информации, величина погрешности ежедневных данных по температуре воздуха не должна превышать 1°C . Анализ кривых, приведенных на рис. 1 (а и б), показывает, что число случаев, в которых обеспечивается требуемая точность, как для контроля, так и для восстановления колеблется от 85 % общего числа рассмотренных случаев на ст. Репетек до 95 % на ст. Четырехстолбовый. Для ежедневной информации это достаточно высокая обеспеченность. Напомним, что в действующей в настоящее время системе пространственного контроля режимной метеорологической информации по срокам из-за больших невязок интерполяции бракуется ЭВМ и выдает-

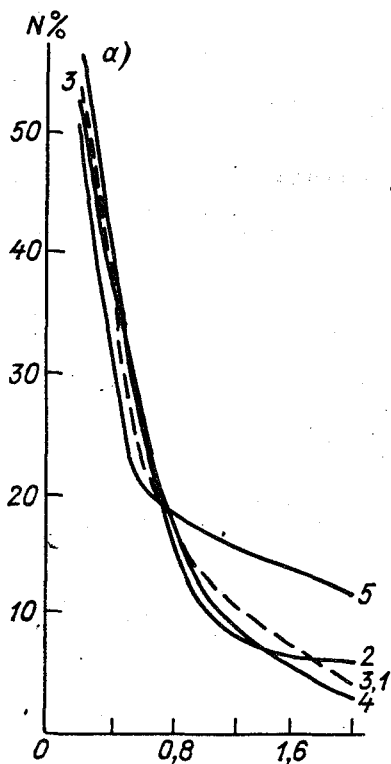


Рис. 1 а.

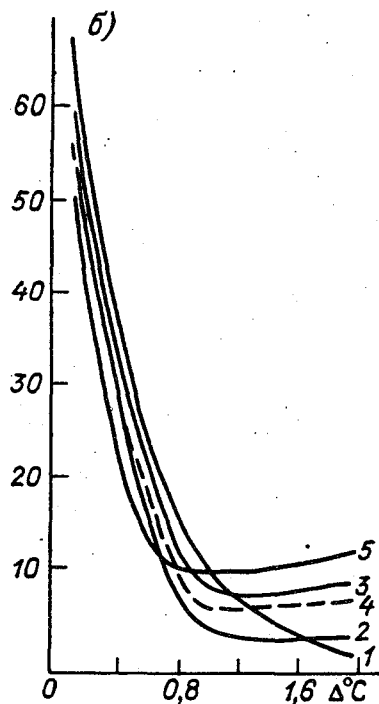


Рис. 1 б.

ся для дополнительного анализа специалисту в среднем 10 % информации. Восстановление пропущенной и забракованной информации в упомянутой системе не производится в силу отсутствия эффективной методики локализации на ЭВМ случаев ошибочных значений.

Анализируемый алгоритм позволяет в среднем с 90 % обеспеченностью выявить ошибку в ежедневных данных по температуре воздуха с точностью до 1°C (см. рис. 1 а). Обеспеченность восстановления температуры с точностью до 1°C примерно такая же (см. рис. 1 б), однако для эффективного восстановления она недостаточна, т. к. в этом случае будет велика ($\approx 0,1$) вероятность ошибок восстановления, больших 1°C . Для повышения эффективности алгоритмов контроля и восстановления ежедневной информации необходимо решить ряд задач и прежде всего задачу априорного выявления случаев, где велика вероятность получения погрешности интерполяции более 1°C , что позволяет восстанавливать с требуемой точностью только часть информации. К тому же, потребуется уточнить

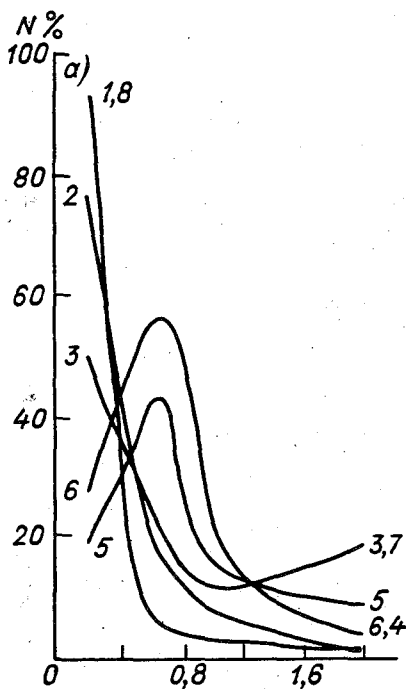


Рис. 2 а.

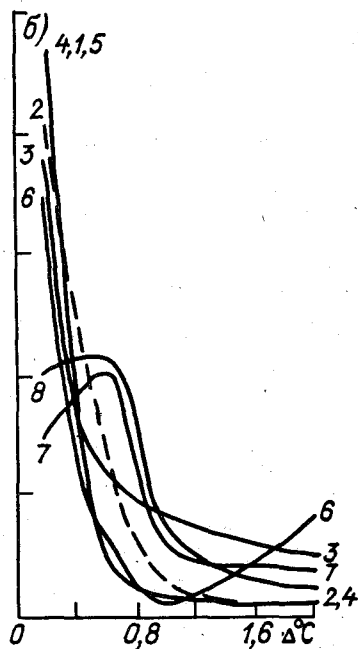


Рис. 2 б.

алгоритм контроля и восстановления с целью повышения точности интерполяции. В данной работе намечены пути решения первой из указанных выше задач.

В соответствии с приведенным выше алгоритмом, значение температуры в срок заменяется на минимальное или максимальное значение за период между сроками наблюдения в зависимости от знака первой производной температуры. Очевидно, такую замену можно осуществить, если знак первой производной температуры за период между сроками не меняется или же если амплитуда колебаний температуры за этот период была незначительной по сравнению с абсолютной величиной разности температур в соседних сроках наблюдения. Естественно предположить, что для сроков, где эти условия могут быть не соблюдены, вероятность появления больших ошибок интерполяции должна возрастать. Целесообразно посмотреть, какова точность интерполяции в различные сроки наблюдения.

На рис. 2 изображены кривые обеспеченности контроля (а) и восстановления (б) для каждого из восьми сроков наблюдения за июль по ст. Томск. Номер кривой соответствует номеру срока наблюдения от начала метеорологических суток. Для построения каждой из кривых исполь-

зовалась ежедневная информация по температуре воздуха в срок за два года — 62 случая для каждого срока наблюдения. По оси абсцисс отложена точность интерполяции при контроле или при восстановлении, по оси ординат — отношение числа случаев с ошибкой интерполяции (Δ) к общему числу проанализированных случаев, выраженное в процентах. При рассмотрении кривых, приведенных на рис. 2, следует обратить внимание на наличие сроков наблюдения, где обеспеченность контроля или восстановления с точностью 1°C близка к 100 %, и сроков с низкой обеспеченностью. Так, для сроков 1 и 8 случаи с погрешностью интерполяции больше 1°C составляют менее 1 %, а для сроков 3 и 7 — 15 %, т. е. вероятность получения больших ошибок различна в разные сроки наблюдения. Попытаемся выявить причины, приводящие к этому.

Как уже отмечалось, в рассматриваемом алгоритме для восстановления используется информация о срочной и экстремальных температурах, относящихся к сроку наблюдения, следующему за анализируемым. Например, для восстановления значения срочной температуры воздуха в сроки наблюдения 3 и 7 используется информация сроков 4 и 8. Из анализа суточного хода средней месячной температуры на ГМС Томск видно, что, как правило, суточный минимум температуры воздуха наблюдается между сроками наблюдения 3 и 4, а суточный максимум приходится на промежуток времени между сроками наблюдения 7 и 8, т. е. в рассматриваемые промежутки первая производная температуры по времени ($\partial T / \partial t$) меняет знак. Это означает, что происходит смена тенденции изменения температуры: от понижения к повышению утром и от повышения к понижению после полудня. Для контроля или восстановления в упомянутые сроки привлекается значение суточного минимума или суточного максимума температуры. Если при этом экстремум температуры воздуха наблюдается не в непосредственной окрестности рассматриваемого срока наблюдения (например, приходится на середину между сроками, привлекаемыми для интерполяции), а термические градиенты велики, то погрешность интерполяции также велика. Таким образом, в сроках, где для интерполяции используются значения суточных экстремумов, возрастает вероятность появления больших ошибок при контроле или восстановлении срочных значений температуры воздуха.

Аналогичная картина наблюдается и на других станциях со значительными амплитудами суточного хода температур воздуха. Например, на ст. Алма-Ата, Репетек, Стерлитамак летом точность интерполяции хуже в сроки, где для интерполяции привлекаются значения суточных экстремумов температуры воздуха. В частности, для ст. Репетек случаи с ошибкой более 1°C могут составлять до 40 % общего числа для сроков, в которых при интерполяции приходится использовать значение суточного минимума температуры, и 1—2 % — в остальных сроках наблюдения. Этот результат не улучшить с помощью применяющихся на практике интерполяционных методов, т. к. все они при использовании для ежедневной информации не дают удовлетворительной точности (см., например, табл. 2).

Для северных станций с морским климатом, где летом утреннее выхолаживание незначительно и суточная амплитуда температуры воздуха не-

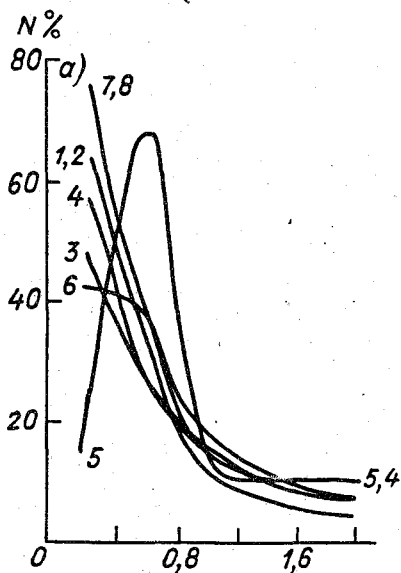


Рис. 3.а.

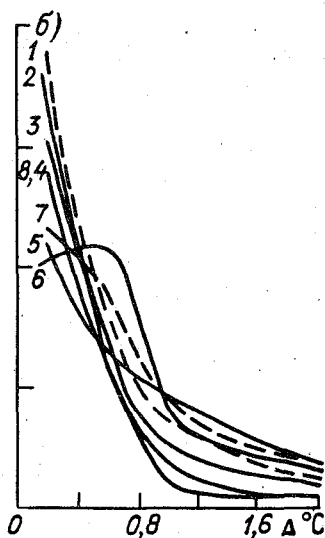


Рис. 3.б.

велика, величина ошибки интерполяции практически не зависит от срока наблюдения.

На рис. 3 для примера приведены кривые обеспеченности по ст. Четырехстолбовый ($\approx 70^\circ$ с. ш.) за июль. Они показывают, что число случаев с большими ошибками (более 1°C) примерно одинаково для всех сроков и составляет от 1 до 10 % общего числа.

Выше было отмечено, что вероятность получения больших ошибок интерполяции возрастает при смене знака первой производной температуры в промежутке между сроками наблюдения, привлекаемыми для интерполяции. На типичной кривой суточного хода температуры воздуха можно выделить две таких окрестности. — окрестность суточного минимума и суточного максимума температуры. Анализ ошибок интерполяции для сроков, расположенных в этих окрестностях, проведен в данной работе. Нужно отметить, что вероятность получения больших ошибок интерполяции может возрастать и при иных условиях, как, например, наличие некоторых атмосферных явлений, приводящих к довольно резким, но не очень продолжительным по времени колебаниям температуры воздуха, — гроз, сильных кратковременных дождей и т. д. Однако выявление всех ситуаций, приводящих к возрастанию вероятности появления больших невязок интерполяции, в настоящее время представляет значительные трудности из-за потребности в больших объемах надежно проконтролиро-

ванной ежедневной информации. Как было показано выше, случаи с погрешностью интерполяции более 1°C в среднем составляют 10 % общего числа. Чтобы обеспечить выборку достаточного для эффективного анализа объема, необходимо располагать ежедневной информацией по температуре воздуха за несколько лет. В настоящее время в силу того, что доступ к архивной информации на ДТН представляет значительные трудности, приходится ограничиться выборками материала, проконтролированного вручную. Это дает возможность определить лишь часть условий, при которых вероятность появления больших невязок интерполяции особенно велика. Решение этой задачи в полном объеме станет возможным при наличии разработанного и отлаженного программного обеспечения ЕС ЭВМ для доступа к архивам метеорологической информации, записанной на ДТН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чубенко М. А. Исследование ошибок временной интерполяции основных метеорологических элементов. — Труды Новосибирского регионального метеорологического центра, 1969, вып. 2, с. 20–27.
2. Завьялова А. В., Светлова Т. П. Об одном способе контроля и восстановления метеорологической информации по срокам. — Труды ГГО, 1980, вып. 435, с. 91–95.
3. Каган Р. Л., Дроздовская П. П. Об интерполяции метеорологических элементов во времени. — Труды ГГО, 1966, вып. 194, с. 91–95.
4. О составе, точности и пространственно-временном разрешении информации, необходимой для гидрометеорологического обеспечения народного хозяйства и службы гидрометеорологических прогнозов /Под ред. М. А. Петросянца и В. Д. Решетова. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. — 220 с.

С. М. Персин, Л. В. Анискин, А. А. Боровиков

О СВЕРХКРАТКОСРОЧНОМ ПРОГНОЗЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Краткосрочный прогноз метеорологических элементов, прежде всего высоты нижней границы облаков (ВНГО), дальности видимости, параметров ветра, имеет важное значение для метеорологического обеспечения авиации. Использование метеорологической информации потребителем осуществляется с неизбежной задержкой относительно момента измерения, величина которой определяется технологией сбора, передачи и использования данных. Поэтому в явной или неявной форме всегда имеет место прогноз, т. е. экстраполяция результатов измерений на время этой задержки.

Для метеорологического обеспечения взлета и посадки самолетов необходим сверхкраткосрочный прогноз на интервал от 1–3 мин до

10—30 мин. Наибольшие требования к оперативности данных представляет операция посадки летательного аппарата. Здесь задержка в использовании данных пилотом воздушного судна связана с дискретностью измерений и выдачи данных (при посадке в условиях второй категории — 1 мин), временем передачи данных от метеонаблюдателя диспетчеру посадки, а от него — пилоту и временем полета от момента получения метеорологической информации экипажем (перед последним разворотом самолета или на глассаде снижения) до момента достижения высоты принятия решения (о посадке или уходе на второй круг). Суммарная задержка, очевидно, зависит от типа самолета, технических средств и технологии измерений и передачи данных. Ориентировочно минимальная заблаговременность прогноза должна составлять 1—3 мин.

Примерно такое же значение получаем для операции взлета. С другой стороны, данные, представляемые диспетчерам подхода и круга и передаваемые ими на борт воздушного судна, используются со значительно большей задержкой. Здесь необходима экстраполяция до момента посадки судна, т. е. прогноз на интервал порядка 10—20 минут.

Из сказанного выше следует, что задача микропрогноза является одной из основных задач, определяющих требования к метеорологической информации и системе измерений на аэродроме (выбору осреднения, частоты измерений, формы представления данных, размещению приборов на аэродроме и др.). Поскольку для различных потребителей нужен прогноз с различной заблаговременностью, очевидно, и требования к данным (состав, осреднение и т. д.) будут различны. Использование мгновенных значений метеорологических элементов, измеренных в одной точке, особенно таких изменчивых во времени и пространстве параметров, как ВНГО, видимость, параметры ветра, не удовлетворяет требований авиации. При микропрогнозе необходимо получение данных, репрезентативных для определенных временных и пространственных интервалов.

С возрастом скорости и интенсивности воздушного движения, а также снижением минимумов посадки и взлета воздушных судов возрастают требования к системе авиационных метеорологических измерений, в том числе к объему, репрезентативности, оперативности получения и представления данных /1/. Автоматизация метеорологических аэродромных систем создает предпосылки для выполнения этих требований. Задачи микропрогноза непосредственно связаны с созданием нового поколения современных аэродромных систем на базе микропроцессоров и с новыми возможностями измерений, обработки и представления данных.

Различные алгоритмы краткосрочного прогноза ВНГО на срок до 2 часов рассмотрены в работах /2—5/. В работе /2/ на основе анализа статистических связей между изменениями за 1—2 часа высоты нижней границы облаков и значениями ряда метеорологических элементов в исходный срок (или их изменений) был осуществлен отбор предикторов и предложены прогностические номограммы для расчета вероятности существенных понижений ВНГО через 2 часа после исходного срока. В качестве предикторов при прогнозе существенных понижений ВНГО были выбраны значения ВНГО и скорости ветра у земли в срок наблюдений и

среднее или прогнозируемое изменение за 1—2 часа дефицита точки росы.

В работах /3—5/ для прогноза ВНГО используются различные алгоритмы экстраполяции только по значениям предшествующих измерений ВНГО в данной точке. В работе /3/ для прогноза осредненной высоты облаков на 0,5; 1 и 2 часа используется линейная экстраполяция по двум предшествующим значениям, в качестве которых выбираются скользящие средние за час (или полчаса). Для учета высокочастотной составляющей ВНГО из значения прогнозируемой осредненной высоты вычиталась поправка, равная половине амплитуды высокочастотных колебаний. Для определения последней на основе статистического анализа временной изменчивости ВНГО было выделено пять групп изменчивости, а также признаки, позволяющие определить группу изменчивости облаков косвенно, в зависимости от общей метеорологической ситуации и данных обычных метеорологических наблюдений. Область применения такого метода ограничивается обычной погрешностью линейной интерполяции при резком изменении хода осредненной высоты облаков /3/. В работах /4, 5/ для прогноза ВНГО на интервал 15—150 минут были использованы более точные алгоритмы экстраполяции, основанные на использовании модели авторегрессии и метода экспоненциального сглаживания. В качестве исходных данных использовались наблюдения с шагом 15 мин. В результате исследования предлагается ряд вариантов общего алгоритма прогноза, отличающихся заданием параметров. Выбор варианта осуществляется оператором в зависимости от времени года (холодный или теплый сезон), вида облаков, типа облачных полей (облачность теплого фронта, холодного фронта, внутримассовая облачность), высоты облаков (меньше 100 м, 100—200 м, 200—300 м). Прогнозирование экстремальных значений данной методики не предусмотрено.

Рассмотренные выше подходы дополняют друг друга. Тем не менее, эти методы не решают многих задач прогноза и не используют ряда возможностей, в том числе связанных с внедрением автоматических аэродромных систем. Остановимся кратко на этих задачах и возможностях.

1. Все алгоритмы прогноза неизбежно получены по ограниченному статистическому материалу (в /2/ номограммы построены для определенных района, метеорологической ситуации, времени года и суток) и имеют рациональные области применения с точки зрения метеорологических и синоптических условий /2, 3/. В /3—5/ предполагается участие в процессе прогноза наблюдателя, осуществляющего анализ ситуации (разбиение на группы, для каждой из которых алгоритм прогноза неизменен). Очевидно, использование неких "средних" для ситуации алгоритмов снижает эффективность прогноза. Участие человека в оперативном прогнозе затрудняет его автоматизацию.

Рассматриваемый ниже подход основан на получении текущей статистической структуры и текущих моделей метеорологических процессов посредством скользящей обработки непрерывных учащенных измерений, т. е. на формировании текущих (адаптивных) прогностических алгоритмов, оптимальных для данной конкретной ситуации. При этом обеспечивается универсальность подобных алгоритмов, возрастает точность прогно-

за и исключается необходимость анализа и ввода исходных данных оператором.

2. В описанных выше алгоритмах использовались измерения в одной точке. Рассматриваемый подход предлагает взятие в качестве предикторов текущих измерений в других точках аэродрома (в общем случае не только прогнозируемого элемента), т. е. привлечение пространственных связей. При этом, как и выше, имеется в виду получение текущих корреляционных связей по данным измерений в разных точках аэродрома, выбор влияющих точек (и параметров) по степени связности и построение алгоритмов прогноза с учетом найденных предикторов и многомерных моделей, т. е. использование для прогноза многомерной адаптивной оптимальной экстраполяции. Следует исследовать и более простые методы, например, выбор одного-двух пунктов, дающих с "опережением", определяемым горизонтальным переносом, будущую картину в прогнозируемой точке и экстраполяции по времени с учетом задержки, определяемой расстоянием между точками и скоростью переноса.

3. Следует рассмотреть связь задачи краткосрочного прогноза с обоснованием требований к системе измерений (с выбором частоты измерений, осреднения, формы представления данных, размещения приборов на аэродроме и др.), а также влияние отбора данных на точность прогноза. В частности, как будет показано ниже, повышение частоты дискретизации позволяет повысить точность прогноза за счет сглаживания данных. Большой интерес здесь представляет рассмотрение микропрогноза и требований к данным с точки зрения технологии их использования. Очевидно, для дальности видимости, ВНГО, скорости ветра важен прогноз как среднего значения параметра, так и возможного экстремального значения для интервала упреждения /6, 7/. При этом прогноз экстремальных значений также должен быть основан на анализе текущей статистической структуры.

4. Наконец, задача прогноза должна сочетаться с вопросами подготовки и контроля данных (исключения выбросов, разделения слоев облачности и выделения измерений, относящихся к нижнему слою, и т. д.).

Техническая реализация рассматриваемого подхода, включая сбор и обработку данных с ряда точек аэродрома, возможна в разрабатываемых автоматических аэродромных системах на базе микропроцессоров. Процессор осуществляет скользящий набор массива учащенных измерений (с периодом порядка 15 с и менее), отбраковку данных с целью разделения слоев облачности, определение текущих статистических связей и моделей (в том числе многомерных), расчет и представление потребителям необходимых прогностических данных. Получение различных данных, необходимых разным потребителям, нужно осуществлять посредством обработки измерений.

Эффективность рассматриваемого подхода для ряда метеорологических элементов и, прежде всего, эффективность привлечения измерений в других точках аэродрома, целесообразность адаптивных оптимальных алгоритмов по сравнению с более простыми и др. требует для каждого из элементов конкретного исследования и обоснования.

Ниже в статье исследуется одна из поставленных задач, а именно — погрешность различных методов сверхкраткосрочного прогноза ВНГО на интервал 1—15 минут по измерениям в одной точке и ее связь с параметрами измерительной системы (частотой измерений, осреднением при получении отсчетов и при выдаче).

В качестве исходных данных при анализе временной изменчивости ВНГО и различных алгоритмов микропрогноза были использованы результаты автоматических измерений, проводимых с помощью станции КРАМС—М и измерителя высоты облаков (ИВО) в пос. Воейково. Всего обрабатывалось 13 реализаций с шагом дискретизации по времени 15 секунд при общем числе наблюдений порядка 10 тысяч. Автоматическое снятие данных упрощало проведение эксперимента и преследовало цель учесть при анализе не только изменчивость ВНГО, но и погрешности измерений, а также исключить субъективность наблюдателя, невольно осуществляющего при снятии отсчетов сглаживание данных и исключение выбросов. Результаты измерений станции КРАМС—М выводились на печать и перфоленту. Полученные массивы измерений обрабатывались на ЭВМ.

Всем реализациям соответствовала однослойная облачность, поэтому предварительная обработка, связанная с разделением слоев, не проводилась. Контроль данных сводился к выявлению больших выбросов обоого знака. Анализ показал, что исключение выбросов, превышающих по абсолютной величине $3\sigma_{20}$ и даже $2\sigma_{20}$, где σ_{20} — среднее квадратическое значение скользящего (за интервал 20 минут) центрированного процесса, мало влияло на модель изучаемого процесса и погрешность экстраполяции.

Исследование временных статистических характеристик и построение моделей осуществлялось, как отмечалось выше, для каждой реализации в отдельности.

В качестве примера для некоторых реализаций приведены зависимости среднего квадратического отклонения от скользящего среднего за различный временной интервал (рис. 1) и структурные функции ВНГО (рис. 2). Значения аргумента на рис. 2 соответствуют высокочастотной области и области мезочастотного минимума. Виден большой разброс между реализациями по величине высокочастотной изменчивости и тренда. На рис. 3 приведены примеры структурной функции и нормированной автокорреляционной функции одной из реализаций для исходного временного ряда с шагом 15 с и рядов, полученных скользящим осреднением двух, четырех и восьми измерений (что приближенно соответствует интегрированию процесса за 30 с, 1 и 2 мин). Средние квадратические отклонения осредненных рядов от скользящего среднего показаны на рис. 1.

Как известно, структурная функция случайного процесса может характеризовать дисперсию погрешности ступенчатой экстраполяции (инерционного прогноза). Видно (из рисунков), что при экстраполяции даже на 15 с дисперсия погрешности очень велика, что связано с большой "зашумленностью" данных.

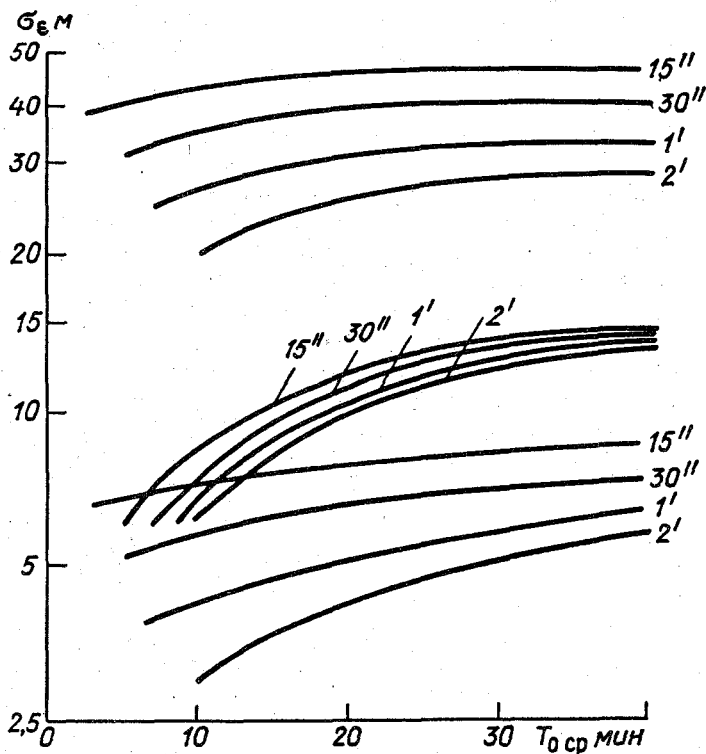


Рис. 1.

Среднее квадратическое значение шума σ_0 и относительный вклад шума получаем при экстраполяции соответственно структурной функции и нормированной корреляционной функции в области нуля. Очевидно, такие большие значения σ_0 определяются не только высокочастотными флуктуациями плотности в подоблачном слое, но и погрешностью измерений.

Как указывалось, мгновенные значения ВНГО нерепрезентативны, и представляет интерес прогноз средних и возможных минимальных значений за некоторый интервал (причем не мгновенный минимум, а, например, с длительностью больше заданной). В дальнейшем будет рассматриваться прогноз скользящих средних за 1, 2 и 4 минуты, получаемых соответственно по суммам 4, 8 и 16 измерений.

Различным методам статистической экстраполяции в теории фильтрации посвящено большое число работ. Для нашей задачи могут быть, в частности, использованы методы оптимальной фильтрации при конечном времени наблюдения, фильтры Калмана, дискретные фильтры, основанные

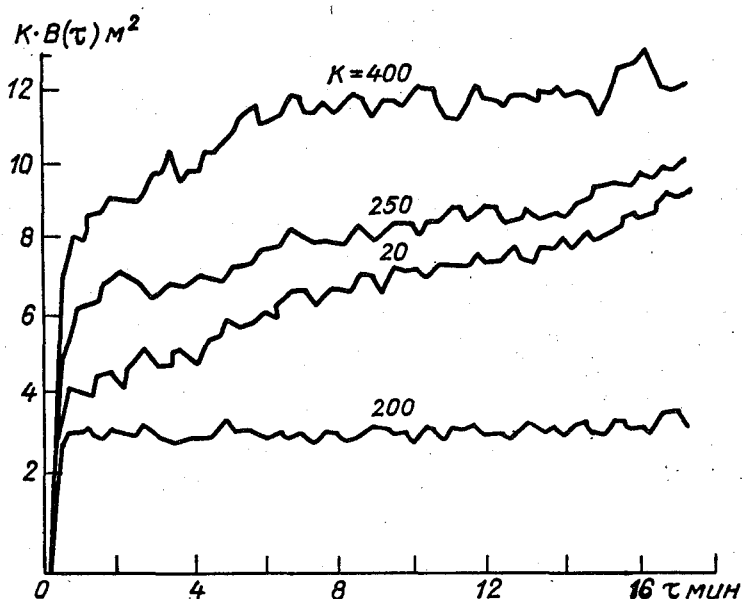


Рис. 2.

на приближении различными системами функций, и другие подходы, позволяющие учесть нестационарность процесса /8—13/.

Получение прогностического алгоритма и оценок часто упрощается при идентификации процесса достаточно простыми моделями. Ниже используется малопараметрическая модель авторегрессии — проинтегрированного скользящего среднего, подробно исследованная в работе /13/ и пригодная для стационарных временных последовательностей и для нестационарных последовательностей со стационарными приращениями d -го порядка. Рассматриваемая модель имеет вид

$$\Phi(B)(1-B)^d Z_i = \Theta_0 + \Theta(B) a_i, \quad (1)$$

где Z_i и a_i — текущие значения исследуемой дискретной временной последовательности и последовательности, представляющей собой дискретный "белый" шум с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_a^2 ; B — оператор запаздывания на шаг дискретизации ($B^m Z_i = Z_{i-m}$); $\Phi(B) = 1 - \Phi_1 B - \dots - \Phi_p B^p$; $\Theta(B) = 1 - \Theta_1 B - \dots - \Theta_q B^q$ — операторы авторегрессии и скользящего среднего соответственно порядка p и q ; $\Delta = 1 - B$ — разностный оператор ($\nabla Z_i = Z_i - Z_{i-1}$).

Выражение (1) определяет передаточную функцию дискретного фильтра, формирующего случайную последовательность Z_i из дискретного

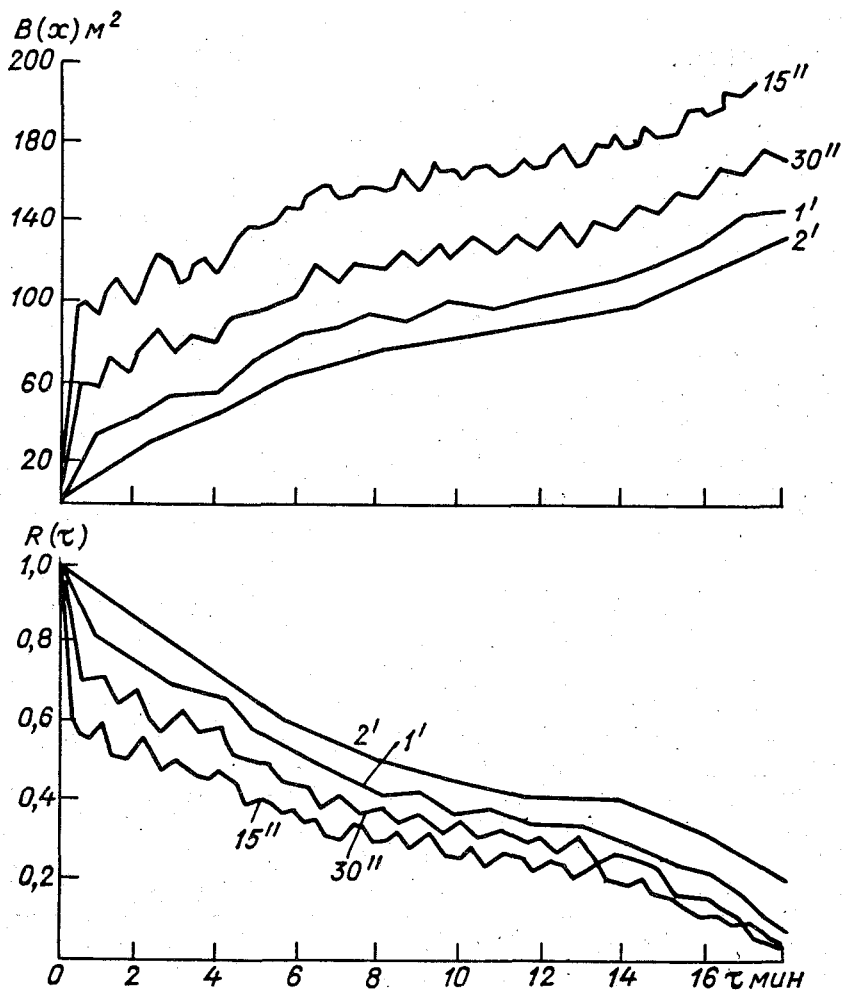


Рис. 3.

"белого" шума a_i на входе фильтра. Для стационарного приращения d -го порядка $\omega_{d_i} = \nabla^d Z_i$, фильтр является линейным и устойчивым, полюса и нули передаточной функции лежат вне единичного круга; для процесса Z_i d полюсов равны единице.

В целях предварительной идентификации модели (1), т. е. выбора значений p , d , q , и предварительных оценок параметров в [13] рекомендуется использовать вид выборочных автокорреляционной и частной автокорреляционной функции процесса и его разностей. Для рассматриваемо-

го подхода к прогнозу ВНГО, рассчитанного на автоматическое получение скользящей модели процессором без участия оператора, такой метод идентификации не подходит, особенно с учетом большого разброса оценок автокорреляционной и частной автокорреляционной функций, связанного с зашумленностью процесса и малым объемом выборки. Поэтому при автоматическом выборе модели на ЭВМ был заложен следующий метод — задана группа наиболее простых моделей, ограниченных параметрами: $0 \leq d \leq 2$ (т. е. исследуются модели со стационарностью самого процесса ($d = 0$), его первой ($d = 1$) и второй ($d = 2$) разности), $p + q \leq 2$ (т. е. ограничен суммарный порядок операторов авторегрессии и скользящего среднего). Оценивание параметров d , Φ_1 , Φ_2 в модели $(2, d, 0)$, d , Θ_1 , Θ_2 в модели $(1, d, 1)$, d , Θ_1 , Θ_2 в модели $(0, d, 2)$ осуществляется по методу наименьших квадратов. Модели $(1, d, 0)$ и $(0, d, 1)$ получаем как частные случаи. С учетом сравнительной малости выборки большее усложнение модели неоправдано, т. е. может быть не только малоэффективно, но и приводить к трудностям, связанным с избыточностью параметров. Во избежание таких трудностей в рассматриваемых моделях осуществляется контроль близости полюсов и нулей передаточной функции. В результате такой процедуры получаем на ЭВМ вид и параметры модели для всех реализаций. Автокорреляционные и частные автокорреляционные функции использовались лишь при интерпретации результатов. Модели процесса в каждой реализации строились для исходного ряда измерений с шагом 15 с, для прореженных рядов — с шагом 1 и 2 минуты, полученных из исходного ряда посредством взятия каждого 4-го (или 8-го) измерения и для сглаженных рядов с шагом 1 и 2 минуты, полученных из исходного ряда посредством суммирования 4 (8) измерений с шагом 15 с. Прореженные и сглаженные ряды используются для исследования влияния методов отбора измерительных данных (частоты измерений и осреднения).

Полученные для разных реализаций модели существенно различаются между собой (при близких средних значениях ВНГО), т. е. использование общей "средней" модели может быть малоэффективным в силу ее неадекватности для отдельных реализаций. Нужны, как указывалось, адаптивные модели. Значения d в полученных моделях варьируются от 0 до 2 (чаще всего $d = 1$). Наиболее распространенной явилась модель $(1, 1, 1)$, но характер параметров в этой модели (например, $\Phi_1 = 0,3$; $\Theta_1 = 0,8$), а также большее распространение среди других моделей варианта $(0, 1, 2)$ говорит о том, что общий крен для полученных данных имеет место в сторону модели проинтегрированного скользящего среднего и комбинированных моделей, а не модели авторегрессии, как это было найдено в [4]. Модели вариантов дискретных последовательностей, полученных из каждой реализации (исходный ряд, прореженные и сглаженные ряды с разным шагом), естественно, также различаются между собой.

При исследовании различных методов прогноза ставилась задача оценки влияния на эффективность прогноза его алгоритма, параметров, характеризующих получение исходных измерительных данных (частоты дискретизации, осреднения при получении отсчета) и параметров, характери-

зующих представление данных прогноза (интервала упреждения, осреднения при выдаче).

В дальнейшем для краткости прогноз на основе найденной модели процесса будем называть оптимальным. Как известно, при точном соответствии модели дискретной последовательности из разностного уравнения (1) получаем прогноз с минимальной средней квадратической погрешностью, причем вычислительная схема прогноза непосредственно вытекает из вида разностного уравнения /13/. Рассматривались задачи оптимального прогноза: 1) мгновенных значений последовательности с упреждением до 15 минут по мгновенным данным (при различной частоте дискретизации — шаг 15 с, 1 и 2 мин); 2) средних значений (за скользящие интервалы 1, 2 и 4 минуты при том же упреждении) по мгновенным данным; 3) средних значений за те же интервалы по осредненным (за 1 и 2 мин) данным (также при разной частоте дискретизации), т. е. осуществлялся оптимальный прогноз мгновенных и средних значений по исходному ряду, прореженным и сглаженным рядам. Сравнение результатов оптимального прогноза проводилось с инерционным прогнозом (ступенчатой экстраполяцией на тот же интервал результата последнего измерения). Для оценки эффективности оптимальных алгоритмов по сравнению с более простыми исследованы также алгоритмы ступенчатого прогноза по осредненным с равными весами данным, т. е. экстраполяция полиномами Лежандра нулевого порядка.

Приведем ряд примеров, иллюстрирующих количественные соотношения.

На рис. 4 для реализаций с близкими средними значениями и существенно различной высокочастотной изменчивостью представлены средние квадратические погрешности различных алгоритмов краткосрочного прогноза на интервал упреждения T . В качестве исходных данных используются ряды мгновенных и осредненных значений с одним и тем же шагом дискретизации (равным 1 мин). Расчет прогноза проводился для дискретных значений интервала упреждения, кратных 1 мин (на рис. 4 приведены сглаживающие кривые, проведенные через эти точки).

Кривые 1 и 2 соответствуют инерционному и оптимальному прогнозу мгновенных значений по ряду мгновенных (неосредненных) значений. Из рисунка видно, что оптимальный прогноз дает заметный выигрыш в точности за счет того, что оптимальный дискретный фильтр использует при прогнозе обработку не только последнего, но и предшествующих отсчетов. Использование при прогнозе рядов с шагом 15 с и 2 мин (результаты для этих случаев на рисунке не приведены) показывает, что погрешность оптимального прогноза мгновенных значений с ростом шага дискретизации T_g возрастает для всех значений интервала упреждения T , однако при $T_g \leq 2$ мин этот рост очень значителен. (При прогнозе средних значений выигрыш, достигаемый с повышением частоты дискретизации, значительно возрастает.)

На рис. 4. кривые 9, 10, 11 соответствуют оптимальному прогнозу средних значений за кусочно-скользящий интервал 1, 2 и 4 минуты при интервале упреждения до 12 минут по сглаженному за 1 мин ряду (кривая 9

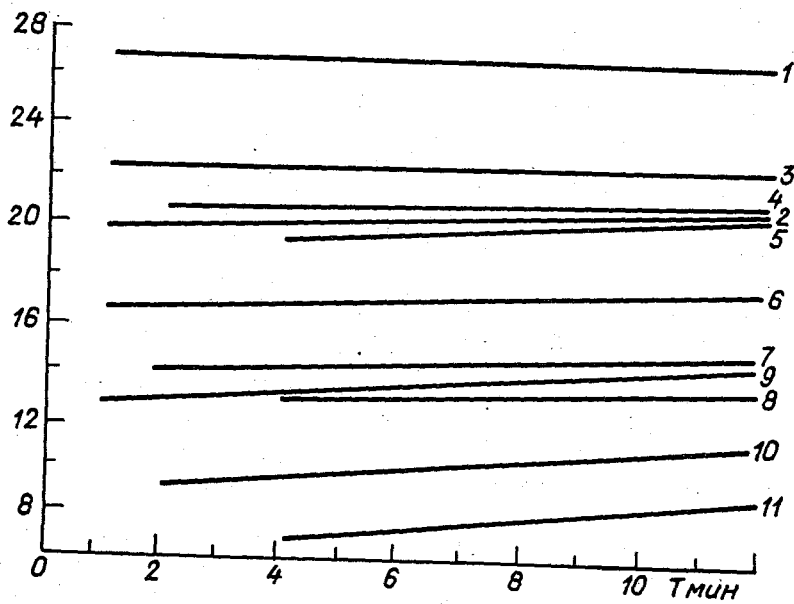
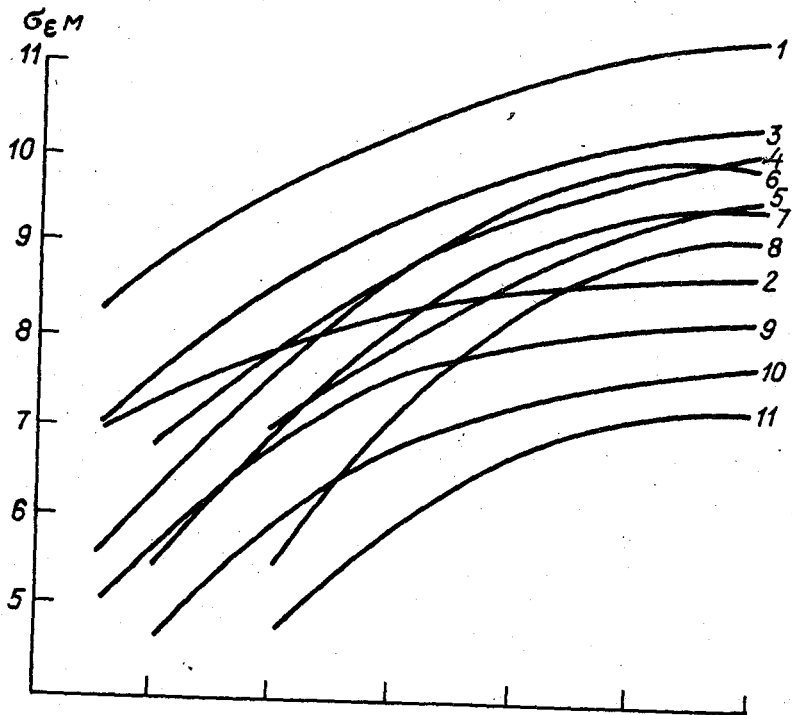


Рис. 4.

построена по результатам прогноза средних значений за интервалы 0–1, 1–2, ... , 11–12 минут, кривая 10 — средних за интервалы 0–2, 2–4, ... , 10–12 минут и кривая 11 — средних за интервалы 0–4, 4–8 и 8–12 минут от момента последнего измерения). Кривые 3, 4, 5 соответствуют инерционному прогнозу тех же величин, а кривые 6, 7, 8 — ступенчатому прогнозу по сглаженному за 1 мин ряду. Сравнение кривых 3–5, 6–8 и 9–11 показывает эффективность различных алгоритмов при прогнозе средних значений.

Оптимальный прогноз суммы для линейных алгоритмов, как известно, представляет сумму оптимальных прогнозов. Поэтому прогнозы средних за 1, 2, 4 минуты на рис. 4 по последовательности с меньшим шагом дискретизации находим после получения модели последовательности в виде суммы оптимальных прогнозов на соответствующие интервалы. Оптимальный прогноз средних по осредненным данным получаем по модели осредненной последовательности. Например, прогноз среднего за интервал 1–2 мин по ряду мгновенных значений с шагом 15 с получаем в виде среднего арифметического 4 прогнозов: на 1 мин 15 с, 1 мин 30 с, 1 мин 45 с, 2 мин; прогноз среднего на интервал 2–4 мин по осредненному за 1 мин ряду с шагом 1 мин — в виде среднего арифметического прогнозов по модели этого ряда на 3 и 4 мин и т. п.

Как видно из рис. 4, погрешность прогноза средних значительно меньше, чем прогноза мгновенных значений при том же упреждении и уменьшается с увеличением интервала осреднения для прогнозируемой величины. Для инерционного прогноза, в частности, количественный эффект получаем сравнением кривых 1, 3, 4 и 5 (интервал осреднения соответственно равен 0, 1, 2 и 4 мин).

Исследование погрешности оптимального прогноза осредненных значений ВНГО для последовательностей мгновенных значений с разной частотой дискретизации показывает, что рост частоты дискретизации приводит к повышению точности прогноза. Ход кривых для двух реализаций на рис. 4, т. е. прогноза от упреждения T , различен. Это связано с разным поведением структурных функций для этих двух реализаций в мезочастотной области (для второй реализации $B(\tau)$ в этой области меняется мало, т. е. тренд очень мал).

Рассмотрим влияние осреднения при получении отсчетов. На рис. 4 кривые 7, 8 и 9, 10 соответствуют погрешности оптимального прогноза осредненных значений по сглаженным за 1 (2) мин рядам с шагом 1 (2) мин. Из сравнения кривых 2, 3 и 5, 6 с кривыми 7, 8 и 9, 10 видно, что при той же частоте дискретизации использование в качестве отсчетов не мгновенных, а сглаженных значений значительно повышает точность оптимального прогноза.

Представляет интерес также сравнение погрешностей оптимального прогноза средних за скользящие интервалы 1, 2, 4 минуты по рядам, составленным из мгновенных измерений с шагом 15 с, и по сглаженным рядам с шагом 1 (2) мин, полученным из исходного ряда осреднением измерений. Для модели, точно соответствующей последовательности, очевидно, большую точность получаем при меньшем шаге дискретизации,

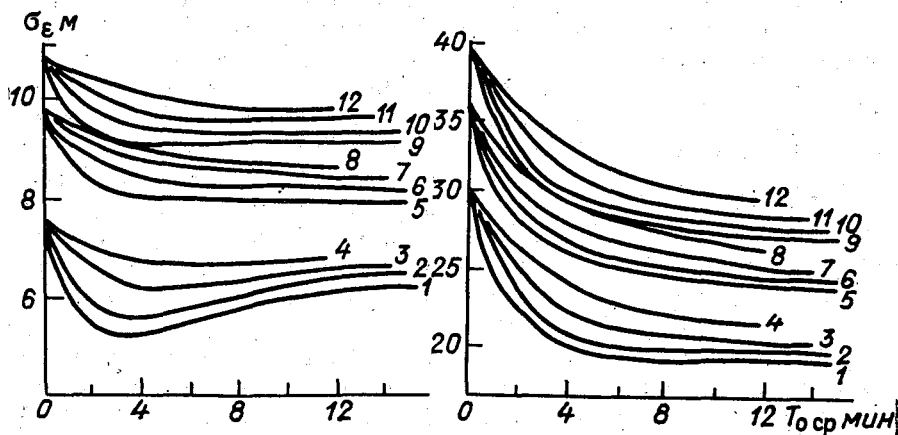


Рис. 5.

т. к. в этом случае оптимизируются веса для каждого измерения, а не для их групп (например, при осреднении за 1 мин для групп из 4 измерений; внутри же групп веса неизменны). Однако и в идеальном случае количественно эффект заметен лишь при большом шаге дискретизации (близком к предшествующему интервалу, используемому при прогнозе в соответствии с моделью последовательности). Для получаемых реально моделей при оптимальном прогнозе средних за минутные интервалы по ряду с шагом 15 с и осредненному по 4 измерениям ряду с шагом 1 мин, а также прогнозе средних за двух- и четырехминутные интервалы по указанным двум рядам и ряду с шагом 2 мин, осредненному по 8 измерениям, не наблюдалось заметной разницы. Это позволяет упростить построение модели и прогноз, заменив исходный ряд осредненным с меньшей частотой дискретизации. Как указывалось выше, при оптимальном прогнозе по мгновенным значениям уменьшение частоты дискретизации приводит к значительному понижению точности, так как при этом исключается информация, содержащаяся в промежуточных отсчетах, а не просто видоизменяются их веса.

Остановимся на влиянии частоты дискретизации и величины предшествующего интервала осреднения ($T_{\text{оср}}$) на погрешность ступенчатого прогноза (полиномом Лежандра нулевого порядка). На рис. 5 для двух реализаций приведены погрешности ступенчатого прогноза средних на интервалы 0–4 (кривые 1–4, шаг $T_{\text{д}}$ равен 15 с, 30 с, 1 и 2 мин), 4–8 (кривые 5–8) и 8–12 (кривые 9–12) минут в функции от $T_{\text{оср}}$ при разной частоте дискретизации. Значение $T_{\text{оср}}$ на рис. 5 определяется интервалом от момента прогноза до последнего привлекаемого при этом прогнозе измерения (число осредняемых измерений при одном и том же $T_{\text{оср}}$).

очевидно, зависит от частоты дискретизации). Точка $T_{\text{оср}} = 0$ является общей для кривых с разным шагом дискретизации и соответствует инерционному прогнозу.

Из рис. 5 видно, что с ростом частоты дискретизации точность ступенчатого прогноза возрастает. Зависимость погрешности прогноза от $T_{\text{оср}}$ имеет минимум при конечном значении $T_{\text{оср}}$ (для некоторых кривых на рис. 5 этот минимум не выражен, так как лежит за пределами значений $T_{\text{оср}}$, представленных на рисунке). Оптимальное значение $T_{\text{оср}}$ (соответствующее минимуму погрешности) сдвигается с увеличением шага дискретизации в область больших значений (число осредняемых измерений при этом уменьшается); минимальное значение погрешности с ростом T_g возрастает. Оптимальное значение T_g возрастает также с ростом интервала упреждения при прогнозе. Следует заметить, что при дальнейшем росте шага дискретизации T_g минимуму погрешности может соответствовать $T_{\text{оср}} = 0$, т. е. инерционный прогноз.

Для разных реализаций оптимальный интервал $T_{\text{оср}}$ при ступенчатом прогнозе на 0–4 мин и $T_g = 15$ с лежит в интервале 1–4 мин. Практически при $T_{\text{оср}} = 2$ мин получаем результат, близкий к оптимальному. На рис. 4, как указывалось, кривые 6, 7, 8 соответствуют погрешности ступенчатого прогноза при $T_{\text{оср}} = 1$ мин и $T_g = 15$ с скользящих средних за 1, 2 и 4 минуты при упреждении до 12 минут.

Из рис. 5 видно, что, как и при оптимальном прогнозе, рациональный выбор осреднения при получении отсчетов и повышение частоты дискретизации дает значительный выигрыш в точности по сравнению с инерционным прогнозом, особенно при прогнозе на малый интервал упреждения. Важно отметить, что на рис. 5, как и выше для оптимального прогноза, при анализе влияния частоты дискретизации рассматривалась погрешность прогноза в момент последнего измерения, т. е. не учитывалась дополнительная погрешность, связанная с увеличением среднего запаздывания измерительных данных с ростом шага дискретизации. Связанный с этим количественный эффект, который легко оценить из приведенных зависимостей для погрешности прогноза посредством увеличения интервала упреждения, еще более увеличивает рост погрешности прогноза с ростом T_g .

На рис. 6 для разных реализаций приведен выигрыш в точности Δ оптимальных алгоритмов прогноза средних за скользящий интервал 2 и 4 мин (при упреждении до 12 мин) по сравнению с инерционным прогнозом (кривые 3 и 6) и со ступенчатым прогнозом по данным, осредненным за 1 мин (кривые 1 и 4) и 2 мин (кривые 2 и 5). Сравнение оптимальных алгоритмов с инерционным прогнозом показывает крупный выигрыш в точности; по сравнению с алгоритмами ступенчатого прогноза при рациональном выборе их параметров ($T_{\text{оср}} = 1 \dots 2$ мин) выигрыш значительно меньше. Это позволяет использовать более простые неоптимальные алгоритмы. Эффективность таких алгоритмов связана с большой зашумленностью данных и значительным вкладом в повышение точности, обеспечиваемым одной лишь фильтрацией шума.

Полученные в данной работе точностные характеристики (математи-

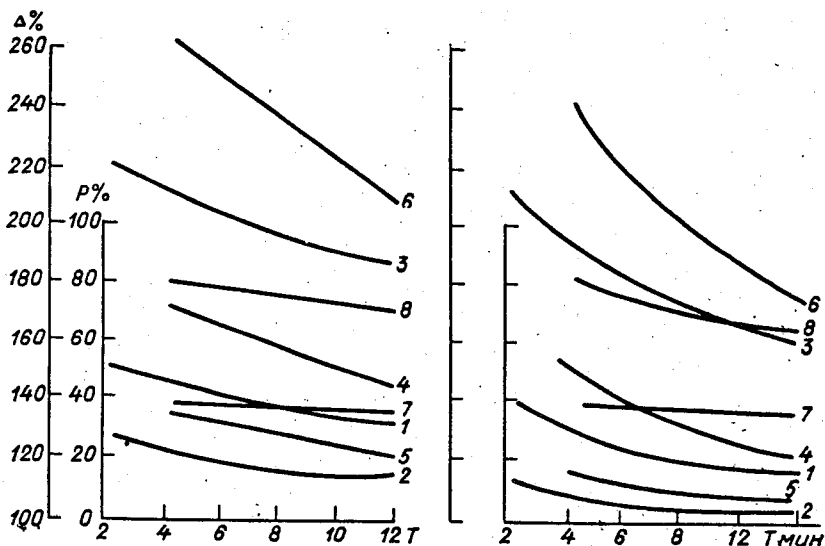


Рис. 6.

ческое ожидание и среднее квадратическое значение погрешности прогноза) позволяют получить другие интересующие нас характеристики прогноза (оправдываемость для произвольных градаций, информационные критерии) расчетным путем (с учетом близости распределения погрешности к нормальному). В частности, на рис. 6 кривые 7 и 8 соответствуют для кривой 6 оправдываемости оптимального и инерционного прогноза для градации $|\Delta H| \leq 10$ м. Полученные при обработке прогнозов и расчетные значения оправдываемостей P близки между собой.

Основные результаты, полученные в работе, сводятся к следующему.

1. Рассмотрен общий подход к краткосрочному прогнозу ряда метеорологических элементов, прежде всего ВНГО, МДВ, параметров ветра.

2. Исследована погрешность сверхкраткосрочного прогноза ВНГО по измерениям в одной точке в функции от интервала упреждения, частоты дискретизации, осреднения при получении измерений, осреднения при выдаче данных, вида и параметров прогностического алгоритма.

3. Полученные в работе результаты могут быть полезны для оценки погрешностей и выбора алгоритмов краткосрочного прогноза и для выбора параметров системы метеорологических измерений на аэродроме, а

также методики измерений ВНГО и характеристик приборов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наставление по метеорологическому обеспечению гражданской авиации (НМОГА-73). — Л.: Гидрометеиздат, 1973. — 76 с.
2. Рубинштейн М. В. Объективный метод прогноза высоты нижней границы облаков на 1—2 часа. — Тр. Гидрометцентра СССР, 1969, вып. 45, с. 3—13.
3. Абрамович К. Г. Условия образования и прогноз низких облаков. — Л.: Гидрометеиздат, 1973. — 124 с. (Труды Гидрометцентра СССР. Вып. 78.)
4. Финогеев Д. В. Об использовании модели авторегрессии для прогноза временных рядов высоты нижней границы облаков. — Тр. ГГО, 1980, вып. 435, с. 114—119.
5. Ременсон В. А., Финогеев Д. В. О применении метода экспоненциального сглаживания для прогнозирования ВНГО по данным учтенных измерений в одном пункте. Межведомственный сборник. Л., 1978, № 68, с. 60—67.
6. Персин С. М. Приближенные методы расчета и экстраполяции экстремальных характеристик случайных процессов и полей. — Тр. ГГО, 1980, вып. 413, с. 89—97.
7. Анискин Л. В., Персин С. М. Прогнозирование абсолютного экстремума случайного процесса. — Тр. ГГО, 1977, вып. 377, с. 125—134.
8. Катковник В. Я., Полуэктов Р. А. Многомерные дискретные системы управления. — М.: Наука, 1966. — 416 с.
9. Ривкин С. С. Метод оптимальной фильтрации Калмана и его применение в инерциальных навигационных системах. — Л.: Судостроение, ч. 1, 1973, 146 с., ч. 2, 1974, 156 с.
10. Катковник В. Я. Линейные оценки и стохастические задачи оптимизации. — М.: Наука, 1976. — 488 с.
11. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. — М.: Мир, 1976. — 756 с.
12. Поляк И. И. Численные методы анализа наблюдений. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. — 212 с.
13. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. — М.: Мир, 1974, вып. 1. — 406 с.

Л. Ф. Школяр, Г. Ф. Ивлева, Л. Н. Щербакова

ОБ ИЗМЕРЕНИИ БОЛЬШИХ СКОРОСТЕЙ ВЕТРА АНЕМОРУБОМЕТРОМ М-63М И ФЛЮГЕРОМ С ТЯЖЕЛОЙ ДОСКОЙ

В настоящее время в связи с проведением исследований по установлению влияния антропогенных факторов на ход метеорологических элементов значительно возросли требования к репрезентативности метеорологических станций и однородности их рядов наблюдений.

Известно /3/, что нарушение однородности рядов наблюдений может быть вызвано различными причинами, основными из которых являются следующие: изменения в окружении станции, замена приборов или их установок, изменения в методике или в сроках производства наблюдений, субъективность производства наблюдений.

В данной статье рассматривается вопрос об однородности рядов наблюдений за большими скоростями ветра (свыше 10 м/с). Необходимость проведения такой работы была обусловлена тем, что на метеорологических станциях для измерения скорости и направления ветра установлены анеморумбометры М-63М вместо флюгеров.

С целью выявления эксплуатационных особенностей М-63М и определения величин расхождений в показаниях ветровых приборов в середине 60-х годов на метеорологических станциях проводились параллельные наблюдения по М-63М и флюгеру с легкой доской. Полученные результаты были опубликованы в работах /2, 5, 6/, в которых констатируется факт хорошей сходимости показаний М-63М и ФВЛ в диапазоне скоростей ветра от 1 до 7 м/с, а также высказывается предположение о сохранении ее и при скоростях ветра порядка 10-12 м/с.

В работе /1/ проведен анализ сопоставления значений больших скоростей ветра, измеренных анеморумбометром М-63М и флюгером с тяжелой доской, в различных районах СССР. На основании анализа данных сделаны выводы о том, что при больших скоростях ветра имеются довольно существенные расхождения между показаниями рассматриваемых ветровых приборов — до 6 м/с.

Учитывая результаты ранее проделанных работ по сопоставлению показаний ветровых приборов, следует отметить, что для флюгера с легкой доской и анеморумбометра М-63М получены выводы на основании анализа большого объема материалов. Что же касается флюгера с тяжелой доской, то в работах рассматривались только отдельные случаи, что является недостаточным для оценки расхождений измерений, полученных по флюгеру и М-63М.

В связи с этим для получения обоснованных данных о расхождениях показаний ветроизмерительных приборов М-63М и флюгера с тяжелой доской при больших скоростях ветра в 1978-1981 гг. в ряде районов СССР, где отмечаются сильные ветры, были проведены параллельные наблюдения по флюгеру с тяжелой доской и анеморумбометру М-63М. В дальнейшем материалы сравнительных наблюдений по 20 станциям (всего 1449 случаев) из Мурманского, Северного, Амдерминского, Диксонского, Тиксинского и Певекского УГКС были обобщены и проанализированы.

Полученные результаты расхождений между значениями скоростей ветра по флюгеру с тяжелой доской и М-63М, а также их повторяемость в зависимости от различных скоростей ветра представлены в табл. 1.

Как видно по данным табл. 1, скорости ветра по флюгеру с тяжелой доской в большинстве случаев либо больше показаний М-63М, либо равны им. Так, равенство скоростей ветра, снятых по двум приборам, отмечается в 42 % случаев, а в 38 % случаев флюгер дает превышение на

Значения расхождений средних скоростей ветра между показаниями ФВТ и М-63М
и повторяемость их в диапазоне от 10 до 34 м/с

Расхож- дения	Средняя скорость (флюгер), м/с													Повторяе- мость рас- хождений, %			
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	24	26	28	34	Число случаев	Повторяе- мость рас- хождений, %
-3	1										1					2	0,1
-2	15		4		2		2		1		3					27	1,9
-1	59	10	65	16	38	7	19	2	4		7	2				229	15,8
0	49	39	174	47	154	10	67	4	43	2	12	1		2		604	41,7
1	3		109	25	134	12	67	8	32	1	25	6				422	29,2
2			4		49	7	30	4	19	2	12	3		1		131	9,0
3			3		2		2		2		2	7	1		1	20	1,4
4	1				1		1				1	2	1	2		10	0,7
5									2							2	0,1
6									1		1					2	0,1
Число случаев	128	49	359	88	380	37	188	18	104	5	64	21	2	5	1	1449	100

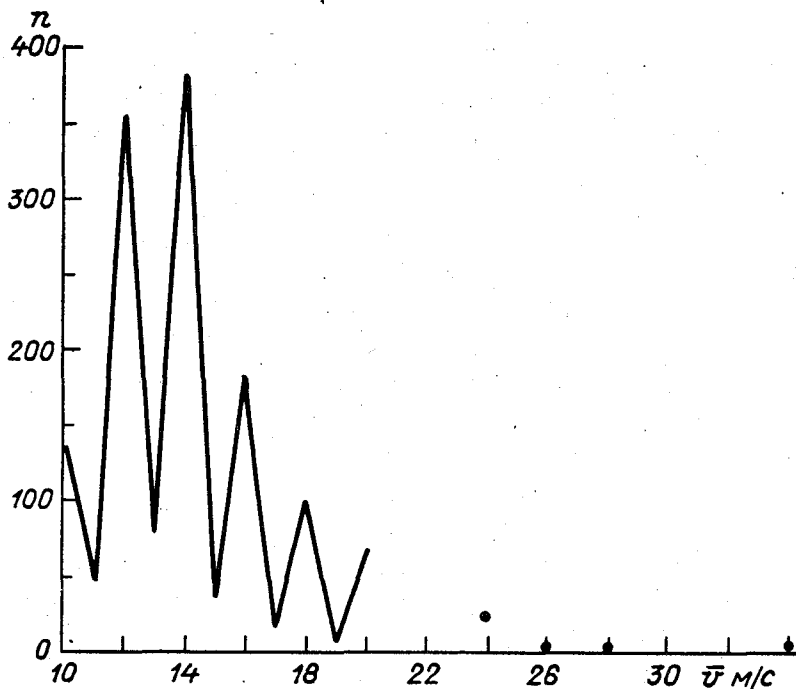


Рис. 1.

1—2 м/с, в 2 % случаев — на 3—4 м/с.

Следует также отметить, что наиболее частая повторяемость скоростей ветра приходится на 12—14 м/с и составляет 57 % общего числа случаев. Скорости от 20 до 34 м/с встречаются редко, и повторяемость их составляет всего лишь 6 %. При этом значения скоростей 21—23, 25, 27, 29—33 м/с ни разу не были зафиксированы, что можно объяснить особенностями конструкции флюгера с тяжелой доской (нелинейностью его шкалы). Такое расположение штифтов не дает возможности производить отсчет через 1 м/с, и поэтому имеют место ошибки в определении скоростей при сильных ветрах.

Другая причина, обуславливающая завышение скоростей ветра по флюгеру, заключается в том, что наблюдатели допускают субъективные ошибки, отдавая предпочтение 8 основным румбам.

В качестве примера завышения скоростей по флюгеру на рис. 1 представлены данные наблюдений за скоростью ветра по флюгеру с тяжелой доской: по оси ординат отложено число случаев (n), а по оси абсцисс — градации соответствующих средних скоростей ветра (\bar{V}).

Из рис. 1 видно, что действительно при производстве наблюдений отдается предпочтение четным штифтам — на графике получилась "пила".

Кроме того, ошибки в наблюдениях по флюгеру могут быть вызваны еще и тем, что для сильных ветров характерна большая порывистость, и наблюдения по флюгеру, осредненные за 2 минуты, часто не отражают действительных скоростей ветра. В соответствии с этим можно сказать, что несмотря на техническую простоту флюгера, долгий срок службы на сети метеорологических станций, удобство его эксплуатации, качество наблюдений за скоростью и направлением ветра, как отмечалось в работе /4/, является в общем невысоким.

Одновременно с анализом расхождений средних скоростей ветра за отдельные сроки был проведен анализ изменения средних скоростей за сутки. Так, за период сравнительных наблюдений были получены средние скорости ветра 10 м/с за каждый срок наблюдений по 5 станциям.

На рис. 2 в качестве примера представлены графики средних скоростей ветра (\bar{V}), полученные отдельно для флюгера с тяжелой доской (сплошная линия) и М-63М (пунктирная линия) по ст. о. Харлов (1), о. Врангеля (2), о. Айон (3), о. Четырехстолбовый (4) и Уэлен (5).

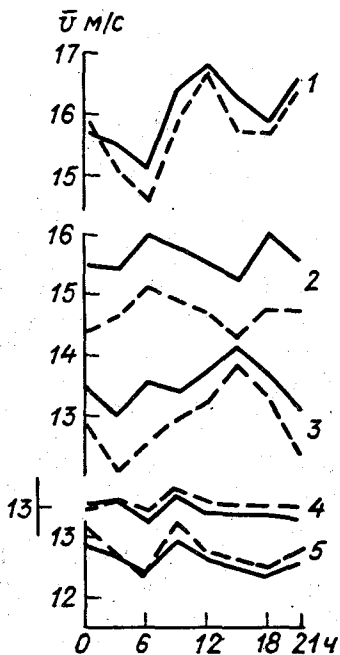


Рис. 2.

18 % случаев занижение на 1–2 м/с).

2. В районах, для которых характерны большие скорости ветра, показания анеморумбометра М-63М и флюгера с тяжелой доской различаются

Как видно из рис. 2, значения скоростей ветра по флюгеру с тяжелой доской во все сроки наблюдений в основном больше скоростей ветра по М-63М или равны им. При этом чем больше средние значения скорости ветра, тем больше расхождения в показаниях приборов (ст. о. Врангеля — до 1,5 м/с, ст. о. Айон — до 0,9 м/с; на ст. Уэлен и о. Четырехстолбовый эти значения или равны, или на 0,1–0,2 м/с превышают аналогичные по ФВТ).

На основании выполненного анализа результатов параллельных наблюдений по анеморумбометру М-63М и флюгеру с тяжелой доской можно сделать следующие выводы.

1. Показания флюгера с тяжелой доской в большинстве случаев равны или выше показаний анеморумбометра М-63М. Расхождения показаний флюгера при скоростях ветра от 12 до 34 м/с с М-63М составляют 1–4 м/с (равенство скоростей — в 42 % случаев, превышение на 1–2 м/с — в 38 % случаев и на 3–4 м/с — только в 2 % случаев; в остальных

до 4 м/с, что может привести к нарушению однородности рядов наблюдений. В связи с этим при оценке рядов наблюдений в указанных районах необходимо учитывать дату установки анеморумбометра М-63М.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бернгардт Р. П., Заварина М. В. Климатическая оценка точности измерения больших скоростей ветра. — Тр. ГГО, 1974, вып. 333, с. 121—128.
2. Временные методические указания гидрометеорологическим станциям и постам (установка и эксплуатация М-63). — Л.: Гидрометеиздат, 1965. — 12 с.
3. Дроздов О. А. Основы климатологической обработки метеорологических наблюдений. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1956. — 300 с.
4. Методы климатологической обработки метеорологических наблюдений /Под ред. О. А. Дроздова. — Л.: Гидрометеиздат, 1957. — 492 с.
5. Смирнов С. А. Сравнительные характеристики скорости и направления ветра, определенные приборами с различными интервалами осреднения. — Тр. ГГО, 1965, вып. 174, с. 135—147.
6. Смирнов С. А. Некоторые результаты сравнительных наблюдений по анеморумбометру М-63 и флюгеру. — Тр. ГГО, 1967, вып. 214, с. 31—33.
7. Школяр Л. Ф. К вопросу об уменьшении скорости ветра за последнее десятилетие. — Тр. ГГО, 1980, вып. 435, с. 96—99.

Е. А. Федорова

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ РАДИОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ АРМС М-107

Исследования по методическим вопросам построения системы метеорологических наблюдений, которые были выполнены в последние годы, позволили определить оптимальные требования к размещению пунктов измерения метеорологических параметров по территории с учетом пространственно-временной структуры полей основных метеорологических элементов. На основании результатов этих исследований выявлено, что существующая сеть наземных метеорологических станций в ряде районов СССР, в том числе в районах интенсивного хозяйственного освоения, не обеспечивает эти требования, что в значительной степени затрудняет решение многих вопросов современного обслуживания народнохозяйственных организаций, службы прогнозов и изучения метеорологического режима территории /1/.

Для получения дополнительной метеорологической информации из труднодоступных и малообжитых районов, где сеть наземных метеорологических станций недостаточна, организована сеть автоматических станций, которая в настоящее время оснащена станциями АРМС М-107 /2/.

Информация АРМС может быть успешно использована только совместно с данными наблюдений основных метеорологических станций, поэтому

для получения сопоставимых характеристик методика обработки данных АРМС и основных станций должна быть одинаковой.

Особенности автономной работы станции М-107, а также ее технические возможности не обеспечивают достаточную полноту и надежность информации. Большое число пропущенных сроков измерения (пропусков) по причине отказа отдельных блоков и измерительных преобразователей АРМС, а также из-за трудностей приема радиogramм станции вызвало необходимость уточнения методики обработки метеорологической информации при наличии пропусков в ряду наблюдений.

Пропуски наблюдений на основных метеорологических станциях являются весьма редкими и могут быть восполнены данными других приборов, имеющихся на станции, либо методом интерполяции по данным соседних станций /3/. Пропуски же в данных АРМС не могут быть восполнены в связи с тем, что АРМС работают в малоизученных районах с редкой сетью метеорологических станций, привлечение которых для интерполяции пропущенных наблюдений АРМС невозможно. В связи с этим при обработке данных АРМС и прежде всего при вычислении средних суточных и месячных значений метеорологических элементов, которые являются наиболее распространенными показателями метеорологического режима, следует определить необходимое и допустимое количество пропусков наблюдений.

Известно, что получение средних значений за различные периоды производится в соответствии с международными нормами /4/. Наиболее надежные данные о средней суточной температуре воздуха можно получить, если имеются ежечасные измерения; близкие к ним средние суточные значения могут быть получены по данным измерений в несколько равноотстоящих моментов времени в течение суток, которые достаточно надежно представляют суточный ход температуры /5/. В СССР принято измерять температуру воздуха и другие метеорологические элементы 8 раз в сутки (8 сроков) по московскому времени через 3 часа /6/.

Станции АРМС производят измерения в те же 8 сроков, поэтому при пропуске отдельных сроков в течение суток средние суточные значения приходится вычислять по меньшему числу измерений с разными интервалами времени между измерениями (сроками).

Для оценки надежности суточной температуры воздуха, вычисленной по разному числу сроков, по данным наблюдений ряда станций Забайкальского, Северного и Камчатского УГКС за период 1961—1964 гг. было проведено сравнение средних суточных значений, полученных по 8—4 срокам, со средней суточной температурой, полученной по ежечасным наблюдениям (средней 24 сроков). Результаты сравнения для станций Чита, Нерчинский Завод и Троицкий Прииск Забайкальского УГКС приведены на рис. 1.

На оси абсцисс отложена разность (Δt) средних суточных значений температуры, вычисленных по 8- или 4-срочным наблюдениям, и средней за 24 срока, а по оси ординат — повторяемость этих разностей ($P\%$), выраженная в процентах от общего числа случаев сравнения (более 1,5 тыс.). Кривые изображают распределение повторяемостей различных величин

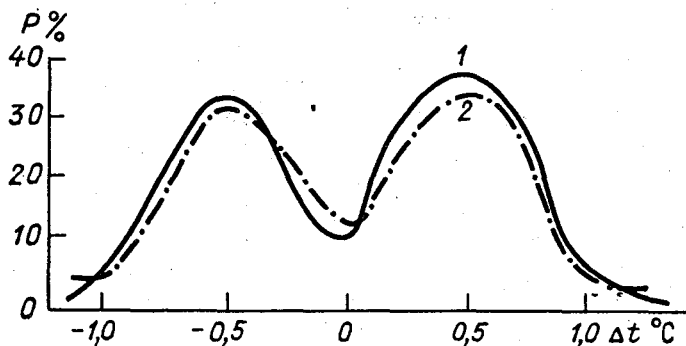


Рис. 1.

Δt (1 — отклонение средней за 8 сроков от средней за 24 срока; 2 — отклонение средней за 4 срока от средней за 24 срока).

Как видно из рис. 1, отклонение средних суточных значений из 8 и 4 равноотстоящих сроков от средней из 24 ежечасных измерений ("истинной" средней) в 82 % случаев не превышает $\pm 0,5^\circ \text{C}$.

Средние суточные значения, вычисленные из 8 и 4 сроков с интервалами измерений 3 и 6 часов соответственно, практически совпадают.

Аналогичные выводы получены по станциям Северного и Камчатского УГКС.

При пропуске 1—3 сроков из 8 средние суточные значения из 5—7 сроков имеют значительно большие отклонения от "истинной" средней, чем средние из 4 сроков при одинаковом интервале между ними.

Для примера в табл. 1 приведены средние суточные значения температуры воздуха за отдельные дни по наблюдениям на станции Чита.

Анализ результатов сравнений позволяет рекомендовать при пропусках отдельных сроков вычислять средние суточные значения температуры воздуха по 4 срокам с равными интервалами между сроками при условии, что интервал между сроками равен 6 часам, при этом промежуточные сроки не должны учитываться, даже если в эти сроки имеются наблюдаемые значения температуры. При пропусках 2 и более сроков подряд вычисление средних за сутки нецелесообразно. Эта рекомендация уже внедрена в практику при "ручной" обработке информации АРМС и использована при составлении программ обработки на ЭВМ /7/.

Средние месячные значения температуры воздуха при полном ряде наблюдений без пропусков могут быть получены из суммы всех срочных значений за месяц либо из суммы средних суточных значений.

В связи с тем, что разность между средними суточными значениями из 8 и 4 равноотстоящих сроков невелика, использование неполного ряда наблюдений для вычисления средних месячных значений возможно по

сумме средних суточных значений, вычисленных по 8 или 4 срокам. Подтверждением этому могут служить данные табл. 2 и 3.

Таблица 1

Средняя суточная температура воздуха, вычисленная по различному числу сроков.
Ст. Чита, 1964 г.

Дата	Число сроков							Амплитуда
	24	8	4 (00, 06, 12, 18)	4 (03, 09, 15, 21)	5	6	7	
03. 01	-32,6	-32,4	-32,4	-32,4	-33,2	-33,0	-32,4	12,2
09. 01	-27,1	-26,8	-26,8	-26,8	-27,9	-27,4	-26,8	12,4
15. 01	-19,2	-19,0	-18,8	-19,2	-19,9	-19,4	-19,4	9,8
27. 01	-21,7	-20,6	-20,9	-21,4	-22,4	-21,6	-21,0	11,5
03. 04	-9,2	-9,3	-8,2	-10,0	-7,9	-7,3	-8,0	16,0
09. 04	1,4	1,2	1,7	0,8	1,6	2,0	2,1	9,3
15. 04	1,9	1,7	0,8	2,6	0,6	0,7	1,6	15,3
21. 04	-3,7	-3,6	-3,5	-3,8	-3,9	-3,7	-3,5	4,4
27. 04	7,5	7,9	6,9	8,9	5,4	7,1	8,5	22,2
03. 07	14,7	14,9	15,7	14,2	13,0	14,2	15,3	15,2
15. 07	15,1	14,7	14,9	14,5	13,6	15,2	15,4	17,7
21. 07	12,7	12,5	12,6	12,6	12,9	12,9	12,9	3,6
27. 07	17,1	16,7	15,4	18,0	15,0	16,1	17,1	11,8

Таблица 2

Сравнение средних месячных значений температуры воздуха по данным за 24 (T_{24}), 8 (T_8) и 4 (T_4) срока наблюдений

УГКС	Число случаев	Разность температур	Повторяемость разностей (%)			
			0,0°	≤±0,2	≤±0,5	> 0,5
1. Таджикское	334	$T_8 - T_{24}$	77	99	99,7	0,3
		$T_4 - T_{24}$	24	79	97	3
2. Западно-Сибирское	154	$T_8 - T_{24}$	87	100		
		$T_4 - T_{24}$	28	98	100	
3. Забайкальское	109	$T_8 - T_{24}$	63	95	99	1
		$T_4 - T_8$	40	91	99	1
4. Латвийское	164	$T_4 - T_8$	36	95	100	

Средние месячные значения температуры воздуха (t)
и скорости ветра (V) по данным за 24, 8 и 4 срока наблюдений

Станция	Период наблюдений	Число сроков			σ_{240}	σ_{120}
		24	8	4		
Температура воздуха						
Архангельск	I 1961	-8,7	-8,6	-8,6	6,72	6,78
	VII 1961	19,0	19,0	18,9	4,79	4,71
	I 1962	-8,4	-8,7	-8,6	6,67	6,57
	VII 1962	14,9	14,9	14,8	4,33	4,23
	I 1963	-16,9	-16,9	-16,9	6,02	5,88
	VII 1963	15,3	15,3	15,3	5,10	5,00
Скорость ветра						
Красноярск	I 1962	5,4	5,4	5,4	2,10	2,09
	I 1963	4,8	4,7	4,7	2,08	2,14
Кызыл	I 1961	1,0	1,0	0,9	1,17	1,24
	X 1961	3,2	3,2	3,2	1,89	1,97

В табл. 2 приведены результаты сравнения средних месячных значений температуры воздуха, вычисленной из ежедневных, 8 и 4-срочных наблюдений. Разность средних месячных значений, вычисленных из разного числа сроков, в большинстве случаев не превышает $0,5^{\circ}\text{C}$.

В табл. 3 помещены результаты вычисления средних месячных значений температуры воздуха и скорости ветра для отдельных месяцев по данным нескольких станций. Средние месячные значения получены из суммы средних суточных значений, которые вычислялись по 24-, 8- или 4-срочным наблюдениям. Разница средних месячных значений не превышает $0,1^{\circ}\text{C}$ для температуры воздуха и $0,1\text{ м/с}$ для скорости ветра; при этом величины изменчивости (σ) для 8- и 4-срочных наблюдений (248 и 124 случая за месяц) различаются незначительно.

Таким образом, при пропусках отдельных сроков средняя месячная характеристика температуры воздуха и скорости ветра может быть вычислена достаточно надежно, если можно получить средние суточные значения для каждых суток в течение месяца.

В тех случаях, когда среднее суточное значение не может быть вычислено из-за пропусков нескольких сроков подряд, среднее месячное значение должно вычисляться по неполному числу дней в месяце. Как было показано в работе [3], для определения надежности средних месячных значений, полученных по неполному ряду наблюдений, необходимо в каждом конкретном случае знать изменчивость метеорологического элемента в ряду осреднения. Так, например, наличие 50 пропусков наблюдений в течение

Средняя месячная температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$) по восьми срокам и при пропуске отдельных сроков (1-я строка) и среднее квадратическое отклонение температуры воздуха за разное число сроков (2-я строка) для различных станций

		Число сроков/ пропущенный срок									
		7	7	7	7	7	7	7	7	4	4
8		00	03	06	09	12	15	18	21	21,	0,6,
										3,9,	12,
										15	18
Алма-Ата (июль 1979 г.)											
23,2	23,8	24,0	23,2	22,8	22,5	22,6	23,3	23,2	23,3	23,2	23,2
5,31	4,82	4,68	5,07	4,88	4,59	4,52	5,21	5,28	4,30	5,43	5,43
Стерлитамак (июль 1975 г.)											
21,4	21,4	22,0	22,3	22,0	21,2	20,8	20,6	20,8	21,4	21,4	21,4
5,57	5,84	5,56	5,18	5,58	5,76	5,52	4,77	5,99	4,75	6,28	6,28
Воейково (апрель 1979 г.)											
1,6	1,6	2,0	2,1	1,7	1,3	1,1	1,3	1,7	1,4	1,8	1,8
5,73	5,17	5,79	5,75	5,92	5,77	5,69	5,52	6,13	4,45	6,78	6,78
Четырехстолбовый (январь 1978 г.)											
-26,8	-26,7	-26,7	-26,7	-26,8	-26,8	-26,8	-26,7	-26,8	-26,7	-26,8	-26,8
4,80	4,79	4,80	4,83	4,80	4,82	4,76	4,46	5,13	4,26	5,29	5,29
Четырехстолбовый (июль 1978 г.)											
1,2	1,3	1,3	1,3	1,2	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
1,81	1,75	1,69	1,79	1,87	1,84	1,84	1,77	1,94	1,64	1,98	1,98
Репетек (июль 1978 г.)											
31,9	32,3	32,7	33,2	32,4	31,4	31,1	31,0	31,3	32,3	31,6	31,6
6,35	6,60	6,28	5,57	6,58	6,55	6,23	5,64	6,82	5,23	6,39	6,39

месяца при среднем квадратическом отклонении значений температуры до 7°C позволяет получить среднюю месячную температуру с точностью 1°C . Исходя из этого, число пропусков для вычисления средних месячных значений по данным АРМС может быть ограничено условно с учетом точности датчиков АРМС и возможной точности средних месячных значений при неполном ряде наблюдений /2/. Наряду с вычислением средних месячных значений по средним суточным можно вычислять также среднюю из всех наблюдений, т. е. использовать в те сроки, которые были исключены при вычислении средних суточных значений для получения равных интервалов между сроками.

О различии средних месячных значений температуры воздуха, получен

ных по полному ряду наблюдений и при пропусках, можно судить по данным табл. 4, в которой приведены средние месячные значения температуры из 248 (8 сроков наблюдений ежедневно), 124 (4 срока наблюдений ежедневно с интервалом 6 часов) и 217 (7 сроков ежедневно: в каждом случае пропущен 1 срок в течение месяца).

Во всех рассмотренных случаях разница средних месячных значений не превышает $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$. Наиболее близкие к средней месячной, полученной по полному ряду наблюдений (248 случаев при 8 сроках ежедневно), являются значения, полученные по 4-срочным наблюдениям; при пропуске одного из 8 сроков в течение месяца средние месячные значения имеют большие расхождения, но не превышают 1°C ; любое из приведенных значений удовлетворяет требованиям к точности средних месячных значений температуры воздуха для пункта наблюдений /8/.

Следует отметить, что средние квадратические отклонения (σ) значений температуры для каждого ряда осреднения различаются незначительно. Расхождения в средних месячных значениях температуры тем меньше, чем меньше σ для срочных значений в ряду осреднения (Четырехстолбовый, июль 1978 г.).

Увеличение числа пропусков до 50 случаев за счет исключения нескольких сроков подряд, или даже отдельных суток, не привело к значительному искажению средних месячных значений.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод о возможности вычисления средней месячной температуры воздуха при большом количестве пропусков (до 50 случаев) в течение месяца из суммы всех имеющихся значений независимо от того, можно ли по этим данным получить средние суточные значения для каждого дня в течение месяца, что является весьма важным, так как позволяет более полно использовать данные АРМС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспалов Д. П., Русин Н. П. Оптимальные требования к точности и объему метеорологической информации для автоматических станций. — В кн: Разработка и эксплуатация автоматических метеорологических станций. Труды II Международного симпозиума. Л., Гидрометеиздат, 1974, с. 17—25.
2. Бронштейн Д. Л., Быстромович А. Н., Макаренко А. А. Дистанционные метеорологические устройства, их монтаж и эксплуатация. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 391 с.
3. Грошева Л. А., Федорова Е. А. О вычислении средних месячных значений метеорологических элементов при пропусках наблюдений. — Труды ГГО, 1983, вып. 473, с. 53—58.
4. Блютген И. География климатов. Т. 1. — М.: Прогресс, 1972. — 368 с.
5. Беспалов Д. П., Светлова Т. П. О точности представления суточного хода метеорологических элементов по срочным данным. — Труды ГГО, 1971, вып. 260, с. 124—128.
6. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3, ч. 1. — Л.: Гид-

рометеиздат, 1969. — 306 с.

7. Временные методические указания по обработке наблюдений автоматических радиометеорологических станций. — Обнинск, 1974. — 20 с.
8. О составе, точности и пространственно-временном разрешении информации, необходимой для гидрометеорологического обеспечения народного хозяйства и службы гидрометеорологических прогнозов /Под ред. М. А. Петросянца и В. Д. Решетова. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. — 220 с.

В. Е. Карпуша, Р. А. Круглов, М. С. Стернзат

ПРОМЫШЛЕННЫЙ ОБРАЗЕЦ ИМПУЛЬСНОГО ФОТОМЕТРА ФИ—1

ФИ—1 разработан в целях удовлетворения возросших требований авиации по метеорологическому обеспечению взлета и посадки самолетов данными по метеорологической дальности видимости. В нем достигнуто значительное расширение диапазона измерения МДВ (до 50 метров), существенно снижено влияние фонового излучения, повышен ресурс работы источника света и фотопреобразователя, обеспечена цифровая индикация результатов измерений МДВ.

ФИ—1 представляет собой новый прибор, базирующийся на новой структурной схеме. Он также обладает рядом дополнительных преимуществ, которые хотя и не относятся к паспортным данным, но существенно влияют на его эксплуатационные свойства. Так, например, в ФИ—1 отсутствует обратный преобразователь, что наряду с устранением погрешностей преобразования электрического сигнала в оптический позволило упростить конструкцию фотометрического блока. Поскольку в фотометре ФИ—1 реализована схема статического уравнивания сигналов, основные составляющие погрешности имеют мультипликативный характер, а погрешность неравновесия имеет систематический характер и легко устраняется при градуировке. Это позволяет иметь запас по точности измерений в нижнем, наиболее ответственном, участке диапазона прозрачности. Глубина уравнивания автоматически поддерживается неизменной, что устраняет возможность возникновения автоколебаний при воздействии дестабилизирующих факторов и позволяет реализовать достаточно малую величину неравновесия в условиях эксплуатации. Применение импульсного источника света позволило исключить из конструкции электромеханический модулятор. Его роль выполняет синусоидальное напряжение питающей сети, которое через динисторную схему осуществляет поджиг импульсной лампы. В настоящее время минимальный ресурс работы импульсного источника света в ФИ—1 оценивается в 5000 часов непрерывной работы. И это далеко не предел, поскольку в отличие от лампы накаливания ресурс работы импульсной лампы может быть повышен без снижения яркости пропорционально уменьшению частоты вспышек.

Использование новых элементов (импульсный источник света, электронный модулятор, электромагнитный коммутатор) и новой формы свя-

зей между ними (структуры) обусловило упрощение конструкции фотометрического блока при сохранении и даже улучшении основных показателей. Этому способствовала также реализация ряда оригинальных технических решений /1, 2, 3, 4/. Благодаря этому введение дополнительных конструктивных элементов и блоков, обеспечивающих расширение диапазона измерения и цифровую индикацию, не привело к усложнению аппаратуры в целом.

При построении структурной схемы ФИ—1 максимально учитывался опыт предыдущих разработок. Были проанализированы свойства фотометра /5/ для измерения прозрачности атмосферы и фотометра для измерения спектров комбинационного рассеяния /6/, принятых ранее к практическому использованию и хорошо зарекомендовавших себя на практике. В этих приборах использован метод модуляции и коммутации световых потоков, при котором полученные в результате модуляции серии световых импульсов из опорного и измерительного каналов поступают поочередно на вход блока обработки. Блок обработки в этих приборах представляет собой одноканальную схему периодического сравнения измеряемой величины с образцовой. Такие схемы являются хорошо изученными и давно с успехом используются в измерительной технике /7/. Отличительной особенностью фотометра для измерения спектров комбинационного рассеяния является то, что операции сравнения предшествует преобразование оптического сигнала в постоянный ток. При этом сводится к минимуму влияние коммутационных помех. В этом приборе достигнута наиболее высокая точность измерений. К тому же в нем используется не компенсационная, а более простая дифференциальная схема сравнения. Этот прибор и был принят при разработке ФИ—1 в качестве прототипа.

Благодаря этому оказалось возможным достижение необходимой точности измерений в ФИ—1 даже при значительном разбросе яркости вспышек импульсной лампы.

Практически при выбранной структурной схеме оказалось достаточным предусмотреть осреднение амплитуд импульсов за несколько периодов коммутации для гарантии того, что погрешность измерения прозрачности нейтральных светофильтров не превысит 1—2 % по выносным стрелочным индикаторам при разбросе яркости вспышек импульсной лампы, достигающем 15 %.

Связанное с этим увеличение постоянной времени прибора обеспечило дополнительное сглаживание колебаний выходного напряжения фотометрического блока и соответственно кривой на ленте самописца, обусловленных короткопериодными флуктуациями прозрачности атмосферы.

Полевые испытания ФИ—1 подтвердили перспективность принятых в экспериментальном образце технических решений и позволили уточнить некоторые конструктивные параметры с целью оптимизации эксплуатационных характеристик. В частности, была уточнена длина дополнительной измерительной базы, предназначенной для измерения прозрачности в нижней части диапазона. Из-за отсутствия опыта эксплуатации на аэродромах приборов с базой менее 50 метров априорно длина короткой базы была установлена равной 10 метрам (из соображений необходимого за-

паса по диапазону и простоты технической реализации).

В дальнейшем было обнаружено, что в плотных туманах в определенных условиях их формирования могут иметь место значительные по величине и скорости изменения оптической плотности. Поскольку видимость порядка 50...200 м наблюдается редко и находится вне диапазона измерений существующих приборов, имеющиеся сведения о структуре плотных туманов весьма ограничены. Предугадать "поведение" прибора в этом диапазоне видимостей было практически невозможно. Потребовались экспериментальные исследования. Оказалось, что в условиях образования и рассеивания туманов имеют место частые автоматические переключения прибора с одной измерительной базы на другую из-за значительных флуктуаций прозрачности на короткой базе. Сравнительные испытания на базе 10 и 20 м показали, что одной из главных причин наблюдаемых флуктуаций прозрачности является локальный характер измерений на короткой базе. Увеличение длины базы до 20 м резко уменьшило частоту переключений и снизило вероятность их появления, повысило репрезентативность результатов измерений. В связи с этим в промышленном образце ФИ-1, кроме увеличения длины короткой базы, предусмотрено снижение нижней границы переключения диапазонов с 500 до 240 м и принудительное дистанционное включение ФИ-1 на работу в одном из выбранных по желанию оператора (наблюдателя) диапазонов измерений.

Оказалось, кроме того, целесообразным заменить заимствованный от предшествующих приборов, но мало подходящий для новой оптической схемы ФИ-1 трехкомпонентный объектив на более простую систему из двух компонентов.

Экспериментально исследован также вопрос помехоустойчивости при передаче результатов измерений на расстояние по проводному каналу связи. Первоначально предусматривалась дистанционная передача сигнала в виде частоты импульсов, пропорциональной значениям МДВ. Это обеспечивало снижение влияния мультипликативных помех в несколько раз (благодаря обратнологарифмической зависимости между МДВ и прозрачностью). Что касается аддитивных помех, то, с одной стороны, при одном и том же характере и уровне передаваемого сигнала их влияние теоретически возрастало в нижней части диапазона. С другой стороны, частотно-импульсная модуляция передаваемого сигнала позволяла практически избавиться от влияния помех при соответствующей его обработке на приемном конце линии связи. Обычно предусматриваемая в таких случаях операция ограничения последовательности импульсов по нижнему уровню могла гарантировать нужный эффект. Однако автоматические метеорологические станции типа КРАМС и АДМС, в составе которых должен работать фотометр ФИ-1, не имеют канала, рассчитанного на прием частотно-модулированной импульсной последовательности.

Поэтому в ФИ-1 предусмотрено обратное преобразование импульсов в постоянный ток. При этом для повышения помехоустойчивости функциональный преобразователь подключается к приемному концу линии связи, а в линию связи поступает сигнал в виде напряжения постоянного тока, пропорционального значениям прозрачности.

Таким образом, усовершенствования коснулись оптической и электрической схем, повлияли на состав аппаратуры и размещения отдельных блоков.

Общий вид фотометра показан на рис. 1, где приняты следующие обозначения: 1 — фотометрический блок, 2 — функциональный преобразователь, 3 — регистратор, 4 — цифровой индикатор, 5 — отражатель ближний, 6 — штатив, 7 — отражатель дальний, 8 — тренога, 9 — щит сетевого питания, 10 — стабилизатор.

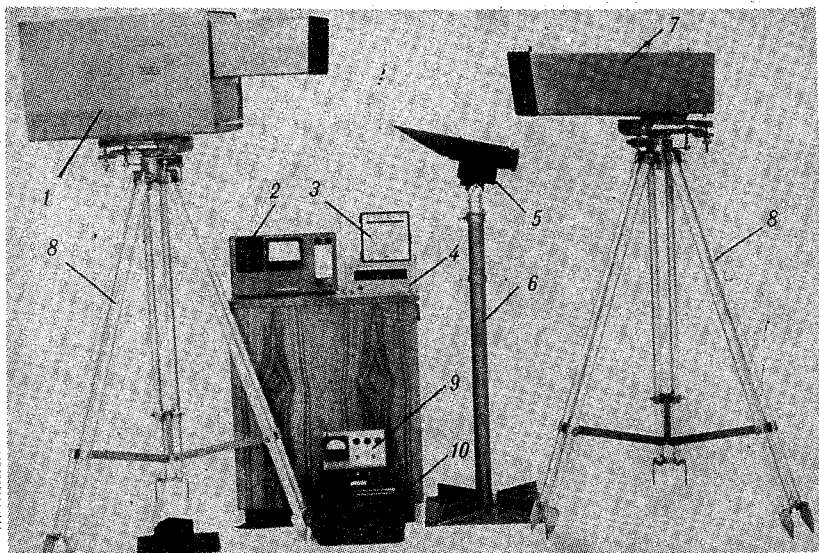


Рис. 1.

Общая схема фотометра показана на рис. 2.

Два отражателя (дальний — 1 и ближний — 2) расположены на расстояниях 100 и 20 м от фотометрического блока и смещены по высоте относительно друг друга. При этом оба отражателя находятся в зоне облучения прожектора, содержащего импульсный источник света 5 и объектив 4. Раздельный прием световых потоков от отражателей возможен потому, что вблизи фокальной плоскости приемного зеркала 11 установлена шторка 9 с двумя отверстиями D_1 и D_2 , расположенными в местах изображения отражателей. Одно из отверстий (D_1 или D_2) перекрыто шторкой переключателя диапазонов 10, который управляется дистанционно по проводной линии связи электрическими импульсами, поступающими от функционального преобразователя (ФП) в блок дистанционного управления (БДУ).

Коммутатор 12 устроен таким образом, что при работе с ближним отражателем перекрываются поочередно отверстия 1 и 8, а при работе с

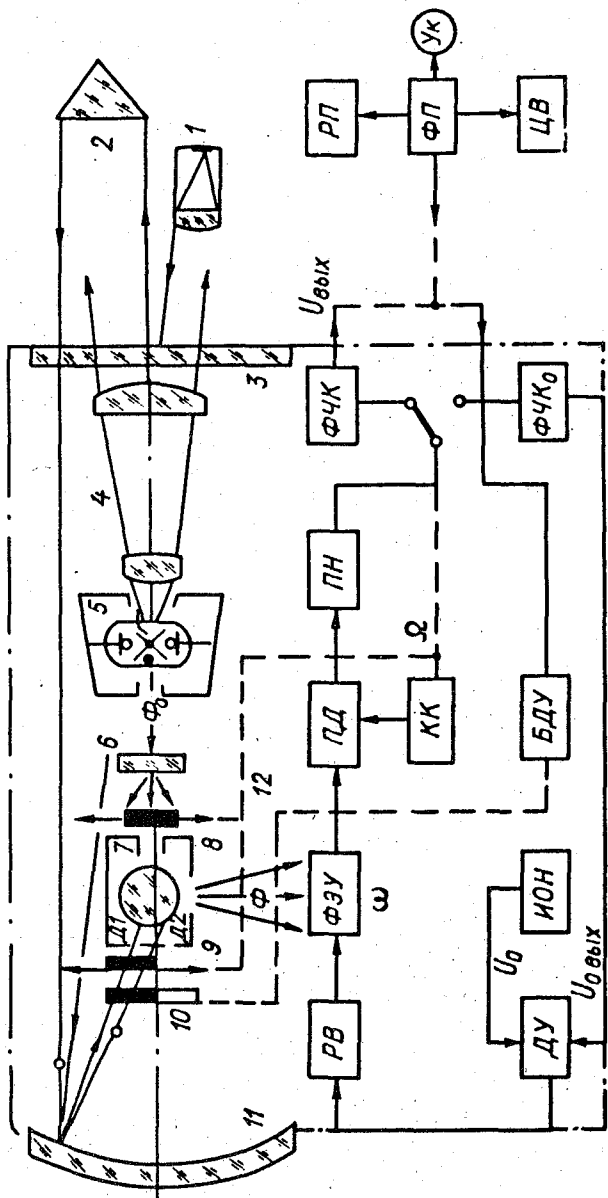


Рис. 2.

дальними — 2 и 8. Последовательности световых импульсов, следующих с частотой ω , поочередно с более низкой частотой коммутации Ω поступают через рассеиватель 7 на фотопреобразователь ФЭУ, а с его выхода на управляемый пиковый детектор ПД и повторитель напряжения ПН.

Когда отверстие диафрагмы 8 открыто, выход ПН через фильтр частоты коммутации ФЧК_о подключен к одному из входов дифференциально-усилителя, другой вход которого соединен с источником опорного напряжения ИОН. Выход ДУ подключен к управляющему входу регулируемого источника питания (РВ) фотопреобразователя. В этом положении коммутатора 12 работает опорный канал, когда световые импульсы, минуя измеряемую среду, направляются на ФЭУ через аттенюатор 6 и диффузный рассеиватель 7. В результате действия обратной связи выходное напряжение $U_{0 \text{ вых}}$ фотометрического блока уравнивается сигналом ИОН. В другом положении коммутатора, когда диафрагма Д1 (или Д2) открыта, на ФЭУ поступают световые импульсы от отражателя 1 (или 2), прошедшие измерительную среду, а выход ПН через фильтр ФЧК соединен с выходом фотометрического блока. В этом случае цепь обратной связи разомкнута, однако на входе ДУ поддерживается прежнее напряжение, поскольку цепь разряда сглаживающей RC-цепи фильтра опорного канала ФЧК_о оказывается отключенной. Следовательно, и коэффициент преобразования ФЭУ сохраняет прежнее значение. Благодаря действию обратной связи обеспечивается компенсация погрешностей измерения, связанных с нестабильностью характеристик фотоумножителя, источника световых импульсов и усилителя электрических сигналов. Более подробно оптическая и электрическая схемы описаны в работе /8/.

Выходное напряжение фотометрического блока по 3-проводному каналу связи поступает в блок функционального преобразования ФП /3/, выполняющий одновременно роль пульта дистанционного управления, и на регистратор прозрачности РП. Входное напряжение, пропорциональное прозрачности, преобразуется в ФП в напряжение, пропорциональное МДВ, и поступает на вход вольтметра ЦВ, который обеспечивает цифровую индикацию значений МДВ.

На передней панели ФП установлен также стрелочный индикатор для отсчета результатов измерений прозрачности.

В 1982 г. начат серийный выпуск фотометров ФИ—1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авт. св. № 363213 (СССР). Устройство для сравнения последовательностей импульсных сигналов. В. Е. Карпуша, Р. А. Круглов. — Бюлл. № 3, 1972.
2. Авт. св. № 382037 (СССР). Устройство для измерения прозрачности атмосферы. В. Е. Карпуша, Р. А. Круглов, С. Д. Плинте, М. С. Стернзат. — Бюлл. № 22, 1973.
3. Авт. св. № 414713 (СССР). Функциональный преобразователь. Р. А. Круглов, В. Е. Карпуша. — Бюлл. № 5, 1974.
4. Авт. св. № 785987 (СССР). Устройство для сравнения амплитуд последовательностей импульсов. Е. Л. Бор, В. Е. Карпуша, Р. А. Круглов. — Бюлл. № 45, 1980.

5. Г о р ы ш и н В. И. Серийный образец автоматического фотометра для измерения и регистрации прозрачности атмосферы (РДВ-1). — Труды ГГО, 1968, вып. 213, с. 48—58.
6. М о г и л е в с к и й А. Н. и др. Фотоэлектрическая установка для регистрации спектров комбинационного рассеяния света с повышенной точностью. — В кн.: Заводская лаборатория. Л., 1962, № 28.
7. О р н а т с к и й П. П. и др. Измерительные приборы периодического сравнения. — М.: Энергия, 1975. — 231 с.
8. Б о р Е. Л., К а р п у ш а В. Е., К р у г л о в Р. А. Экспериментальный образец импульсного фотометра ИФ-1. — Труды ГГО, 1979, вып. 433, с. 44—52.

Е. И. Плешкова, Н. Г. Протопопов

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ АНЕМОМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВЕКТОРА СКОРОСТИ ВЕТРА

В статье рассмотрены погрешность измерения ортогональных составляющих вектора скорости ветра V_x и V_y с помощью анемометра с тремя винтовыми вертушками, расположенными под углами 120° друг к другу, и вопрос о требованиях к точности измерения.

Известно /1, 2/, что приборы для измерения составляющих скорости ветра с помощью винтовых ветрочувствительных элементов, оси которых фиксированы, имеют погрешность, вызванную влиянием боковой составляющей (т. е. составляющей, перпендикулярной оси винта). В работе /3/ проанализированы погрешности анемометра с двумя винтами, оси вращения которых расположены в горизонтальной плоскости под некоторым углом β друг к другу. Установлено, что анемометр с $\beta = 90^\circ$ и осями вращения, направленными вдоль осей, имеет погрешность измерения составляющих, приближающуюся к 50 %, когда угол между вектором скорости ветра и осью соответствующего винта X, Y приближается к 90° . Прибор с $\beta < 90^\circ$ и другим расположением осей винтов относительно осей X и Y не обладает существенными преимуществами по сравнению с прибором с взаимноперпендикулярными вертушками.

Из материалов указанных работ следует, что наибольшие значения погрешностей (30—50 %) имеют место, когда угол между вектором скорости ветра и осью винта становится более 60° . У анемометра с тремя винтами, оси вращения которых расположены под 120° друг к другу, при любом угле вектора ветра из трех винтов не менее двух будут находиться под углами $\leq 60^\circ$. Можно предположить, что такой прибор может дать результаты измерения с меньшими погрешностями.

На рис. 1 приведена схема измерения составляющих вектора скорости ветра с помощью трех винтов.

Если одна из осей будет ориентирована по оси Y , то значения составляющих можно определить, проектируя показания каждой из вертушек на оси X и Y , тогда:

$$V_y = (\pm V_1) - (\pm V_2) \cos 60^\circ - (\pm V_3) \cos 60^\circ = (\pm V_1) -$$

$$-\frac{1}{2} [(\pm V_2) + (\pm V_3)], \quad (1)$$

$$V_x = (\pm V_2) \cos 30^\circ - (\pm V_3) \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} [(\pm V_2) - (\pm V_3)], \quad (2)$$

где V_1, V_2, V_3 — значения скорости ветра, измеренные с помощью винтов I, II и III.

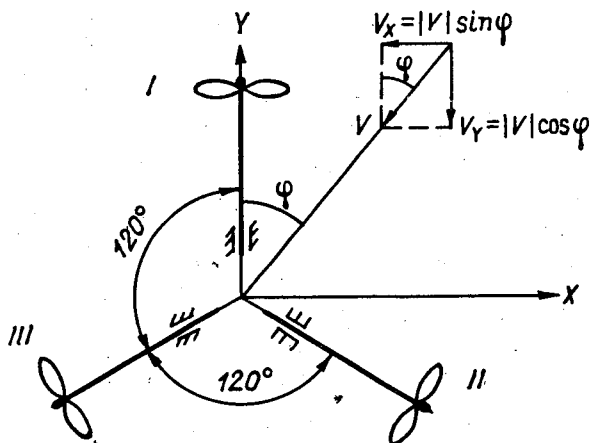


Рис. 1.

В идеальном случае, если бы отсутствовало влияние боковых составляющих, V_1, V_2 и V_3 были бы связаны с модулем $|V|$ и аргументом φ вектора скорости ветра следующими соотношениями:

$$V'_1 = |V| \cos \varphi, \quad (3)$$

$$V'_2 = |V| \cos (120^\circ - \varphi), \quad (4)$$

$$V'_3 = |V| \cos (240^\circ - \varphi), \quad (5)$$

знаки V_1, V_2, V_3 определяются знаком косинуса.

Но так как на вертушки I, II и III одновременно воздействуют боковые составляющие $|V| \sin \varphi, |V| \sin (120^\circ - \varphi), |V| \sin (240^\circ - \varphi)$, измеренные значения V_1, V_2, V_3 будут равны:

$$V_1 = |V| (1 - \delta_\varphi) \cos \varphi, \quad (6)$$

$$V_2 = |V| (1 - \delta_{120^\circ - \varphi}) \cos (120^\circ - \varphi), \quad (7)$$

$$V_3 = |V| (1 - \delta_{240^\circ - \varphi}) \cos (240^\circ - \varphi), \quad (8)$$

где δ_φ , $\delta_{120^\circ - \varphi}$, $\delta_{240^\circ - \varphi}$ — погрешности преобразования, вызванные влиянием боковых составляющих.

Учитывая (6), (7), (8), значения составляющих V_X и V_Y равны:

$$V_Y = |V| \left\{ (1 - \delta_\varphi) \cos \varphi - \frac{1}{2} [(1 - \delta_{120^\circ - \varphi}) \cos (120^\circ - \varphi) + (1 - \delta_{240^\circ - \varphi}) \cos (240^\circ - \varphi)] \right\}, \quad (9)$$

$$V_X = \frac{\sqrt{3}}{2} |V| [(1 - \delta_{120^\circ - \varphi}) \cos (120^\circ - \varphi) - (1 - \delta_{240^\circ - \varphi}) \cos (240^\circ - \varphi)]. \quad (10)$$

Идеальные значения V_X и V_Y будут следующие:

$$V'_Y = |V| \left\{ \cos \varphi - \frac{1}{2} [\cos (120^\circ - \varphi) + \cos (240^\circ - \varphi)] \right\}, \quad (11)$$

$$V'_X = \frac{\sqrt{3}}{2} |V| [\cos (120^\circ - \varphi) - \cos (240^\circ - \varphi)]. \quad (12)$$

Относительные погрешности измерения составляющих равны

$$\delta_X = \frac{V'_X - V_X}{V'_X}, \quad (13)$$

$$\delta_Y = \frac{V'_Y - V_Y}{V'_Y}. \quad (14)$$

В таблице 1 приведены значения δ_φ , $\delta_{120^\circ - \varphi}$, $\delta_{240^\circ - \varphi}$ для винта с углом атаки лопасти $\alpha = 45^\circ$, рассчитанные по методу, приведенному в работе /2/.

В таблице 2 приведены результаты расчета δ_X и δ_Y по формулам (13) и (14) для анемометра с винтами, имеющими $\alpha = 45^\circ$.

На рис. 2 показаны графики зависимости δ_X и δ_Y от φ .

Из данных таблицы 2 и рис. 2 следует:

1. Максимальные значения погрешностей измерения $\delta_X = 11,2\%$ и $\delta_Y = 18\%$, что значительно ниже погрешностей анемометра с двумя вертушками.

2. Погрешность δ_X достигает максимального значения, когда вектор скорости ветра направлен вдоль оси одного из винтов II, III, при этом $\delta_{X \text{ макс}}$ определяется погрешностью второго винта. Погрешность δ_Y достигает максимального значения при угле между вектором скорости ветра и осью Y винта I, равном $90 \pm 5^\circ$.

Таблица 1

φ°	$\cos \varphi$	$\delta_\varphi\%$	$120^\circ - \varphi$	\cos $(120^\circ - \varphi)$	δ_{120° $\%$	$240^\circ - \varphi$	\cos $(240^\circ - \varphi)$	δ_{240° $\%$
0	1,000	0,000	120°	-0,500	33,47	240	-0,500	33,47
5	0,966	0,170	115	-0,423	38,00	235	-0,574	28,20
5,7	0,995	0,210	114,3	-0,412	38,60	234,3	-0,584	27,60
10	0,985	0,650	110	-0,342	42,50	230	-0,643	22,90
11,3	0,981	0,840	108,7	-0,321	43,40	228,7	-0,66	21,95
15	0,966	1,51	105	-0,259	45,77	225	-0,707	17,65
16,7	0,958	1,88	103,3	-0,230	46,63	223,3	-0,728	16,24
20	0,94	2,76	100	-0,174	48,12	220	-0,766	13,50
21,8	0,928	3,32	98,2	-0,143	48,62	218,2	-0,786	12,01
26,6	0,884	5,12	93,4	-0,060	49,75	213,4	-0,835	8,80
30	0,866	6,73	90	0	50,0	210	-0,866	6,73
36,9	0,800	10,91	83,1	0,12	49,10	203,1	-0,920	3,80
45	0,707	17,65	75	0,259	45,77	195	-0,966	1,51
60	0,500	33,47	60	0,500	33,47	180	-1,000	0,00
70	0,342	42,51	50	0,643	22,9	170	-0,985	0,65
75	0,259	45,77	45	0,707	17,65	165	-0,966	1,51
80	0,174	48,12	40	0,766	13,50	160	-0,940	2,76
85	0,087	49,52	35	0,819	9,77	155	-0,906	4,52
87,5	0,0436	49,88	32,5	0,843	8,24	152,5	-0,887	5,55
90	0,000	50,00	30	0,866	6,73	150	-0,866	6,73
95	-0,087	49,52	25	0,906	4,55	145	-0,819	9,77
100	-0,174	48,12	20	0,940	2,76	140	-0,766	13,50
110	-0,342	42,51	10	0,985	0,65	130	-0,643	22,9
120	-0,5	33,47	0	1,00	0,00	120	-0,5	33,37

Таблица 2

φ°	$\delta_X\%$	$\delta_Y\%$	φ°	$\delta_X\%$	$\delta_Y\%$	φ°	$\delta_X\%$	$\delta_Y\%$
0	0	-11,2	21,8	-3,9	-8,1	80	-7,6	-17,2
5	-0,5	-10,9	26,6	-5,6	-7,3	85	-7	-18
5,7	-0,6	-10,8	30	-6,7	-6,7	87,5	-6,8	-12,5
10	-0,7	-10,3	36,9	-9,3	-6,3	90	-6,7	0
11,3	-0,9	-10,1	45	-10,8	-6	95	-7	-18
15	-1,4	-9,4	60	-11,2	-11,2	100	-7,6	-17,2
16,7	-2,2	-9,1	70	-9,4	-14,3	110	-9,4	-14,3
20	-3,4	-8,5	75	-9,2	-16,3	120	-11,2	-11,2

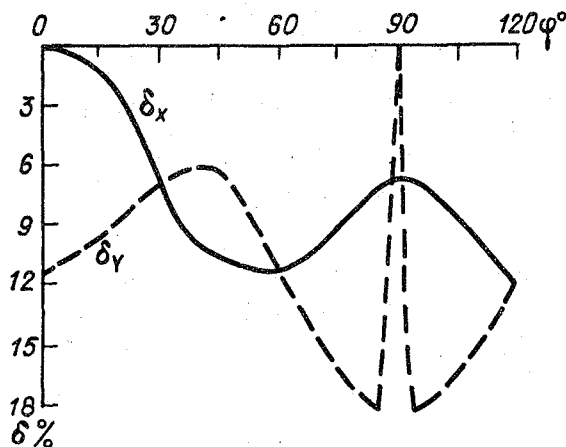


Рис. 2.

3. Во всем диапазоне изменения φ погрешности имеют отрицательный знак, т. е. действительные значения V_x и V_y будут систематически занижаться.

Аналогичные расчеты для винтов с углом атаки $\alpha = 30^\circ$ и $\alpha = 60^\circ$ дали следующие результаты:

$\alpha = 30^\circ$	$\delta_{x \text{ макс}} = 11,6\%$	$\varphi = 60^\circ$
	$\delta_{y \text{ макс}} = 13,7\%$	$\varphi = 85^\circ$
$\alpha = 60^\circ$	$\delta_{x \text{ макс}} = 9,7\%$	$\varphi = 60^\circ$
	$\delta_{y \text{ макс}} = 22,5\%$	$\varphi = 85^\circ$

Из этих данных следует, что значения δ_x и δ_y анемометра с тремя вертушками незначительно зависят от типа применяемого винта.

Значения составляющих скорости ветра могут использоваться как самостоятельно (например, составляющие вектора ветра вдоль и поперек взлетно-посадочной полосы, при оценке переноса снега, загрязняющих веществ и т. п.), так и для определения модуля и аргумента вектора ветра. Погрешность измерения составляющих V_x и V_y может существенно повлиять на погрешности определения модуля и аргумента. Рассмотрим вопрос о требованиях к точности измерения составляющих исходя из допустимых значений погрешностей определения модуля и аргумента.

Модуль скорости ветра $|V|$ и его аргумент φ вычисляются по формулам:

$$|V| = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}, \quad (15)$$

$$\varphi = \text{arc tg } \frac{V_x}{V_y}. \quad (16)$$

Абсолютные погрешности модуля и аргумента равны:

$$\Delta V = \Delta V_x \sin \varphi + \Delta V_y \cos \varphi, \quad (17)$$

$$\Delta \varphi = \frac{\Delta V_x}{|V|} \cos \varphi + \frac{\Delta V_y}{|V|} \sin \varphi. \quad (18)$$

Реальные выходные сигналы вертушек анемометра U_1 , U_2 и U_3 (например, частота выходных импульсов) связаны со скоростями V_1 , V_2 , V_3 соотношениями:

$$V_1 = K_1 U_1, \quad (19)$$

$$V_2 = K_2 U_2, \quad (20)$$

$$V_3 = K_3 U_3, \quad (21)$$

где K_1 , K_2 , K_3 — коэффициенты преобразования, определенные при $\varphi = 0$. Для однотипных датчиков $K_1 = K_2 = K_3$.

Подставив выражения для V_1 , V_2 , V_3 из (19), (20), (21), перепишем уравнения (1) и (2) для V_x и V_y :

$$V_x = \frac{\sqrt{3}}{2} (K_2 U_2 - K_3 U_3), \quad (22)$$

$$V_y = K_1 U_1 - \frac{1}{2} (K_2 U_2 + K_3 U_3). \quad (23)$$

С учетом выражений (6), (7) и (8) абсолютные погрешности определения составляющих ΔV_x и ΔV_y равны:

$$\begin{aligned} \Delta V_x &= |\Delta K_2 U_2| + |K_2 \Delta U_2| + |\Delta K_3 U_3| + |K_3 \Delta U_3| = \\ &= 2V_0 + \frac{\Delta K}{K} (|V_1| + |V_2|) = \\ &= 2V_0 + \frac{\Delta K}{K} [|V| [| (1 - \delta_{120^\circ - \varphi}) \cos (120^\circ - \varphi) | + \\ &+ | (1 - \delta_{240^\circ - \varphi}) \cos (240^\circ - \varphi) |], \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \Delta V_y &= |\Delta K_1 U_1| + |K_1 \Delta U_1| + |\Delta K_2 U_2| + |K_2 \Delta U_2| + |\Delta K_3 U_3| + \\ &+ |K_3 \Delta U_3| = 3V_0 + \frac{\Delta K}{K} (|V_1| + |V_2| + |V_3|) = \\ &= 3V_0 + \frac{\Delta K}{K} |V| [| (1 - \delta_\varphi) \cos \varphi | + | (1 - \delta_{120^\circ - \varphi}) \times \end{aligned}$$

$$x \cos(120^\circ - \varphi) + | (1 - \delta_{240^\circ} - \varphi) \cos(240^\circ - \varphi) |], \quad (25)$$

где $V_0 = K\Delta U$ — начальная чувствительность вертушки.

После подстановки (24) и (25) и преобразования выражения (17) и (18) будут иметь вид:

$$\Delta V = V_0 (3\cos \varphi + 2\sin \varphi) + \frac{\Delta K}{K} |V| (A\sin \varphi + B\cos \varphi), \quad (26)$$

$$\Delta \varphi = \frac{V_0}{|V|} (3\sin \varphi + 2\cos \varphi) + \frac{\Delta K}{K} (A\cos \varphi + B\sin \varphi), \quad (27)$$

где $A = | (1 - \delta_{120^\circ} - \varphi) \cos(120^\circ - \varphi) + | (1 - \delta_{240^\circ} - \varphi) \times$
 $\times \cos(240^\circ - \varphi) |,$

$B = | (1 - \delta_\varphi) \cos \varphi + | (1 - \delta_{120^\circ} - \varphi) \cos(120^\circ - \varphi) +$
 $+ | (1 - \delta_{240^\circ} - \varphi) \cos(240^\circ - \varphi) |.$

Расчеты по формулам (26); (27) показывают, что максимальные значения абсолютных погрешностей равны

$$\Delta V_{\max} = 3,6V_0 + 2 \frac{\Delta K}{K} |V|, \quad (28)$$

$$\Delta \varphi_{\max} = 3,6 \frac{V_0}{|V|} + 2 \frac{\Delta K}{K}. \quad (29)$$

Уравнения (28), (29) представляют собой аддитивно-мультипликативную форму представления погрешностей, причем ΔV_{\max} возрастает, а $\Delta \varphi_{\max}$ убывает с увеличением $|V|$.

Составляющая погрешностей за счет начальной чувствительности в (28), (29) носит систематический характер, поэтому представляется возможность ввести поправку на половину начальной чувствительности путем смещения нуля шкалы прибора на величину $V_0/2$. В работе /2/ показано, что подобный прием приводит к уменьшению погрешности из-за отклонения градуировочной кривой реального анемометра от прямой линии.

Погрешности ΔV_{\max} и $\Delta \varphi_{\max}$ не должны превышать общепринятых значений предельно-допустимых погрешностей измерения скорости ветра, а именно:

$$\Delta V_{\max} = 1,8V_0 + 2 \frac{\Delta K}{K} |V| \leq (0,5 + 0,05 |V|) \text{ м/с}, \quad (30)$$

$$\Delta \varphi_{\max} = 1,8 \frac{V_0}{|V|} + 2 \frac{\Delta K}{K} \leq 0,175 \text{ рад} \quad (31)$$

(0,175 рад = 10°).

Неравенство (30) заведомо выполняется при $1,8V_0 \leq 0,5 \text{ м/с}$ и $2 \frac{\Delta K}{K} \leq 0,05$, отсюда получаем требование к относительной погрешности

преобразования:

$$\frac{\Delta K}{K} \leq 0,025. \quad (32)$$

Требование к величине начальной чувствительности каждого из винтов получается из неравенства (31) с учетом (32):

$$\Delta\varphi_{\text{макс}} = 1,8 \frac{V_0}{|V|} + 2 \cdot 0,025 \leq 0,175,$$

$$\text{отсюда } V_0 = \frac{0,125}{1,8} |V|_{\text{мин}}, \quad (33)$$

где $|V|_{\text{мин}}$ — нижний предел измерения скорости.

Из этого следует, что требование к точности определения направления ветра $\pm 10^\circ$ влечет за собой весьма жесткое требование к величине начальной чувствительности каждого из датчиков. Так, если необходимо измерять скорость ветра начиная с $|V|_{\text{мин}} = 1$ м/с, то начальная чувствительность вертушек должна быть 0,07 м/с. Практически это требование трудно выполнимо, особенно для датчиков, работающих в диапазоне скоростей от 1 до 60 м/с.

Реальным требованием на сегодняшний день является $V_0 \approx 0,3$ м/с. В таблице 3 приведены значения погрешностей измерения направления $\Delta\varphi$, рассчитанные по формуле (31) для $V_0 = 0,1; 0,2; 0,3; 0,5$ м/с.

Таблица 3

$ V $ м/с	0,5	1	1,5	2	3	4	4,5	6	7	7,5
$\Delta\varphi_{0,5}^\circ$	74	54,4	37,2	28,6	20	15,8	14,3	11,5	10,2	9,7
$\Delta\varphi_{0,3}^\circ$	64,7	33,8	23,5	18,3	13,5	10,6	9,7			
$\Delta\varphi_{0,2}^\circ$	44,1	23,5	16,6	13,5	9,7					
$\Delta\varphi_{0,1}^\circ$	23,5	13,5	9,7							

Из таблицы 3 следует, что значения $\Delta\varphi$ удовлетворяют требованиям к точности измерений начиная с некоторых значений скорости. При формировании требований к приборам необходимо учитывать, в каком диапазоне скоростей выполняется требование $\Delta\varphi \leq \pm 10^\circ$.

Выводы

1. Относительная погрешность измерения составляющих вектора скорости ветра с помощью анемометра с тремя винтами, оси вращения которых расположены под углами 120° друг к другу, в 3—4 раза меньше, чем погрешность прибора с двумя винтами. Вследствие систематического характера этой погрешности имеется возможность ее компенсации в электрической схеме обработки.

2. При конструировании анемометра для измерения составляющих скорости ветра необходимо стремиться к достижению высокой начальной чувствительности винта (не менее 0,2—0,3 м/с) и предъявлять высокие требования к коэффициенту преобразования ($\frac{\Delta K}{K} \leq 2,5\%$), т. е. к ста-

бильности наклона градуировочной кривой. С этой целью следует применять конструкции, обеспечивающие низкое трение, и изготавливать винты из легких, прочных материалов, которые могут обеспечить высокую стабильность угла атаки лопасти винта (например, пластмассы, армированные карбоновыми волокнами).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арбузов И. А., Протопопов Н. Г. Работа винтового анемометра в стационарном потоке при наличии боковой составляющей скорости ветра. — Труды ГГО, 1976, вып. 346, с. 21—30.
2. Протопопов Н. Г. Проектирование ветроизмерительных приборов. — Л.: Гидрометеоиздат, 1976. — 192 с.
3. Кимель Г. Б., Плешкова Е. И., Протопопов Н. Г. Измерение составляющих вектора скорости ветра с помощью винтовых ветрочувствительных элементов. — Труды ГГО, 1979, вып. 433, с. 62—73.

Л. В. Анискин, Т. А. Поляченко

ПРИВЕДЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ К УСЛОВИЯМ СТАНДАРТНОЙ АТМОСФЕРЫ АВТОМАТИЧЕСКИМИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ

В круг задач авиационных метеорологических станций (АМСГ), обеспечивающих метеорологической информацией международные полеты, входит представление данных об атмосферном давлении, приведенном к условиям стандартной атмосферы (СА) — P_{QNH} /1/. СА представляет собой некоторое условное состояние атмосферы, рассматриваемой в предположении, что воздух является идеальным газом и его основные физические характеристики на уровне моря имеют определенные значения, в частности, давление $P_0 = 1013,25$ гПа, температура $T_0 = 288,15$ К. Значения параметров атмосферы на других высотах находятся расчетным путем и для удобства использования сведены в таблицы /2/. В авиационной практике часто возникает необходимость приведения результатов измерений метеорологических элементов в реальной атмосфере к условиям СА. Это требуется при сопоставлении данных летных испытаний, а также для учета влияния метеорологических параметров на условия полета самолетов и на показания ряда аэронавигационных приборов (барометрического высотомера, указателя скорости и др.) /3/.

Существующая на сети АМСГ методика определения P_{QNH} основана на использовании таблиц СА. По этим таблицам определяют стандартную барометрическую высоту H_S , т. е. высоту в стандартной атмосфере, на которой атмосферное давление равно фактическому давлению, измеренному на уровне аэродрома H_A . Затем с помощью тех же таблиц находят давление на уровне $H_S - H_A$, которое обозначается как P_{QNH} и выдается

в метеорологических сообщениях по форме кода METAR.

Очевидно, что такой способ вычисления не вызывает больших затруднений при определении P_{QNH} вручную, но он не годится для использования в аэродромных автоматических метеорологических станциях. В связи с этим целесообразно рассмотреть расчетные методы вычисления этой величины. Расчет табличных значений физических характеристик СА производится по уравнению состояния идеального газа и барометрической формуле.

Барометрическая формула для высот до 11 000 м имеет следующий вид [2, 3]:

$$\lg P = \lg P_N - a \lg \left[1 + \frac{\beta (H - H_N)}{T_N} \right], \quad (1)$$

где $a = \frac{g}{\beta R}$, P — атмосферное давление, $g = 9,80665 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ — ускорение свободного падения, $\beta = -0,0065 \text{ К} \cdot \text{м}^{-1}$ — градиент температуры, $R = 287,05287 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ — удельная газовая постоянная, H — геопотенциальная высота, T — температура Кельвина; параметры с индексом N относятся к нижней границе рассматриваемого слоя.

Из формулы (1) можно получить следующие выражения для определения давления на уровне $H_S - H_A$, т. е. P_{QNH} (в дальнейшем обозначим его просто P_Q):

$$\lg P_A = \lg P_S - a \lg \left[1 + \frac{\beta (H_S - H_A)}{T_S} \right], \quad (2)$$

$$\lg P_Q = \lg P_0 - a \lg \left[1 + \frac{\beta (H_S - H_A)}{T_0} \right]. \quad (3)$$

Здесь P_A — давление, измеренное на уровне аэродрома H_A ; P_S — давление в СА на уровне H_A ; $T_S = T_0 + \beta H_A$ — температура в СА на уровне H_A ; T_0 , P_0 — физические характеристики стандартной атмосферы на уровне моря ($H = 0$).

Таким образом, при вычислениях нужно дважды пользоваться барометрической формулой — вначале из зависимости (2) необходимо найти разность $H_S - H_A$, а затем из (3) — давление P_Q . Очевидно, что для расчета величин $H_S - H_A$ и P_Q по этим формулам требуются достаточно мощные вычислительные средства, которых автоматические метеорологические станции пока не имеют. Попробуем упростить эти выражения, используя методы приближенных вычислений. Для аэродромов, расположенных невысоко над уровнем моря, можно считать, что $T_S = T_0$. Тогда в первом приближении из (2) и (3) получаем

$$P_{Q1} = \frac{P_0 P_A}{P_S}. \quad (4)$$

Нетрудно показать, что полученная зависимость выполняется точно при $H_A = 0$ и $H_A = H_S$, причем в последнем случае $P_Q = P_0$. Второе приближение к точным выражениям (2) и (3) находим путем разложения в ряд вторых слагаемых в этих формулах. Ограничиваясь первыми членами разложения, имеем:

$$\lg P_A = \lg P_S - a\beta \frac{H_S - H_A}{T_S}, \quad (2')$$

$$\lg P_Q = \lg P_0 - a\beta \frac{H_S - H_A}{T_S}. \quad (3')$$

Дальнейшие преобразования приводят к следующей зависимости:

$$\frac{P_Q}{P_0} = \left(\frac{P_A}{P_S} \right)^{\frac{T_S}{T_0}}. \quad (5)$$

После разложения правой части этой зависимости в ряд и некоторых упрощений окончательно получим:

$$P_{Q2} = P_A \frac{P_0}{P_S} \left(1 + \beta H_A \frac{P_A - P_S}{P_S} \right). \quad (6)$$

В табл. 1 представлены результаты приведения давления к условиям СА, полученные разными способами расчета: по таблице СА, выражениям (4) — P_Q и (6) — P_{Q2} , а также значения погрешностей $\Delta_1 = P_Q - P_{Q1}$ и $\Delta_2 = P_Q - P_{Q2}$ для различных значений P_A и H_A . Анализ этой таблицы показывает, что формула (4) применима до высот 300...400 м над уровнем моря. Формула (6) дает погрешность расчета не более 0,1 гПа для высот до 1000 м над уровнем моря при отклонении реального давления от стандартного $\delta = P_A - P_S$ до 90 гПа и соответственно не более 0,3 гПа при увеличении δ до 125 гПа.

В табл. 1 представлены также результаты приведения давления к среднему уровню моря в СА P_{Q3} по барометрической формуле для реальной атмосферы, используемой в автоматических станциях КРАМС-М /4/, которые установлены почти во всех крупных аэропортах нашей страны. При этом для повышения точности расчетов значения температуры воздуха, входящие в эту формулу, принимались равными 288,15 К, а влажность воздуха вообще не учитывалась. Как видно из таблицы, погрешности $\Delta_3 = P_Q - P_{Q3}$ близки к погрешностям вычислений по формуле (4).

Учитывая, что значения давления в СА близки к средним многолетним значениям реального атмосферного давления, колебания которого во времени, как правило, не превышают 30 гПа, достигая в исключительных случаях 60—80 гПа, и что крупных аэропортов, расположенных выше

Результаты приведения давления (гПа) к условиям СА

PA	HS	HA	PS	PO	PO1	PO2	PO3	Δ_1	Δ_2	Δ_3
1025,3	-100	100	1001,3	1037,5	1037,6	1037,5	1037,5	0,1	0	0
		200	989,5	1049,8	1050,0	1049,8	1049,9	-0,2	0	-0,1
		400	966,1	1074,8	1075,3	1074,8	1075,0	-0,5	0	-0,2
		800	920,8	1126,2	1128,3	1126,0	1126,7	-1,9	0,2	-0,5
		1000	898,8	1152,6	1155,9	1152,3	-	-3,3	0,3	-
989,5	200	100	1001,3	1001,3	1001,3	1001,3	1001,2	0	0	0,1
		200	989,5	1013,3	1013,3	1013,3	1013,3	-0,1	0	0
		400	966,1	1037,5	1037,7	1037,5	1037,4	-0,2	0	0,1
		800	920,8	1087,4	1088,8	1087,4	1087,3	-1,4	0	0,1
		1000	898,8	1113,1	1115,5	1113,0	-	-2,4	0,1	-
966,1	400	100	1001,3	977,7	977,7	977,7	977,6	0	0	0,1
		200	989,5	989,5	989,4	989,4	989,3	0,1	0,1	0,2
		400	966,1	1013,3	1013,3	1013,3	1012,9	0	0	0,4
		800	920,8	1062,2	1063,1	1062,2	1061,7	-0,9	0	0,5
		1000	898,8	1087,4	1089,2	1087,3	-	-1,8	0,1	-
920,8	800	100	1001,3	931,9	931,8	931,9	931,7	0,1	0	0,2
		200	989,5	943,2	942,9	943,2	942,8	0,3	0	0,4
		400	966,1	966,1	965,7	966,1	965,4	0,4	0	0,7
		800	920,8	1013,3	1013,3	1013,3	1011,9	0	0	1,4
		1000	898,8	1037,5	1038,1	1037,5	-	-0,6	0	-

900 м над уровнем моря, в нашей стране нет, при разработке новых автоматических метеорологических станций можно использовать для определения P_Q алгоритмы, реализующие формулу (6). В действующих станциях КРАМС-М, установленных в высокогорных аэропортах и обеспечивающих метеорологической информацией международные полеты, целесообразно произвести усовершенствования алгоритма вычисления P_Q .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сборник международных метеорологических авиационных кодов. — Л.: Гидрометеоиздат, 1978. — 42 с.
2. Атмосфера стандартная. Параметры. ГОСТ 4401-81. — М.: Госстандарт, 1981. — 179 с.
3. Баранов А. Н., Соломин С. В. Авиационная метеорология. — Л.: Гидрометеоиздат, 1981. — 384 с.
4. Афиногенов Л. П. Приведение давления к уровню моря при использовании автоматических метеостанций. — Труды ГГО, 1969, вып. 240, с. 3-7.

Н. А. Плешкова, Е. В. Романов, В. В. Фомишкин

СОГЛАСУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ТРИАНГУЛЯЦИОННОГО ОБЛАКОМЕРА М-105 И КРАМС-М

Высота нижней границы облаков (ВНГО) является одним из важнейших метеорологических параметров, используемых при обеспечении полетов авиации. Она относится к группе основных параметров, определяющих условия посадки самолетов.

Усовершенствование навигационных приборов, создание и освоение систем точного захода на посадку позволили снизить посадочные минимумы. При этом существенно возросли требования к точности, достоверности и своевременности метеорологической информации.

Современные измерители ВНГО должны обеспечивать в течение всего времени наличия штормовой обстановки в различных метеоусловиях и в любое время суток непрерывную дистанционную выдачу достоверных данных о ВНГО с регистрацией на лентах самописцев и отображением на цифровых индикаторах, установленных в диспетчерских службах аэропорта.

В настоящее время в СССР эксплуатируются измерители ВНГО локационного типа (ИВО-1 и его модификации с дистанционной приставкой ДВ-1), сопряженные с автоматической станцией КРАМС-М, обеспечивающей подачу комплекса метеосведений (в том числе и о ВНГО) в диспетчерские службы /1/.

За рубежом используются как локационные, так и триангуляционные облакомеры. В СССР также создан и эксплуатируется на ряде аэродромов триангуляционный облакомер М-105 (разработка НИИП Госкомгидро-

мета) /2/. Триангуляционный метод измерения ВНГО основан на определении высоты места встречи с НГО точки пересечения расположенных в общей вертикальной плоскости оптических осей прожектора и фотоприемника по углу места и базе L (расстоянию между передатчиком и приемником). Поскольку в облакомере заранее известны база L и закон сканирования луча прожектора во времени (оптическая ось фотоприемника в комплексе М-105 неподвижна и направлена вертикально), то ВНГО однозначно, хотя и нелинейно, связана с интервалом времени Δt от начала подъема луча до достижения угла места, при котором сигналы на выходе фотоприемника достигают некоторого порогового значения. В преобразующем устройстве нелинейная зависимость $H(\Delta t)$ преобразуется в линейную $H = kN$, где N — число счетных импульсов на выходе преобразующего устройства, k — цена счетного импульса (шаг квантования по уровню).

Прожектор и фотоприемное устройство комплекса М-105 устанавливаются на открытой местности на базе $L = 100$ м, имеют защиту от воздействия внешних факторов (влаги, снега, пыли, низких температур), что обеспечивает длительную безнадзорную работу прибора (до 7 суток). Преобразующее устройство, самописец и индикаторы устанавливаются в помещении.

Преимуществом прибора по сравнению с ИВО-1 является возможность измерения с большой точностью малых высот. Диапазон измерения М-105 составляет 10...1000 м, погрешность для высот до 150 м составляет ± 10 м, от 150 до 1000 м — ± 10 %. Продолжительность одного измерения (цикла) составляет 29 с.

Комплексы М-105 введены в эксплуатацию на ряде аэродромов: Домодедово, Борисполь, Шереметьево, Внуково и используются там в автономном режиме. Комплекс М-105, наряду с обеспечением требуемых пределов и точностей измерения, может работать в автоматическом режиме в течение длительного времени с непрерывной регистрацией результатов измерений на диаграммной ленте и одновременным отображением данных на автономных цифровых индикаторах.

В связи с упомянутыми положительными качествами облакомера встал вопрос о вводе результатов измерений комплекса М-105 в автоматическую станцию КРАМС-М, которой оснащены категорированные аэродромы, для чего потребовалось разработать устройство согласования выхода М-105 со входом КРАМС-М. Такое согласующее устройство (СУ) было разработано по заданию Госкомгидромета совместными усилиями ГГО и НИИП Госкомгидромета и установлено на опытную эксплуатацию в аэропорту Внуково. Ниже приведено краткое описание согласующего устройства М-105 и КРАМС.

Станция типа КРАМС (КРАМС-М) рассчитана по каналам измерения ВНГО на прием информации в виде напряжения постоянного тока (полярность отрицательная) со шкалой -10 В на 1000 м. Комплекс М-105 вырабатывает числоимпульсный код, пропорциональный высоте облаков, с ценой одного импульса $k = 5$ м. Число счетных импульсов $N \leq 223$. Согласующее устройство, следовательно, должно обеспечивать формирова-

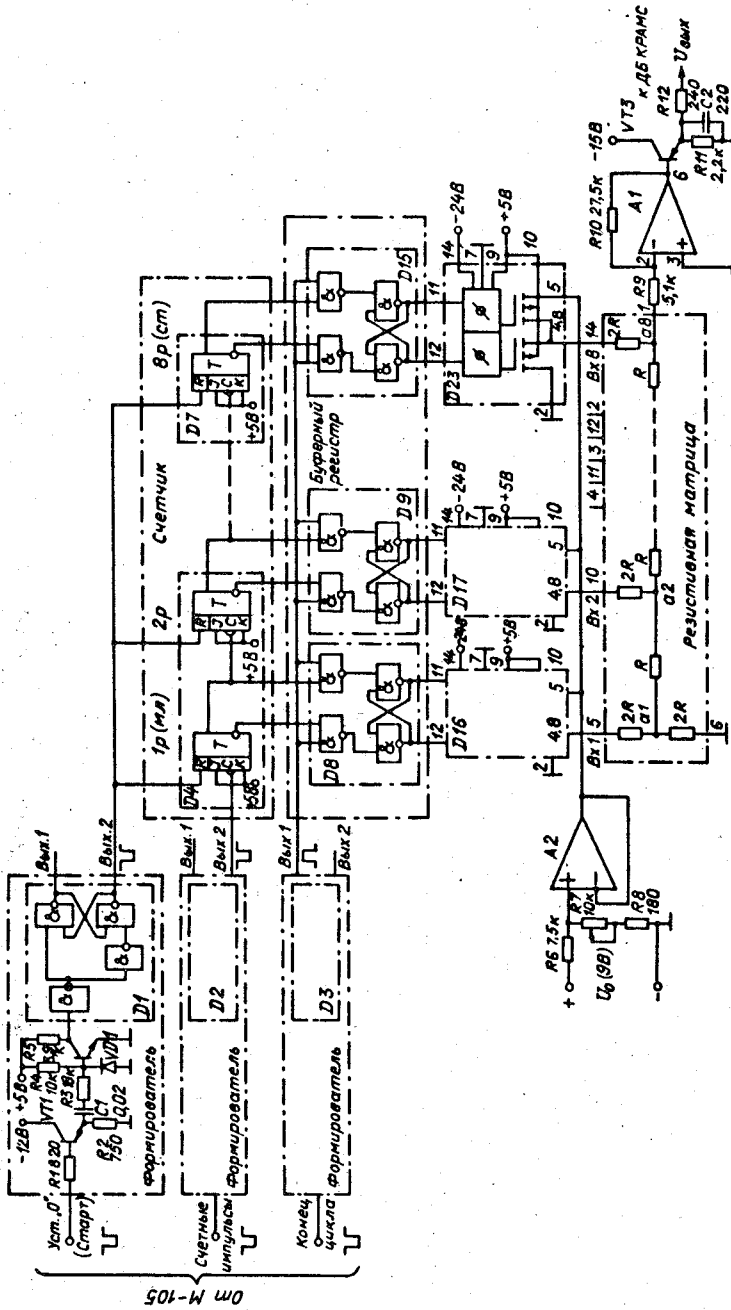


Рис. 1.

ние напряжения постоянного тока отрицательной полярности, пропорционального числу импульсов N , поступивших в каждом цикле измерения от комплекса М—105. Для решения этой задачи в состав СУ введены: восьмиразрядный двоичный счетчик для преобразования числоимпульсного кода в параллельный код, двоичный буферный регистр для запоминания результата преобразования в дискретной форме и цифро-аналоговый преобразователь. Схема согласующего устройства приведена на рис. 1. Для обеспечения работы СУ от комплекса М—105 поступает три последовательности импульсов, параметры которых представлены в табл. 1. В начале цикла по отдельному проводу подается импульс "Старт — начало отсчета" ("Уст. 0"). Затем, также по отдельному проводу, поступают информационные импульсы "Счет", по окончании пачки которых по отдельному проводу поступает импульс "Конец цикла измерения". Полярность всех импульсов отрицательная, форма прямоугольная.

Таблица 1

Управляющие импульсы от комплекса М—105

Наименование импульсов	Амплитуда, В	Длительность, мс	Частота, Гц
Старт — начало отсчета	10 ± 2 на $R_H = 1,5$ кОм	50	0,033
Счет	10 ± 2 на $R_H = 1,5$ кОм	3	1,5...100
Конец цикла измерений	5 ± 1 на $R_H = 10$ кОм	10	0,033

Согласующее устройство имеет входные формирователи, приводящие импульсы комплекса М—105 к уровням логических микросхем и вырабатывающие на выходах крутые фронты, что повышает помехозащищенность и стабильность работы счетчика, выполненного на восьми счетных JK — триггерах (микросхемы D4...D7). Установка счетчика на "0" осуществляется импульсом "Уст. 0" (входы R триггеров) в начале цикла измерения.

Прямые и инверсные выходы триггеров счетчика подключены к буферному регистру, состоящему из RS — триггеров с ключами на входах. Ключи (микросхемы D8...D15) получают импульс "Конец цикла измерения", по которому разрешается передача дискретной информации из счетчика в RS — триггеры буферного регистра. По окончании этого импульса (на его заднем фронте) буферный регистр отсоединяется от счетчика (ключи D8...D15 запираются).

Для преобразования дискретной информации, хранящейся в буферном регистре, в эквивалентное аналоговое напряжение применен цифро-аналоговый преобразователь, состоящий из трех основных узлов интегральных МОП-ключей с управлением (микросхемы D16...D23), резистивной декодирующей матрицы типа R—2R (микросхема D24), а также операционного усилителя A1, обеспечивающего масштабирование выходного напряжения

/3, 4/. Использование МОП-ключей с управлением позволяет подавать на входы формирователей (Ф) сигналы с выходов стандартных логических интегральных схем. Закрытое состояние ключа обеспечивается подачей на вход формирователя (Ф) напряжения логического нуля (0 В), а открытое — логической единицы (5 В).

С помощью ключей на входы резистивной матрицы подается, в зависимости от дискретной информации буферного регистра, напряжение от источника опорного напряжения $U_{\text{ион}} = 5 \text{ В}$ или 0 В.

В узлах каждого разряда a_1, a_2, \dots, a_8 матрицы типа R—2R по отношению к измерительной земле (точка 6) наблюдается постоянный импеданс, равный R. Благодаря этому напряжения $U_{\text{ион}}$, подаваемые по отдельности через ключи на входы делителя $V_x 1, V_x 2 \dots V_x 8$, создают в этих узлах равные напряжения. Созданное в любом a_i узле напряжение передается на соседний a_{i+1} узел (благодаря постоянству импеданса в узлах) вдвое меньшим и доходит до выхода делителя (точка 1 микросхемы D24) с величиной, соответствующей весу двоичного разряда /3/. Это легко понять при сопротивлении нагрузки $R_H = R9 = 2R$, однако нетрудно показать, что указанное свойство такой матрицы сопротивлений справедливо при произвольной величине нагрузки (от холостого хода, $R_H = \infty$, до короткого замыкания, когда выходным параметром матрицы становится ток).

С целью определения коэффициента передачи согласующего устройства рассмотрим эквивалентную схему (рис. 2) матрицы при подключенном одном старшем разряде (который соответствует $N = 128$ входным импульсам или 640 м высоты облаков, поскольку цена каждого импульса составляет 5 м).

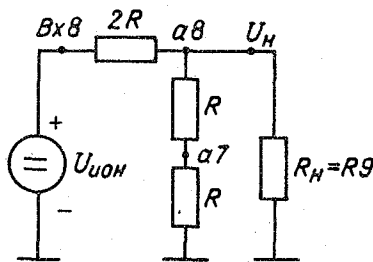


Рис. 2.

Коэффициент передачи в нагрузку K_8 для старшего разряда определяется, согласно рис. 2, соотношением

$$K_8 = \frac{U_H}{U_{\text{ион}}} = \frac{R_{\text{экв}}}{R_{\text{общ}}},$$

$$\text{где } R_{\text{экв}} = R9 \parallel 2R = \frac{R9 \cdot 2R}{R9 + 2R},$$

$$R_{\text{общ}} = 2R + R_{\text{экв}}.$$

$$\text{Таким образом, } K_8 = \frac{R9}{2R9 + 2R}.$$

В частности, при $R9 = R$ $K_8 = 0,25$.

Выходное напряжение согласующего

устройства для старшего разряда $U_{\text{вых } 8}$ с учетом коэффициента передачи операционного усилителя будет равно:

$$U_{\text{вых } 8} = K_8 \frac{R10}{R9} U_{\text{ион}}.$$

Коэффициент передачи согласующего устройства может изменяться как при изменении величины $U_{\text{ион}}$, так и при изменении коэффициента передачи усилителя А1.

Источник опорного напряжения (+5 В) выполнен на регулируемом делителе R6, R7 + R8, нагруженном на повторитель напряжения (операционный усилитель А2). На вход делителя подается напряжение $U_0 = 9$ В со стабилитрона (Д818Е), тип и режим работы которого выбран из условия минимальной температурной нестабильности. Делитель выполнен на резисторах с разным температурным коэффициентом сопротивления. Указанные меры обеспечили высокую стабильность источника опорного напряжения. Предусмотрена возможность регулировки величины $U_{\text{ион}}$ для установки необходимого коэффициента передачи устройства 10 В на 1000 м (200 импульсов).

Выходное напряжение операционного усилителя А1 через развязывающий повторитель и балластное сопротивление R12 подается на вход измерения высоты облаков дистанционного блока (ДБ) КРАМС. Балластное сопротивление служит для защиты согласующего устройства от ложных управляющих сигналов ДБ (используемых в случае подключения приставки ДВ-1).

Для унификации элементной базы с комплексом М-105 в согласующем устройстве применены интегральные микросхемы серии 134. Кроме того, использованы ключи серии 143 (143КТ1), операционные усилители 140 серии (140УД6) и декодирующая матрица 304ИД4.

Станция КРАМС-М работает с наибольшей частотой в минутном режиме и поэтому с целью согласования показаний самописца М-105 с показаниями КРАМС был выбран режим внешней синхронизации работы комплекса М-105 по сигналам запуска, осуществленный специалистами аэропорта Внуково. Для этого были выведены от КРАМС примерно за 15–20 с до отсчета сигналы для запуска комплекса М-105. Разумеется, предпочтительнее режим непрерывной работы комплекса М-105 с максимальной частотой (29 с за цикл). Его можно будет осуществить при очередной модернизации КРАМС, когда частота опроса измерительных каналов будет повышена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приборы и установки для метеорологических измерений на аэродромах /Под ред. Л. П. Афиногенова, Е. В. Романова. — Л.: Гидрометеиздат, 1981. — 295 с.
2. Лысцев В. Е., Фомишкин В. В. Измерение высоты нижней границы облаков триангуляционным облакомером в аэропорту. — Труды НИИГМП, 1974, вып. 31, с. 3–11.
3. Шило В. Л. Линейные интегральные схемы в радиоэлектронной аппаратуре. — М.: Советское радио, 1979, с. 331–337.
4. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. — Л.: Энергия, 1980. — 248 с.

О ПОСТРОЕНИИ ЗАПОМИНАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА АВТОМАТИЧЕСКОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

1. Основные требования к ЗУ автоматической метеорологической станции.

Запоминающее устройство (ЗУ) является одним из основных блоков измерительно-управляющих систем, содержащих микропроцессор, и, в частности, автоматических метеорологических станций (АМС) различного назначения.

Рассмотрим требования, вытекающие из условий эксплуатации, которым должно удовлетворять ЗУ АМС.

Организация ОЗУ и ПЗУ. ЗУ должно состоять из постоянной части (ПЗУ) для хранения программы и констант и оперативной части (ОЗУ) для хранения результатов измерений и вообще различной переменной информации. По соображениям удобства структуры и в соответствии с тенденцией развития микропроцессорной техники целесообразно, чтобы ПЗУ и ОЗУ представляли собой единый блок с общей системой адресации и стандартным способом обращения.

Общая емкость ЗУ. Как показывают предварительные проработки программ, общая емкость ЗУ, в зависимости от модификации АМС, должна составлять 8—16 тысяч слов (8—16 К). При этом, однако, могут встретиться задачи (например, использование АМС для научных экспериментов), в которых желательно увеличение емкости до 32 К слов. Вместе с тем, в простейших модификациях требуемая емкость может быть снижена до 4 и даже до 2 К слов.

Распределение емкости между ОЗУ и ПЗУ. Те же проработки показывают, что общая емкость ЗУ неравномерно распределяется между ОЗУ и ПЗУ. Как правило, емкость ОЗУ должна быть в 3—8 раз меньше емкости ПЗУ (например, 2 и 6 К при общей емкости 8 К, 4 и 12 К при 16 К и т. д.).

Блочная структура. В связи со сказанным выше удобно, чтобы ЗУ имело блочную структуру, позволяющую наращивать емкость блоками определенной величины — например, по 2 или 4 К. При этом целесообразно обеспечивать одинаковый способ адресации к ОЗУ и ПЗУ с тем, чтобы в пределах общей емкости в зависимости от конкретной задачи (модификации) можно было менять соотношение между емкостью ОЗУ и ПЗУ. Например, при общей емкости 16 К слов и блоках ОЗУ и ПЗУ по 4 К слов возможно организовать ОЗУ на 4 К и ПЗУ на 12 К (1 блок ОЗУ и 3 блока ПЗУ) или ОЗУ и ПЗУ по 8 К (по 2 блока) и т. д.

Смена программы. В процессе работы АМС и особенно в начальном периоде эксплуатации часто возникает необходимость модернизации программы, внесения в нее различных изменений. Если это осуществимо только путем замены блоков ПЗУ, изготавливаемых на заводе, то создаются значительные эксплуатационные и организационные трудности. Отсюда возникает требование, чтобы ПЗУ можно было перезаписать в месте эксплуатации. Такие ПЗУ называют односторонними — ОДЗУ (или полупостоян-

ными — ПЗУ) /1/. Отличие их от ОЗУ заключается в том, что процедура перезаписи не является "нормальной" операцией процессора; она требует специальных режимов и оборудования.

Сохранение информации при отключении питания. Кратковременные (на несколько секунд или минут) отключения сетевого питания неизбежны в процессе работы станции. Возможны также более длительные перерывы — на несколько часов или суток. Это общее требование по-разному конкретизируется для ОЗУ и ПЗУ (ППЗУ). При возобновлении сетевого питания после кратковременного отключения автоматическая станция должна продолжить нормальную работу в заданном режиме без вмешательства оператора. Это требует сохранения информации как в ПЗУ, так и в ОЗУ. Существующие в настоящее время элементы, используемые в схемах ОЗУ, этому требованию не удовлетворяют. Поэтому обеспечивать работоспособность при кратковременных перерывах питания приходится не за счет выбора элементов, а путем введения буферного источника (например, аккумулятора), способного обеспечить сохранность информации в ОЗУ и даже выполнение станцией некоторых простейших операций (например, счета времени) в течение нескольких часов. Облегчить решение этой задачи может рациональный выбор элементов ОЗУ — за счет малого потребления энергии и уменьшения количества источников питания.

Значительно более "жесткие" требования по сохранности информации в выключенном состоянии предъявляются к ППЗУ. Это объясняется тем, что запись программы представляет собой сложную процедуру, поэтому необходимо, чтобы программа сохранялась в течение длительного времени при полном отсутствии питания.

Быстродействие (время обращения). В этом отношении условия работы АМС не предъявляют высоких требований. Например, период обращения 5 и даже 10 мкс вполне приемлем — а это значительно ниже возможностей элементов, выпускаемых промышленностью /2/.

Ко всем узлам автоматики АМС, и в частности к ЗУ, предъявляются повышенные требования в отношении надежности. Главным образом это вызвано необходимостью обеспечить длительную работу в непрерывном режиме при отсутствии постоянного квалифицированного технического обслуживания.

Одним из путей решения этой сложной технической задачи в условиях, когда элементы сами по себе не обладают достаточно высокой надежностью, является введение схемной и структурной избыточности и создание устройств, продолжающих функционировать при отказе отдельных элементов /5, 7/, в простейшем случае — обычное резервирование. Однако, если в отношении большинства дискретных устройств задача структурных методов повышения надежности до настоящего времени остается нерешенной (а методы, основанные на простом резервировании, далеки от оптимальных решений), то в отношении ЗУ дело обстоит иначе. В ЗУ могут быть использованы, по существу, те же методы помехоустойчивого кодирования и защиты информации, которые находят широкое применение в линиях связи /3, 4, 6/.

Таким образом, можно сформулировать следующее требование: для

повышения надежности внутри ЗУ АМС должен быть использован помехоустойчивый код, способный исправлять одиночные ошибки (в словах), обнаруживать двойные и большинство конфигураций из 3, 4 и т. д. ошибок. При этом обмен ЗУ с остальными блоками (в первую очередь с процессором) должен осуществляться стандартным образом — в рамках стандартного интерфейса, определяемого выбранным процессором и структурой АМС. Единственная особенность взаимодействия с таким "защищенным" ЗУ состоит в том, что при обнаружении (и исправлении) одиночных ошибок ЗУ должно выдавать сигнал, который свидетельствует о необходимости проведения техобслуживания и ремонта. Такой ремонт не обязательно должен производиться немедленно, поскольку ЗУ продолжает нормально функционировать. Только при обнаружении двойных (и большей кратности) ошибок должен выдаваться второй сигнал — отказ блока, требующий уже срочного ремонта.

2. Блок-схема ЗУ.

На рис. 1 представлена блок-схема ЗУ, рассчитанная на подключение к интерфейсу микро-ЭВМ Электроника-60. Основной особенностью интерфейса является использование общей системы двунаправленных информационных и адресных шин, по которым работа осуществляется в два такта: подача адреса — 1-й такт, передача информации — 2-й такт. В каждом такте адресные и информационные коды сопровождаются необходимыми управляющими сигналами, идущими по отдельным шинам интерфейса.

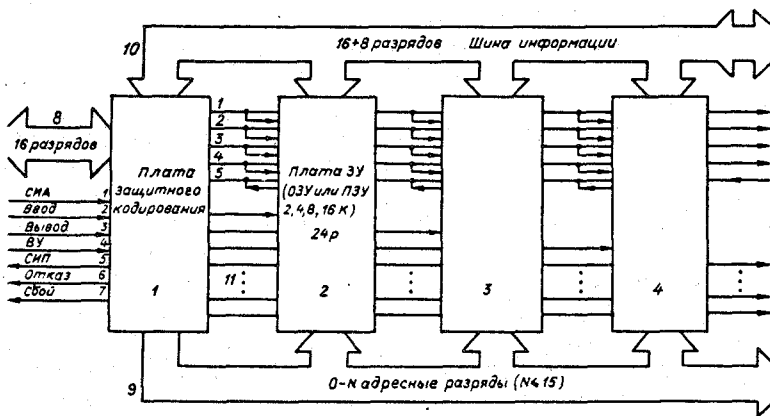


Рис. 1.

Блок ЗУ состоит из платы управления и защитного кодирования 1 и набора плат ОЗУ или ППЗУ (2, 3, 4, ...). Рассмотрим работу ЗУ при записи (в ОЗУ) или чтении (из ОЗУ или ППЗУ).

Запись слова в ОЗУ. В 1-м такте по связи 8 подается 16-разрядный код адреса и управляющие сигналы ВУ, СИА (связи 4, 1). Адрес запоминается на буферном регистре в плате 1, причем старшие разряды (два или три в зависимости от емкости ЗУ) дешифруются и указывают плату, к которой происходит обращение (связи 11). Во втором такте они используются для выработки сигналов обращения к определенному блоку ЗУ. Разряды адреса с буферного регистра (кроме 2 или 3 старших разрядов) выдаются на адресные шины блоков ЗУ (связь 9) и определяют адрес, по которому осуществляется запись или чтение.

Во 2-м такте по связи 8 подается 16-разрядное информационное слово. Информационные разряды воздействуют на схему кодирования в плате 1, которая вырабатывает и выдает 8 дополнительных разрядов. Информационные и дополнительные разряды поступают в блоки ЗУ по связи 10 (всего $16 + 8 = 24$ шины). Одновременно во 2-м такте из платы управления 1 в блоки ЗУ поступают сигналы управления СИА, ВЫВОД (связи 1, 3)*), которые обеспечивают запись в ОЗУ 24-разрядного слова по адресу, установленному на связи 9. С некоторой задержкой относительно начала 2-го такта, необходим для окончания процесса записи в плате 1, формируется и выдается в интерфейс импульс СИП (связь 5), свидетельствующий об окончании записи.

Чтение слова из ОЗУ или ППЗУ. 1-й такт чтения протекает аналогично предыдущему: в регистре на плате 1 и на связи 9 устанавливается адрес считываемого слова. Во 2-м такте на плату 1 поступает импульс ВВОД (связь 2), который передается на блоки 2, 3, 4 ... Под воздействием этого сигнала и адреса, определяемого связью 9, из выбранного блока ОЗУ или ППЗУ на связь 10 выдается 24-разрядное слово. Это слово в плате 1 анализируется декодирующей схемой.

Если в считанном слове ошибок не обнаружено, 16 информационных разрядов выдаются наружу по связи 8. Если обнаружена исправляемая кодом ошибка (одна), то осуществляется коррекция соответствующего разряда и 16 информационных разрядов также выдаются по связи 8. Одновременно с коррекцией в плате 1 вырабатывается сигнал СБОЙ (связь 7). Если в результате анализа обнаруживается конфигурация ошибки, не исправляемая кодом, в плате 1 формируется сигнал ОТКАЗ (связь 6). Как и при записи, с некоторой задержкой относительно начала 2-го такта в плате 1 формируется импульс СИП (связь 5), свидетельствующий об окончании чтения.

В платах ОЗУ применены 24 микросхемы К188РУЗ с организацией $4К \times 1$ (разряд на 4К адресов), в платах ППЗУ — 12 микросхем К573РФ1 с организацией $4К \times 8$ (4К адресов, 8 разрядов). Микросхемы К573РФ1 способны сохранять информацию после записи в течение 100 000 часов и допускают до 100 циклов перезаписи данных.

*) Здесь и далее управляющие сигналы интерфейса рассматриваются по отношению к процессору. Поэтому сигналы ВЫВОД и ВВОД означают вывод из процессора (запись в ЗУ) и ввод в процессор (чтение ЗУ).

Стирание старой и запись новой информации в ППЗУ осуществляется на специальной технологической установке, смонтированной в виде переносного прибора. В состав плат ППЗУ включены элементы, обеспечивающие режим перезаписи. Процесс перезаписи может осуществляться в месте эксплуатации станции.

3. Помехоустойчивый код.

В ЗУ используется помехоустойчивый код, в котором к 16 информационным разрядам каждого слова ($a_1 \dots a_{16}$) добавляется 8 избыточных ($a_{17} \dots a_{24}$). Формирование избыточных разрядов при кодировании определяется формулами, записанными на языке математической логики:

$$\begin{aligned}
 a_1 \oplus a_2 \oplus a_3 \oplus a_4 \oplus a_5 \oplus a_6 \oplus a_7 \oplus a_8 &= a_{17}; \\
 a_9 \oplus a_{10} \oplus a_{11} \oplus a_{12} \oplus a_{13} \oplus a_{14} \oplus a_{15} \oplus a_{16} &= a_{18}; \\
 a_1 \oplus a_2 \oplus a_3 \oplus a_4 \oplus a_9 \oplus a_{10} \oplus a_{11} \oplus a_{12} &= a_{19}; \\
 a_5 \oplus a_6 \oplus a_7 \oplus a_8 \oplus a_{13} \oplus a_{14} \oplus a_{15} \oplus a_{16} &= a_{20}; \\
 a_1 \oplus a_2 \oplus a_5 \oplus a_6 \oplus a_9 \oplus a_{10} \oplus a_{13} \oplus a_{14} &= a_{21}; \\
 a_3 \oplus a_4 \oplus a_7 \oplus a_8 \oplus a_{11} \oplus a_{12} \oplus a_{15} \oplus a_{16} &= a_{22}; \\
 a_1 \oplus a_3 \oplus a_5 \oplus a_7 \oplus a_9 \oplus a_{11} \oplus a_{13} \oplus a_{15} &= a_{23}; \\
 a_2 \oplus a_4 \oplus a_6 \oplus a_8 \oplus a_{10} \oplus a_{12} \oplus a_{14} \oplus a_{16} &= a_{24},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где символ \oplus означает сложение по mod 2.

Код обеспечивает исправление одиночных, обнаружение двойных и значительной части более сложных конфигураций ошибок.

При чтении слов из ЗУ и декодировании проверяются равенства (1) и для каждого из 8 равенств формируется двоичный символ b_i ($i = 1 \dots 8$), равный нулю, если соответствующее равенство выполнено, и единице, если оно нарушено.

Декодирование основано на следующих свойствах описываемого кода:

1. При отсутствии ошибок нарушенных проверочных равенств нет.
2. Появление одиночной ошибки в информационных разрядах нарушает 4 (из 8) проверочных равенств — по одному в каждой "паре" равенств (1—2, 3—4, 5—6, 7—8). При этом четырехразрядный код, образованный символами b_2, b_4, b_6, b_8 , указывает номер ошибочного разряда (символу a_1 соответствует код 0000, символу a_2 — код 0001, символу a_{16} — код 1111).
3. Появление одиночной ошибки в избыточных разрядах нарушает одно проверочное равенство — то, в которое входит данный избыточный разряд.
4. Если структура нарушенных проверочных равенств отличается от описанной в пп. 2 и 3, то это свидетельствует о возникновении нескольких (2, 3 ... и т. д.) ошибок. В этом случае должен выдаваться отказ, соответствующий случаю обнаруживаемой, но не исправляемой кодом конфигурации ошибок.

Хотя описываемый код содержит несколько больше избыточных символов, чем это минимально необходимо для исправления однократных ошибок при 16 информационных разрядах (достаточно 5 избыточных символов, например, в коде Хэмминга — см. /6/), однако он обладает рядом

дополнительных преимуществ. Главным из них является возможность обнаружения нескольких ошибок.

Как при записи, так и при чтении работа схемы кодирования-декодирования осуществляется одновременно с вводом (выводом) информации; дополнительных тактов для кодирования и декодирования не требуется.

Для оценки эффективности защиты сравним характеристики надежности двух вариантов ЗУ: 16-разрядного без защиты и 24-разрядного с использованием корректирующего кода. Могут представить интерес два типа характеристик: устойчивость по отношению к случайным одиночным ошибкам (типа сбоев), обусловленных, в частности, влиянием помех, и надежность по отношению к отказам отдельных элементов.

Одиночные ошибки не приводят к общей потере работоспособности ЗУ, но вызывают выдачу ложной информации в незащищенном ЗУ или отказ от выдачи данных, если осуществляется контроль с обнаружением ошибок. Надежность в этом смысле можно охарактеризовать тремя вероятностями: $P_{пр}$ — правильного считывания; $P_{ош}$ — ошибочного считывания и $P_{отк}$ — отказа — при одиночном обращении к ЗУ или аналогичными вероятностями при непрерывной работе в течение определенного времени T_0 с заданной частотой обращения.

Пусть p_0 — вероятность ошибки в одном двоичном символе при однократном обращении; для упрощения рассуждений случайные ошибки будем считать независимыми событиями. Тогда вероятности правильного и ошибочного чтения при однократном обращении для незащищенного ЗУ равны:

$$P_{пр}^{(1)} = (1 - p_0)^{16}; \quad (2)$$

$$P_{ош}^{(1)} = 1 - (1 - p_0)^{16}. \quad (3)$$

Отказов в незащищенном ЗУ не бывает, поэтому

$$P_{отк}^{(1)} = 0.$$

При использовании корректирующего кода аналогичные вероятности равны:

$$P_{пр}^{(2)} = (1 - p_0)^{24} + C_{24}^1 p_0 (1 - p_0)^{23}; \quad (4)$$

$$P_{ош}^{(2)} = \sum_{i=3}^{24} l_{ош}^i p_0^i (1 - p_0)^{24 - i}; \quad (5)$$

$$P_{отк}^{(2)} = C_{24}^2 p_0^2 (1 - p_0)^{24 - 2} + \sum_{i=3}^{24} l_{отк}^i p_0^i (1 - p_0)^{24 - i}. \quad (6)$$

Формула (4) учитывает, что в защищенном ЗУ правильное считывание обеспечивается при отсутствии ошибок и при одиночных ошибках. В формулах (5) и (6) $l_{ош}^i$; $l_{отк}^i$ означают числа конфигураций из i ошибок ($i \geq 3$), ведущих соответственно к ошибочному декодированию или отказу. Случай $i = 2$ всегда приводит к отказу, поэтому соответствующий член полностью входит в (6).

Наибольшую трудность представляет определение $l_{\text{ош } i}$ и $l_{\text{отк } i}$. Однако, учитывая, что с увеличением числа ошибок i соответствующие слагаемые в формулах (5)–(6) быстро уменьшаются (из-за члена p_0^i), можно ограничиться значением $i = 3$, отбросив остальные слагаемые. Анализ всех возможных конфигураций ошибок при $i = 3$ дает следующие значения: $l_{\text{ош } 3} = 640$; $l_{\text{отк } 3} = 1384$. При этом

$$P_{\text{ош}}^{(2)} \cong 640 p_0^3 (1 - p_0)^{21}; \quad (7)$$

$$P_{\text{отк}}^{(2)} \cong C_{24}^2 p_0^2 (1 - p_0)^{22} + 1384 p_0^3 (1 - p_0)^{21}. \quad (8)$$

Учитывая, что в реальных ЗУ всегда выполняется неравенство

$$24 p_0 \ll 1, \quad (9)$$

можно получить упрощенные формулы для $P_{\text{пр}}^{(1)}$, $P_{\text{ош}}^{(1)}$, $P_{\text{пр}}^{(2)}$, $P_{\text{ош}}^{(2)}$, $P_{\text{отк}}^{(2)}$:

$$P_{\text{пр}}^{(1)} \cong 1 - 16 p_0; \quad (10)$$

$$P_{\text{ош}}^{(1)} \cong 16 p_0; \quad (11)$$

$$P_{\text{пр}}^{(2)} \cong 1 - 276 p_0^2; \quad (12)$$

$$P_{\text{ош}}^{(2)} \cong l_{\text{ош } 3} p_0^3 = 640 p_0^3; \quad (13)$$

$$P_{\text{отк}}^{(2)} \cong 276 p_0^2. \quad (14)$$

Сумма $P_{\text{пр}}^{(2)} + P_{\text{ош}}^{(2)} + P_{\text{отк}}^{(2)}$ отличается от 1 на малую величину $l_{\text{ош } 3} p_0^3$. Эта "неувязка" объясняется тем, что при выводе упрощенных формул отбрасывались члены, содержащие более высокие степени p_0 .

Для оценки эффективности введения в ЗУ кодовой защиты можно сопоставлять вероятности $P_{\text{ош}} + P_{\text{отк}}$ для обоих вариантов:

$$a_1 = \frac{P_{\text{ош}}^{(2)} + P_{\text{отк}}^{(2)}}{P_{\text{ош}}^{(1)} + P_{\text{отк}}^{(1)}} = \frac{P_{\text{ош}}^{(2)} + P_{\text{отк}}^{(2)}}{P_{\text{ош}}^{(1)}} \cong \frac{276 p_0^2}{16 p_0} = 17,3 p_0. \quad (15)$$

Соотношение между вероятностями ошибок и отказа от декодирования защищенного ЗУ равно

$$a_2 = \frac{P_{\text{ош}}^{(2)}}{P_{\text{отк}}^{(2)}} \cong \frac{640}{276} p_0 = 2,34 p_0. \quad (16)$$

При малых p_0 a_1 и a_2 очень малы.

Наглядным критерием для сравнения является также оценка вероятности

Таблица 1

Сравнительные характеристики двух вариантов ЗУ

P_0	10^{-15}	10^{-14}	10^{-13}	10^{-12}	10^{-11}	10^{-10}	10^{-9}
16-разрядное ЗУ без кодо- вой защиты	$P_{\text{ош}}^{(1)}$ $1,6 \cdot 10^{-14}$	$1,6 \cdot 10^{-13}$	$1,6 \cdot 10^{-12}$	$1,6 \cdot 10^{-11}$	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$	$1,6 \cdot 10^{-8}$
	$P_{\text{об } T_0}^{(1)}$ 0,0284	0,250	0,944	1,000	1,000	1,000	1,000
24-разрядное ЗУ с кодовой защитой	$P_{\text{ош}}^{(2)}$ $2,76 \cdot 10^{-28}$	$6,4 \cdot 10^{-43}$	$6,4 \cdot 10^{-37}$	$6,4 \cdot 10^{-34}$	$6,4 \cdot 10^{-31}$	$6,4 \cdot 10^{-28}$	$6,4 \cdot 10^{-25}$
	$P_{\text{отк}}^{(2)}$ $2,76 \cdot 10^{-26}$	$2,76 \cdot 10^{-26}$	$2,76 \cdot 10^{-24}$	$2,76 \cdot 10^{-20}$	$2,76 \cdot 10^{-20}$	$2,76 \cdot 10^{-18}$	$2,76 \cdot 10^{-16}$
	$P_{\text{сб } T_0}^{(2)}$ $4,97 \cdot 10^{-16}$	$4,97 \cdot 10^{-14}$	$4,97 \cdot 10^{-12}$	$4,97 \cdot 10^{-10}$	$4,97 \cdot 10^{-8}$	$4,97 \cdot 10^{-6}$	$4,97 \cdot 10^{-4}$
	$\alpha_2 = \frac{P_{\text{ош}}^{(2)}}{P_{\text{отк}}^{(2)}}$ $2,32 \cdot 10^{-15}$	$2,32 \cdot 10^{-14}$	$2,32 \cdot 10^{-13}$	$2,32 \cdot 10^{-12}$	$2,32 \cdot 10^{-11}$	$2,32 \cdot 10^{-10}$	$2,32 \cdot 10^{-9}$
	$\alpha_1 = \frac{P_{\text{ош}}^{(2)} + P_{\text{отк}}^{(2)}}{P_{\text{ош}}^{(1)}}$ $1,73 \cdot 10^{-14}$	$1,73 \cdot 10^{-13}$	$1,73 \cdot 10^{-12}$	$1,73 \cdot 10^{-11}$	$1,73 \cdot 10^{-10}$	$1,73 \cdot 10^{-9}$	$1,73 \cdot 10^{-8}$

сти работы ЗУ без сбоев в течение определенного времени — T_0 часов. Пусть средняя частота обращения к ЗУ равна $G_{обр}$ /с. Поскольку вероятности работы без сбоев (для достаточно "надежных" ЗУ) близки к 1, лучше рассматривать противоположные события — вероятности, что в течение T_0 часов непрерывной работы будет хотя бы один сбой, ведущий к отказу или ошибке. Для двух рассматриваемых вариантов ЗУ эти вероятности (обозначим их $P_{сб T_0}^{(1)}$ и $P_{сб T_0}^{(2)}$) равны:

$$P_{сб T_0}^{(1)} = 1 - (p_{пр}^{(1)})^{G \cdot 3600 \cdot T_0} \cong 1 - (1 - 10 p_0)^{3600 \cdot G T_0} \cong \cong 5,76 \cdot 10^4 T_0; \quad (17)$$

$$P_{сб T_0}^{(2)} = 1 - (p_{пр}^{(2)})^{3600 G \cdot T_0} = 1 - (1 - p_{ош}^{(2)} - p_{отк}^{(2)})^{3600 G \cdot T_0} \cong 3600 G T_0 (p_{ош}^{(2)} + p_{отк}^{(2)}). \quad (18)$$

В табл. 1 приведены результаты расчетов при разных значениях p_0 . Еще более наглядно преимущества защищенного ЗУ показывает табл. 2, в которой представлено среднее время наработки на 1 сбой для обоих вариантов ЗУ при частоте обращения $G = 10^5$ 1/с.

Таблица 2

Среднее время наработки на 1 сбой (в часах)

p_0	Незащищенное ЗУ	Защищенное ЗУ
10^{-15}	$1,7 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^{19}$
10^{-14}	$1,7 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^{17}$
10^{-13}	$1,7 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^{15}$
10^{-12}	$1,7 \cdot 10^2$	$1,0 \cdot 10^{13}$
10^{-11}	$1,7 \cdot 10$	$1,0 \cdot 10^{11}$
10^{-10}	1,7	$1,0 \cdot 10^9$
10^{-9}	$1,7 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^7$
10^{-8}	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^5$
10^{-7}	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^3$

Даже при вероятности сбоев в двоичных символах $p_0 = 10^{-7}$, когда в незащищенном ЗУ сбои возникают через несколько секунд, защита позволяет сохранить работоспособность (с 1 сбоем на 1000 часов).

Сравним теперь надежность обоих вариантов ЗУ по отношению к отказам элементов. Надежность элементов удобно характеризовать вероятно-

стью безотказной работы в течение времени $t - P_{бр}(t)$ или вероятностью отказа за это же время: $P_{отк}(t) = 1 - P_{бр}(t)$. Обе вероятности являются монотонными функциями времени: $P_{бр}(t)$ — убывающей, $P_{отк}(t)$ — возрастающей. Они могут относиться как к отдельным двоичным элементам ЗУ, так и к целым микросхемам, содержащим несколько сотен или тысяч двоичных элементов.

Если известна функция $P_{бр}^{(1)}(t)$, относящаяся к одному элементу, то аналогичная функция, отнесенная к N элементам, равна

$$P_{бр}^{(N)}(t) = [P_{бр}^{(1)}(t)]^N. \quad (19)$$

Таким образом, функции $P_{бр}^{(1)}(t)$ и $P_{бр}^{(N)}(t)$ взаимно связаны и можно пользоваться любой из них. В дальнейшем изложении несколько удобнее воспользоваться функцией $P_{бр}^{(1)}(t)$.

Пусть ЗУ содержит N двоичных элементов, разбитых на K слов по m разрядов. Вероятность безотказной работы незащищенного ЗУ в течение времени t равна*

$$P_{бр1} = (P_{бр}^{(1)})^{Km_1} \quad (20)$$

В защищенном ЗУ отказ одного (любого) конкретного слова наступает при отказе 2 и более из 24 элементов. Поэтому вероятность безотказной работы, отнесенная к одному слову, равна

$$P_{брсл} = (P_{бр}^{(1)})^{m_2} + C_{m_2}^1 \cdot (1 - P_{бр}^{(1)}) \cdot (P_{бр}^{(1)})^{m_2 - 1}. \quad (21)$$

Вероятность безотказной работы защищенного ЗУ, содержащего K слов, равна

$$\begin{aligned} P_{бр2} &= (P_{брсл})^K = \left\{ (P_{бр}^{(1)})^{m_2} + m_2 (1 - P_{бр}^{(1)}) (P_{бр}^{(1)})^{m_2 - 1} \right\}^K = \\ &= (P_{бр}^{(1)})^{m_2 K} [1 + m_2 (1 - P_{бр}^{(1)}) (P_{бр}^{(1)})^{-1}]^K = \\ &= (P_{бр}^{(1)})^{m_2 K} \left[1 + m_2 \left(\frac{1}{P_{бр}^{(1)}} - 1 \right) \right]^K. \end{aligned} \quad (22)$$

При достаточно малых $P_{бр}^{(1)}$ обе вероятности $P_{бр1}$ и $P_{бр2}$ близки к 1, поэтому для наглядного сравнения лучше обратиться к вероятностям отказов $P_{отк1;2} = 1 - P_{бр1;2}$:

$$P_{отк1} = 1 - P_{бр1} = 1 - (1 - P_{отк}^{(1)})^{Km_1} \cong Km_1 P_{отк}^{(1)}; \quad (23)$$

$$P_{отк2} = 1 - (1 - P_{отк}^{(1)})^{m_2 K} \left[1 + m_2 \left(\frac{1}{1 - P_{отк}^{(1)}} - 1 \right) \right]^K. \quad (24)$$

*) Здесь и далее рассматриваются вероятности как функции аргумента t — времени. Для простоты записи аргумент будет опускаться: $P_{бр}^{(1)}(t) = P_{бр}^{(1)}$

$P_{бр1}(t) = P_{бр1} \dots$ и т. д.

Разлагая это выражение в ряд по степеням $P_{\text{отк}}^{(1)}$ и ограничиваясь членом, содержащим $(P_{\text{отк}}^{(1)})^2$, получим для малых $P_{\text{отк}}^{(1)}$:

$$P_{\text{отк} 2} \cong m_2 (m_2 - 1) K (P_{\text{отк}}^{(1)})^2. \quad (25)$$

Сопоставляя (24) и (25), получим:

$$\beta = \frac{P_{\text{отк} 2}}{P_{\text{отк} 1}} = \frac{m_2 (m_2 - 1)}{m_1} P_{\text{отк}}^{(1)}. \quad (26)$$

Отсюда видно, что при малых $P_{\text{отк}}^{(1)}$ защищенная память обеспечивает многократное (на несколько порядков) увеличение надежности. В табл. 3 приведены значения $P_{\text{отк} 1}$, $P_{\text{отк} 2}$, β , рассчитанные по формулам (20) — (26) для сравниваемых вариантов ЗУ в зависимости от $P_{\text{отк}}^{(1)}$.

Характеристики, приведенные в табл. 1—3, показывают огромные преимущества ЗУ с кодовой защитой. Следует, однако, иметь в виду, что существует ряд факторов, которые не могли быть учтены в расчетах.

1. Наряду с одиночными и независимыми ошибками в работе ЗУ могут возникать и групповые ошибки (например, при сильных помехах), которые снижают эффективность ЗУ с кодовой защитой.

2. Связь между надежностью микросхемы $P_{\text{бр}}^{(N)}$ и одного элемента памяти $P_{\text{бр}}^{(1)}$ несколько сложнее, чем определяется формулой (19). Это объясняется тем, что отказ некоторых элементов микросхемы, осуществляющих управление (выборка адресов, выходные формирователи и др.), приводит к отказу значительной части или даже всех элементов микросхемы. Это является доводом в пользу применения микросхем с организацией $1 \times K$ (1 разряд, K адресов) — тогда при отказе любых элементов и всей микросхемы защищенное ЗУ может сохранить работоспособность.

3. Сбои при работе ЗУ с кодовой защитой в большинстве случаев обнаруживаются кодом. Это позволяет обеспечить бесперебойную работу станции программными средствами (путем повторения части программы и т. п.).

4. Когда при одиночных отказах элементов ЗУ схема контроля выдает сигнал о необходимости ремонта, ЗУ продолжает оставаться работоспособным. Это позволяет резко повысить эксплуатационную надежность путем своевременного ремонта.

На основании изложенных в статье материалов можно сделать следующие выводы.

1. ЗУ автоматической метеорологической станции должно иметь емкость 8—16 тысяч слов, организованных в общую блочную структуру (ОЗУ и ППЗУ). Путем набора нужных блоков емкостью 2—4 K слов можно менять соотношение между емкостью ОЗУ и ППЗУ в зависимости от модификации.

2. ППЗУ должно обеспечивать возможность перезаписи программы в месте эксплуатации станции и сохранение информации при выключенном питании.

Сравнительные характеристики надежности незащищенного
и защищенного ЗУ при емкости $K = 16 \cdot 10^3$ слов

Вероятность отказа элемента $P_{отк}^{(1)}$	Незащищенное ЗУ $m_1 = 16$ $P_{отк 1}$	Защищенное ЗУ $m_2 = 24$ $P_{отк 2}$	$\beta = \frac{P_{отк 2}}{P_{отк 1}}$
10^{-14}	$2,60 \cdot 10^{-9}$	$9,04 \cdot 10^{-22}$	$3,48 \cdot 10^{-13}$
10^{-12}	$2,60 \cdot 10^{-7}$	$9,04 \cdot 10^{-18}$	$3,48 \cdot 10^{-11}$
10^{-10}	$2,60 \cdot 10^{-5}$	$9,04 \cdot 10^{-14}$	$3,48 \cdot 10^{-9}$
10^{-8}	$2,60 \cdot 10^{-3}$	$7,54 \cdot 10^{-10}$	$2,40 \cdot 10^{-7}$
10^{-6}	$2,31 \cdot 10^{-1}$	$5,21 \cdot 10^{-6}$	$2,26 \cdot 10^{-5}$
10^{-4}	1	$4,42 \cdot 10^{-2}$	$4,42 \cdot 10^{-2}$

3. Для повышения эксплуатационной надежности следует использовать код, позволяющий исправлять в словах одиночные и обнаруживать двойные ошибки.

4. Использование кодовой защиты с исправлением одиночных ошибок может быть полезным и при разработке микросхем ЗУ (ПЗУ), т. к. позволяет резко уменьшить отбраковку (микросхемы с одним или несколькими "поврежденными" разрядами окажутся пригодными для использования), увеличить плотность (по этой же причине) при одновременном увеличении надежности и улучшении экономических характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А в а х Ю. А., Ф а т и н В. К. Односторонние запоминающие устройства. — М.: Энергия, 1981. — 191 с.
2. Аналоговые и цифровые интегральные схемы /Под ред. С. В. Якубовского. — М.: Советское радио, 1979. — 335 с.
3. П и т е р с о н У., У з л д о н Э. Коды, исправляющие ошибки. — М.: Мир, 1976. — 594 с.
4. С а м о й л е н к о С. И. Помехоустойчивое кодирование. — М.: Наука, 1966. — 238 с.
5. Х е т а г у р о в Я. А., Р у д н е в Ю. П. Повышение надежности цифровых устройств методами избыточного кодирования. — М.: Энергия, 1974. — 271 с.
6. Х э м м и н г Г. В. Коды с обнаружением и исправлением ошибок. — В кн.: Коды с обнаружением и исправлением ошибок. — М., Изд-во иностр. лит., 1956, с. 7—22.
7. Ч е р н ы ш е в Ю. А., А б б а к у м о в И. С. Расчет и проектирование устройств ЭВМ с пассивным резервированием. — М.: Энергия, 1979. — 119 с.

ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ КОМПЕНСАЦИОННЫМ СПОСОБОМ

Значение влажности почвы w в метеорологической практике используется для расчета потока тепла в почве, являющегося важной компонентой теплового баланса земной поверхности, для оценки влагозапаса почвы и для многих других прикладных задач. При исследованиях, связанных с изучением водных режимов растений, определяемых передвижением воды в почве, важным элементом является также потенциал влажности почвы φ . Последний определяется как энергия, с которой пористый материал удерживает жидкость благодаря своим капиллярно-абсорбционным свойствам /4/. Существует функциональная связь между влагосодержанием почвы и потенциалом влажности. Потенциал влажности в полевых условиях в настоящее время определяется косвенно по влажности и типу почвы /2, 6/. Для датчиков с пористым сорбентом в состоянии равновесия с почвой потенциалы влажности в почве и сорбенте равны независимо от типа и плотности почвы. Потенциал влажности каждого типа почвы однозначно связан с ее влажностью /2, 3/.

Несмотря на разнообразие методов определения влажности почвы /1, 2/, на практике до настоящего времени широко используется метод взвешивания образцов /7/. Этот метод обеспечивает высокую точность определения w , однако требует значительных затрат ручного труда и времени. Большинство других методов и приборов на их основе не позволяют производить измерение влажности с приемлемой точностью в полевых условиях.

Известные термовлагомеры не могут быть использованы для непрерывных и частых измерений. Это объясняется тем, что на результат измерения влияет тепловое сопротивление контакта датчик—измеряемая среда, которое меняется под воздействием выделяемого влагомером тепла, нестабильно во времени и зависит от структуры почвы /2/. Результаты измерений с помощью этих влагомеров существенно зависят от температуры среды. Кроме этого, недостатком этих устройств является их недостаточная стабильность и воспроизводимость характеристик /3/.

Ниже приводится описание датчика и устройства для измерения влажности w или функционально связанного с ней потенциала влажности φ почвы, с помощью которых можно производить непрерывное измерение этих величин /5/. Устройство (рис. 1) состоит из датчика и пульта, связанных кабелем. В состав пульта входят усилитель, милливольтметр и блок питания. На рис. 2 показан схематический разрез датчика, помещенного в почву 1. Датчик смонтирован в корпусе, который состоит из достаточно массивного металлического диска 4 и двух скрепленных с ним металлических цилиндров 8 и 9. В цилиндрах внутри капиллярно-пористых тел 2 и 5 находятся термотранзисторные преобразователи 3 и 7 /8/, выполненные на базе транзисторов ГТ 109Г. Термопреобразователи при измерениях одновременно являются нагревателями. Цилиндры играют

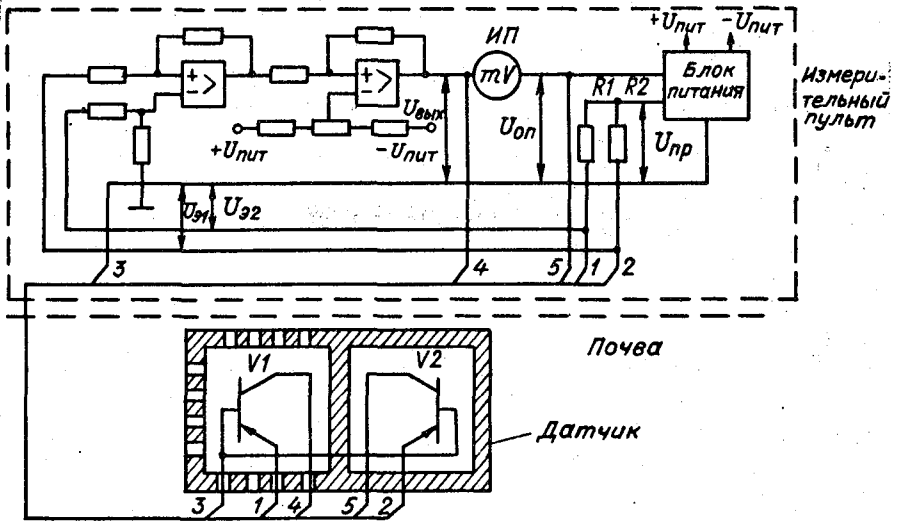


Рис. 1.

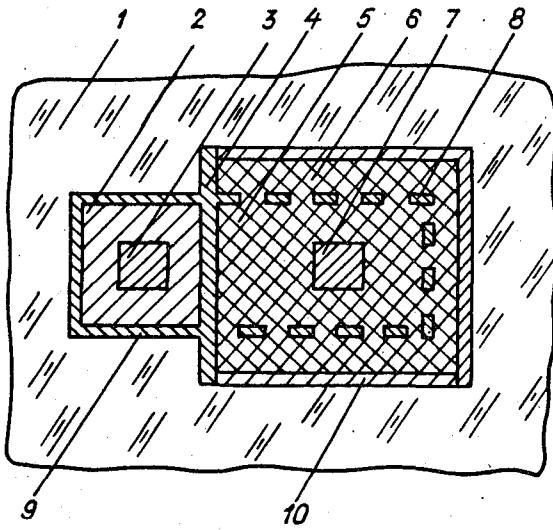


Рис. 2.

роль тепловых экранов, а диск 4 — радиатора. Цилиндр 8, в стенке и дне которого много отверстий, влагопроницаем. Для исключения непосредственного контакта цилиндра 8 с исследуемой почвой он покрыт слоем капиллярно-пористой массы 6, соединяющейся через отверстия цилиндра 8 с телом 5. Диаметр отверстий в цилиндре 8 значительно меньше толщины его стенки, что практически исключает теплообмен между телами 5 и 6 через отверстия цилиндра 8 по пористой массе. Для хорошего влагообмена через отверстия ими должна быть покрыта значительная часть поверхности цилиндра 8. Тела 2, 5 и 6 изготавливаются из специально приготовленного гипса. Поверхность тела 8 может быть покрыта гидрофобным крупнопористым веществом 10 для того, чтобы к телам 5 и 6 могла проникать только газовая фаза воды. Датчик с таким покрытием будет меньше загрязняться почвой. Тело 5—6 является чувствительным элементом датчика. Его влажность зависит от влажности почвы. Термопреобразователь 7 является измерительным преобразователем. Термопреобразователь 3, помещенный во влагоизолированное теплоинерционное тело 2 (с постоянной влажностью), выполняет роль компенсатора.

При работе устройства тепло, выделяющееся в термопреобразователях (термотранзисторах, работающих в режиме эмиттерного сопротивления), проходит по капиллярно-пористым телам 2 и 5, поступает на тепловые экраны 8, 9 и через радиатор рассеивается в почве. Температура термопреобразователей зависит от выделяющейся на них мощности, теплового сопротивления термопреобразователь—среда, а в динамике также от массы и теплоемкости термопреобразователей и окружающих их тел. Тепловое сопротивление капиллярно-пористых тел зависит от влажности почвы. Конструкция и теплофизические параметры теплоинерционного тела 2 выбираются такими, чтобы рост температуры (инерционность) и максимальный нагрев (тепловое сопротивление) у обоих термопреобразователей были бы равными при некоторой определенной влажности почвы. Эту влажность назовем опорной. Если влажность измеряемой среды будет больше (меньше) опорной влажности, то тепловое сопротивление капиллярно-пористого тела 5 будет соответственно меньше (больше) его теплового сопротивления при опорной влажности. Соответственно и температура термопреобразователя 7 будет меньше (больше) его температуры при опорной влажности, то есть температуры термопреобразователя 3 (компенсатора). Разность температур между термопреобразователями 2 и 7 однозначно зависит от влажности почвы. Следовательно, и выходной сигнал датчика — разность эмиттерных напряжений термотранзисторов — будет также однозначно зависеть от измеряемой величины.

Термотранзисторы V_1 и V_2 (рис. 1) нагреваются токами, задаваемыми источником прямого смещения $U_{пр}$ через резисторы R_1 , R_2 , включенные в цепи эмиттеров V_1 , V_2 . В качестве выходного сигнала устройства используется разность напряжений "опорного" источника $U_{оп}$, напряжение с которого подается на термопреобразователь 3 компенсатора, и выходного напряжения усилителя $U_{вых}$. Выходное напряжение усилителя $U_{вых}$ равно $U_{оп}$ при влажности тела 5, равной влажности тела 2 (опорной влажности); при этом температуры термопреобразователей V_1 и V_2 также

будут равны. При появлении разности температур $V1, V2$ (влажность тела 2 отлична от опорной) появляется сигнал разбаланса, величина которого определяется разностью змиттерных напряжений $U_{э1}$ и $U_{э2}$, подаваемых синфазно на вход усилителя. Выходное напряжение с усилителя подается на коллектор $V1$ таким образом, что при повышении температуры термотранзистора $V1$ относительно температуры $V2$ оно становится меньше, а при уменьшении температуры $V1$ относительно $V2$ напряжение на коллекторе $V1$ становится больше напряжения, подаваемого на коллектор $V2$ компенсатора. Это приводит к уменьшению или увеличению выделяющейся на термотранзисторе мощности, а в конечном счете к выравниванию температур $V1$ и $V2$. Перегрев термотранзисторов относительно среды составляет 1–2 °С. (Для сравнения отметим, что в термовлагомерах обычных типов перегрев элементов датчика на 1,5–2 порядка выше.) При этом практически исключается погрешность, вызываемая вариацией теплового сопротивления контакта датчик–почва.

Приняв, что в установившемся режиме перегрев Δt транзисторов $V1, V2$ одинаков, теплопроводности тел 2 и 5 (рис. 2) равны соответственно $\lambda_{оп}$ (постоянная величина для датчика) и λ_1 , а токи I , проходящие через $V1$ и $V2$, равны, получим выражение для выходного сигнала устройства:

$$U = U_{вых} - U_{оп} = (\lambda_1 - \lambda_{оп}) \frac{\Delta t}{I} K.$$

Здесь K – параметр, определяемый конструкцией датчика. Выходной сигнал U прямо пропорционален изменению теплопроводности λ_1 , однозначно связанной с величиной измеряемой влажности w .

На рис. 3 показан внешний вид датчика до покрытия экрана абсорбирующим веществом и датчик в готовом для установки в почву виде. На рис. 4 представлены полученные зависимости выходного напряжения от влажности для двух типов почв: песка (1) и суглинка (2). Абсорбирующие тела 2, 5 и 6 датчика (рис. 2) были изготовлены из смеси, содержащей 40 весовых частей медицинского гипса и 32 части воды.

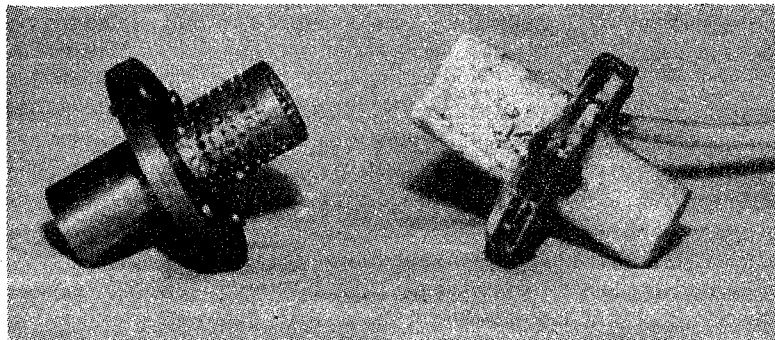


Рис. 3.

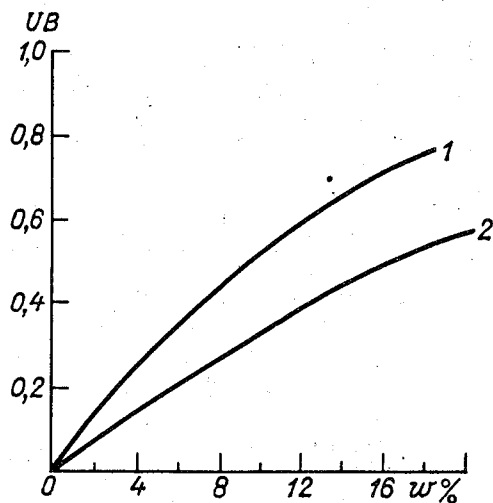


Рис. 4.

Как уже отмечалось, влажность теплоинерционного тела 2 в зависимости от конкретного назначения датчика и требуемого вида выходных характеристик (градуировочных кривых) устройства может выбираться при изготовлении датчика. В описанном устройстве она была выбрана равной 0 %. Тело 2 (после заполнения им цилиндра 9) было обезвожено.

При получении градуировочных кривых для определенных типов почв была применена следующая методика. Перед каждой серией измерений почва, помещенная в коробку, вынималась из нее и проводилось равномерное увлажнение или высушивание почвы. Затем почва вновь помещалась в коробку, а в почву устанавливался датчик влажности. Взвешивания коробки с датчиком и почвой производились перед и после проведения каждого увлажнения (высушивания) почвы, а также и при каждом измерении. Съем показаний (выходного напряжения) проводился в диапазоне изменения w почвы от 0 до 25 %.

Для контроля правильности работы устройства к его входу периодически подключался контрольный датчик, оба термочувствительных элемента которого были помещены в общий объем, заполненный абсорбирующим телом. При этом независимо от влажности этого тела выходной сигнал устройства должен быть равен нулю, поскольку термотранзисторы контрольного датчика находятся в одинаковых условиях.

При измерениях через термотранзисторы V1 и V2 (рис. 1) датчика пропускался ток около 1 мА при коллекторном напряжении около 5 В. Предварительные исследования устройства для измерения влажности почвы дали следующие основные результаты:

1. Устройство имеет достаточно высокую чувствительность; для песчаных почв она составляет около 50 мВ на 1 % изменения w , а для суглинистых — около 30 мВ/%. Это позволяет использовать такие устройства в составе автоматических теплобалансовых и воднобалансовых станций. Возможно применение таких устройств без выходных усилителей при дистанционных измерениях влажности почвы совместно с серийными цифровыми приборами, имеющими диапазон 1 В и разрешающую способность 1 мВ.

2. Подтверждена независимость показаний устройства для измерения влажности почвы, содержащего датчик влажности с пористой оболочкой, от качества контакта датчика с почвой.

3. Показания устройства не зависят от времени непрерывного включения датчика. Это свидетельствует о том, что выделяющаяся в датчике мощность практически не оказывает влияния на перераспределение влажности в месте установки датчика. Так, при непрерывном включении датчика в течение 6–8 часов не было отмечено изменений показаний. Эти результаты получены при установке датчика в ограниченном объеме, в открытой почве влияние датчика будет сказываться еще меньше.

4. Обеспечивается повторяемость результатов (градуировочной кривой для определенного вида почвы) с погрешностью, не превышающей $\pm 0,5$ % весовой влажности почвы как при уменьшении, так и при увеличении влажности в пределах от 0 до 25 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влажность. Измерение и регулирование в научных исследованиях и технике, т. 4. — Л.: Гидрометеоздат, 1968. — 308 с.
2. Г л о б у с А. М. Экспериментальная гидрофизика почв. — Л.: Гидрометеоздат, 1969. — 355 с.
3. Г л о б у с А. М., Каганов М. В. Почвенный термовлагомер с полупроводниковым датчиком. — В кн.: Сб. трудов по агрономической физике. — Л., Колос, 1966, вып. 13, с. 195–204.
4. Г л о б у с А. М., Розеншток С. К., Сиротин В. М., Мичурин Б. К. К методике определения потенциала влажности почв с применением мембранных прессов. — Почвоведение, № 2, 1971, с. 141–149.
5. Г л о б у с А. М., Фогельсон И. Б., Стернзат С. М. Устройство для определения потенциала влажности почвы. — Авт. св. № 721726. — Бюлл. открытый, изобретений, промышленных образцов и товарных знаков, 1980, № 10.
6. Н е р п и н С. В., Ч уд н о в с к и й А. Ф. Физика почвы. — М.: Наука, 1967. — 583 с.
7. Руководство по теплобалансовым наблюдениям. — Л.: Гидрометеоздат, 1977. — 149 с.
8. Ф о г е л ь с о н И. Б. Транзисторные термодатчики. — Л.: Советское радио, 1972. — 128 с.

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ МЕТОДИКИ НАТУРНЫХ СЛИЧЕНИЙ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Задачи оценки динамических погрешностей измерений относятся к числу основных в современной метрологии /3, 7/. Одна из них — оценка и учет погрешностей при сличениях средств измерений (СИ) метеорологического назначения, проводимых в условиях естественной атмосферы, т. е. в динамическом режиме. Такие сличения осуществляются, например, с целью определения сходимости измерений разнотипными СИ одной и той же величины.

В /9/ рассмотрены условия корректности сличений в динамическом режиме, выполнение которых позволяет осуществить также и метрологический контроль СИ на местах эксплуатации последних и устанавливать их пригодность к дальнейшему применению, т. е. производить поверку /5/.

При сличениях поверяемого и образцового СИ в естественной атмосфере (натурных сличениях), когда на их входы действует одна и та же величина $x(y)$, меняющаяся во времени по произвольному закону, условием корректного определения статической погрешности $\Delta_{п.ст}$ поверяемого СИ является равенство динамических погрешностей поверяемого ($\Delta_{п.дин}^{(t)}$) и образцового ($\Delta_{о.дин}^{(t)}$) СИ.

Уравнение $\Delta_{п.дин}^{(t)}$ с $\Delta_{о.дин}^{(t)}$ может быть достигнуто управлением динамической характеристикой (ДХ) одного из этих СИ для сближения с ДХ другого СИ, но, естественно, без нарушения при этом номинальной статической характеристики измерительного преобразования корректируемого СИ.

Как всякая экспериментальная операция, управление динамической характеристикой сопровождается погрешностью, вследствие которой не достигается полная идентичность ДХ сличаемых СИ, и поэтому $\Delta_{п.дин}^{(t)} \neq \Delta_{о.дин}^{(t)}$, т. е.

$$\Delta_{п.дин}^{(t)} - \Delta_{о.дин}^{(t)} = \Delta_{сл.дин}^{(t)} \neq 0.$$

Таким образом, определение $\Delta_{п.ст}$ сопровождается указанной погрешностью $\Delta_{сл.дин}^{(t)}$ — динамической погрешностью сличений.

Настоящая статья посвящена теоретико-расчетному анализу формирования такой погрешности и ее оценке на конкретном примере управления динамической характеристикой одного из сличаемых гигрометров, принимаемого за образцовый.

Установим вначале характер связи $\Delta_{сл.дин}^{(t)}$ с динамическими характеристиками сличаемых СИ и измеряемой величиной как функцией времени.

Реальные СИ в динамическом отношении являются нелинейными не-

стационарными устройствами с распределенными параметрами. Аналитическое описание их динамических свойств дается нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных /1/. Однако большинство практических метрологических задач /1/, как и задач автоматического регулирования /2/, допускает их замену линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. Это упрощает анализ и позволяет пользоваться для описания динамических свойств СИ характеристиками, нормируемыми в /4/, в частности, передаточной функцией.

Операторное выражение динамической погрешности $\Delta_{п. дин}^{(S)}$ и $\Delta_{о. дин}^{(S)}$ каждого из сличаемых СИ, приведенной ко входу, выражается согласно /3/, формулами

$$\Delta_{п. дин}^{(S)} = \left[\frac{W_{п. н}^{(S)}}{W_{п. н}^{(0)}} - 1 \right] X(S), \quad (1)$$

$$\Delta_{о. дин}^{(S)} = \left[\frac{W_{о. н}^{(S)}}{W_{о. н}^{(0)}} - 1 \right] X(S), \quad (2)$$

где $W_{п. н}^{(S)}$ и $W_{о. н}^{(S)}$ — соответственно номинальные передаточные функции поверяемого и образцового СИ;

$W_{п. н}^{(0)}$ и $W_{о. н}^{(0)}$ — соответственно их номинальные статические характеристики измерительного преобразования;

$X(S) = Z[x(t)]$ — операторное выражение действующего на их входах процесса $x(t)$;

Z — символ операции перехода от оригинала к изображению.

Сравнивая выражения (1) и (2), получим

$$\Delta_{сл. дин}^{(S)} = \left[\frac{W_{п. н}^{(S)}}{W_{п. н}^{(0)}} - \frac{W_{о. н}^{(S)}}{W_{о. н}^{(0)}} \right] \cdot X(S). \quad (3)$$

В общем случае, следовательно, динамическая погрешность сличения как функция времени:

$$\Delta_{сл. дин}^{(t)} = Z^{-1}[\Delta_{сл. дин}^{(S)}] = Z^{-1} \left\{ \left[\frac{W_{п. н}^{(S)}}{W_{п. н}^{(0)}} - \frac{W_{о. н}^{(S)}}{W_{о. н}^{(0)}} \right] x \right\} \times Z[x(t)], \quad (4)$$

где Z^{-1} — символ операции перехода от изображения к оригиналу.

Если в распоряжении имеются аналитические описания частотных свойств процесса $x(t)$, то выражения для оценок динамической погрешности при сличениях можно получить, переходя от передаточных функций $W_{п. н}^{(S)}$ и $W_{о. н}^{(S)}$ к комплексным частотным функциям (характеристическим векторам) $W_{п. н}^{(j\omega)}$ и $W_{о. н}^{(j\omega)}$ и учитывая, что модуль

комплексной частотной функции есть амплитудно-частотная характеристика.

Тогда при детерминированном процессе в виде гармонической функции с фиксированной частотой Ω , постоянной фазой и амплитудой a_m , т. е. $x(t) = a_m \cdot e^{j\Omega t}$, можно оценить $\Delta_{\text{сл. дин}}^{(t)}$:

$$\Delta_{\text{сл. дин}}^{(t)} = \left| \frac{W_{\text{п. н}}(j\omega)}{W_{\text{п. н}}(0)} - \frac{W_{\text{о. н}}(j\omega)}{W_{\text{о. н}}(0)} \right| a_m e^{j\Omega t}, \quad (5)$$

а при случайном стационарном центрированном процессе со спектральной плотностью $G(\omega)$ — дисперсию $D(\Delta_{\text{сл. дин}})$ динамической погрешности сличений в динамическом режиме:

$$D(\Delta_{\text{сл. дин}}) = \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{W_{\text{п. н}}(j\omega)}{W_{\text{п. н}}(0)} - \frac{W_{\text{о. н}}(j\omega)}{W_{\text{о. н}}(0)} \right|^2 G(\omega) d\omega. \quad (6)$$

Результат каждого отдельного наблюдения при сличениях представляет собой арифметическую сумму подлежащей определению $\Delta_{\text{п. ст}}$ и $\Delta_{\text{сл. дин}}^{(t)}$ в момент t одновременных отсчетов по поверяемому и образцовому СИ. Поэтому оценка значений $\Delta_{\text{сл. дин}}$ целиком влияет на точность оценки $\Delta_{\text{п. ст}}$ при определении последней методом сличений в динамическом режиме.

Перейдем к рассмотрению вопроса о способах и средствах управления динамической характеристикой одного из сличаемых СИ.

Как видно из формулы /3/, операторное выражение динамической погрешности сличений в динамическом режиме представляет собой функцию $W_{\text{п. н}}(S)$ и $W_{\text{о. н}}(S)$. Поскольку в обобщенном виде $W(S)$ является дробно-рациональной функцией

$$W(S) = \frac{\sum_{i=0}^n A_i S^i}{\sum_{i=0}^m B_i S^i}, \quad (7)$$

то отличие $W_{\text{п. н}}(S)$ от $W_{\text{о. н}}(S)$ может быть связано как различию в порядке многочленов (m, n), так и различию в значениях соответствующих коэффициентов A_i, B_i . Это указывает на общий подход при устранении такого отличия, при котором идеальным вариантом является применение цифровой обработки выходного сигнала измерения корректируемого образцового СИ с использованием современной элементной базы, что, однако, оправдано лишь в случаях, когда передаточная функция имеет сложную структуру.

Исследования /13/ динамических свойств СИ метеовеличин показали, что в большинстве случаев порядок i не превышает двух. Последнее обстоятельство предоставляет возможность использования специфических средств управления динамической характеристикой образцового СИ.

Для сближения передаточных функций поверяемого и образцового СИ

необходимо ввести корректирующий элемент, передаточная функция которого $W_{к.э}(S)$ может быть найдена в случае последовательного его соединения с некорректированным СИ по известному соотношению

$$W_{к.э}(S) = W_{п.н}(S) \cdot W_{о.н.н}(S), \quad (8)$$

где $W_{о.н.н}(S)$ — передаточная функция некорректированного образцового СИ.

Физической реализацией корректирующего элемента может быть либо устройство (демпфер), устанавливаемое перед входом корректируемого СИ, либо устройство на электрическом выходе СИ.

Электрические корректирующие устройства позволяют проводить коррекцию по закону любой степени сложности, реализуются в виде пассивных или активных электрических или электромеханических цепей из унифицированных элементов. Вместе с тем для обеспечения гарантии минимальных искажений номинальной характеристики статического измерительного преобразования корректируемого СИ, которые могут быть вызваны дрейфом сигнала нулевого уровня, подверженностью действия электрических помех, нестабильностью параметров отдельных электрических компонентов, следует принимать дополнительные меры. Кроме того, их невозможно применить в случаях СИ с ручным управлением (неавтоматическим) и измерительных приборов, не имеющих на выходе электрического сигнала.

Рассмотрим в связи с этим условия использования демпфера в качестве корректирующего устройства для образцового СИ. Демпфер, устанавливаемый на входе СИ, выполняет роль своего рода физического фильтра колебаний измеряемой величины и поэтому ему несвойственны названные ограничения электрических корректирующих устройств, хотя он и не обладает в полной мере их отмеченными возможностями и функциональной гибкостью.

Принцип действия демпфера определяется природой измеряемой физической величины и принципом действия корректируемого СИ. Это видно также из рассматриваемого ниже примера осуществления сличений средств измерения влажности воздуха в динамическом режиме.

В упоминавшейся выше работе /13/ измерительные преобразователи влажности воздуха, используемые в автоматической метеорологической станции, в динамическом отношении отождествляются с инерционным звеном первого порядка. При этом время установления показаний измерительного преобразователя с хлористо-литиевым подогревным влагочувствительным элементом указывается равным 4 минутам. Для иллюстративных расчетов в дальнейшем примем его постоянную времени λ_n равной 70 секундам.

Конструкция этого преобразователя такова, что влагочувствительный элемент расположен на значительном расстоянии от входного отверстия, поэтому имеет место транспортное запаздывание. Тогда его передаточная функция более точно должна представляться так:

$$W_{п.з}(S) = e^{-S\lambda_{п.з}} \frac{K_{п.з}}{\lambda_{п.з}S + 1}, \quad (9)$$

где $\lambda_{п.з}$ — постоянная времени измерительного преобразователя;

$\lambda_{п.з}$ — время транспортного запаздывания;

$l_{п.з}$ — длина пути от входного отверстия до влагочувствительного элемента;

U — скорость потока в канале измерительного преобразователя;

$K_{п.з}$ — коэффициент передачи измерительного преобразователя.

Таким образом, если некорректированное образцовое СИ влажности имеет большое быстродействие, а его время транспортного запаздывания $\lambda_{п.з}$ мало по сравнению с $\lambda_{п.з}$, то необходимо предусмотреть возможность направленного изменения этих параметров. На физическую природу демпфера для ОСИ влажности указывает свойство какого-либо объема, через который протекает паровоздушная смесь с изменяющейся во времени концентрацией пара на его входе $C_{вх}(t)$, ослаблять, сглаживать эти колебания на его выходе. Отсюда следует, что динамическими свойствами гигрометра можно управлять, вводя в поток влажного воздуха, поступающего на вход некорректированного гигрометра, объем определенной вместимости.

Определим аналитический вид ДХ такого демпфера. Для этого составим дифференциальное уравнение концентрации водяного пара как функции времени.

Введем обозначения: V — внутренний объем демпфера; F — равные площади сечений входного и выходного патрубков; U — линейная скорость анализируемого потока; $C_{вх}$ и $C_{вых}$ — соответственно значения концентрации на входе и выходе демпфера.

Всякий входящий в демпфер элементарный объем воздуха можно считать быстро распределяющимся по всему внутреннему пространству демпфера, если созданы условия не только для интенсивной молекулярной, но и турбулентной диффузии внутри демпфера. Пусть при этом до начального момента времени $C_{вх} = C_{вых} = 0$. В начальный момент времени концентрация скачком изменяется от 0 до $C_{вх}$. При хорошем перемешивании концентрация пара на выходе демпфера $C_{вых}$ равна концентрации пара внутри его. Масса пара, поступающая в демпфер в единицу времени, равна $C_{вх}UF$, масса, выходящая из него в единицу времени, $C_{вых}UF$, а увеличение массы пара в объеме в единицу времени составит $(C_{вх} - C_{вых})UF$. Тогда изменение концентрации пара в объеме (а следовательно, на его выходе) в единицу времени составит

$$\frac{dC_{вых}}{dt} = \frac{(C_{вх} - C_{вых})UF}{V}. \quad (10)$$

Решением этого дифференциального уравнения является

$$C_{вых} = C_{вх} \left(1 - e^{-\frac{UF}{V}t}\right), \quad (11)$$

где $C_{вх}$ — скачок концентрации на входе демпфера при указанных начальных условиях.

Отсюда видно, что в динамическом отношении такой демпфер представляет собой апериодическое звено первого порядка с постоянной времени $\lambda_d = \frac{V}{UF}$, т. е. его передаточная функция

$$W_d(S) = \frac{K_d}{\lambda_d S + 1} = \frac{1}{\lambda_d S + 1}. \quad (12)$$

Здесь $K_d = 1$, поскольку физическое и масштабное преобразования отсутствуют.

Нетрудно убедиться, что при $V = 5$ л, $F = 1$ см² и $U = 1$ м/с постоянная времени $\lambda_d = 50$ с. Такой объем имеет шар радиусом 10,6 см.

Возможность изменения λ_d с целью управления динамической характеристикой образцового СИ влажности воздуха обеспечивается конструктивным выполнением демпфера в виде цилиндра с поршнем, который можно устанавливать и фиксировать в любом положении, тем самым задавая необходимую вместимость демпфера. Расширение пределов изменения λ_d достигается изменением сечения подводящего патрубка с помощью дроссельной заслонки. Интенсификации перемешивания способствует установленный на некотором расстоянии от входного отверстия внутри демпфера экран. Искажение значения анализируемой влажности исключается применением материалов, не сорбирующих водяной пар (вакуумная резина, медь, фторопласт, нержавеющая сталь).

Для полного уподобления передаточной функции $W_{о.н.к}(S)$ корректируемого гигрометра передаточной функции $W_{п.н}(S)$ поверяемого гигрометра необходимо еще корректировать звено транспортного запаздывания. Физической реализацией такой коррекции может быть гибкая трубка сечением F и длиной $l_{о.з}$, которая присоединяется ко входу демпфера. Длину $l_{о.з}$ можно определить из условия равенства времен транспортного запаздывания:

$$l_{о.з} = U\lambda_{п.з} = U \frac{l_p}{U_p}. \quad (13)$$

Таким образом, передаточная функция образцового гигрометра с корректирующим устройством (демпфером) имеет вид

$$W_{о.н.к}(S) = e^{-S\lambda_{о.з}} \frac{1}{\lambda_d S + 1} \frac{K_{о.н.н}}{\lambda_{о.н.н} S + 1}, \quad (14)$$

где $\lambda_{о.з}$ — время транспортного запаздывания в этом гигрометре;
 $\lambda_{о.н.н}$ — постоянная времени некорректированного гигрометра;
 $K_{о.н.н}$ — коэффициент передачи некорректированного гигрометра.

Поскольку постоянная времени образцового гигрометра существенно меньше постоянной времени поверяемого СИ влажности, т. е. $\lambda_{о.н.н} < \lambda_{п}$ (а следовательно, и $\lambda_{о.н.н} < \lambda_{д}$), то для упрощения процедуры оценки погрешности сличения из-за отличия $W_{о.н.к}(S)$ от $W_{п.н}(S)$ имеются основания считать, что в динамическом отношении образцовый скорректированный гигрометр, как и поверяемый, является последовательным соединением аperiodического звена первого порядка со звеном транспортного запаздывания. Кроме того, как видно из вышеизложенного, техническая реализация уравнивания времен запаздывания допускает выполнение этой операции с требуемой точностью. Поэтому влиянием отличия $\lambda_{о.з}$ от $\lambda_{п.з}$ на динамическую погрешность сличений также можно пренебречь. Отсюда следует, что основное внимание при сближении реакций сличаемых СИ на один и тот же входной сигнал должно уделяться операции приближения $\lambda_{д}$ к $\lambda_{п}$.

Пусть в этом случае в процессе управления динамической характеристикой образцового СИ $\lambda_{д}$ оказалась установленной 50 с, вместо необходимого значения 70 с ($\lambda_{п} = 70$ с, как выше указывалось). Оценим, приняв во внимание вышеуказанные допущения, погрешность $\Delta_{сл.дин}^{(t)}$ при входном воздействии $x(t)$ в виде скачка точки росы на 1°C и в виде линейного ее изменения во времени со скоростью $3,6^{\circ}\text{C}$ в час (последнее соответствует, например, изменению относительной влажности воздуха в течение часа от 90 до 82 % при температуре воздуха 20°C).

В первом случае динамическую погрешность сличений можно оценить, сопоставляя переходные функции поверяемого и скорректированного образцового гигрометров. Из этого сопоставления следует, что

$$\Delta_{сл.дин}^{(t)} = e^{-\frac{t}{\lambda_{п}}} - e^{-\frac{t}{\lambda_{д}}} \quad (15)$$

Так как $\Delta_{сл.дин}^{(t)}$ имеет максимум между началом изменения выходной величины и ее установившимся значением, то, определяя этот максимум обычным путем, найдем, что

$$\Delta_{сл.дин.мах} = e^{-\lambda_{д}} \frac{\ln \lambda_{д} - \ln \lambda_{п}}{\lambda_{д} - \lambda_{п}} - e^{-\lambda_{п}} \frac{\ln \lambda_{д} - \ln \lambda_{п}}{\lambda_{д} - \lambda_{п}}, \quad (16)$$

который наступает в момент времени

$$t_{мах} = \frac{\ln \lambda_{д} - \ln \lambda_{п}}{\lambda_{д} - \lambda_{п}} \lambda_{д} \lambda_{п}. \quad (17)$$

Подставляя конкретные значения $\lambda_{п}$ и $\lambda_{д}$ в эти выражения, получим, что через 59 с после скачка разность динамических погрешностей $\Delta_{сл.дин}^{(t)}$ достигает максимума, составляющего 12,3 % амплитуды скачка, т. е. $0,12^{\circ}\text{C}$ по точке росы.

Если в указанный момент были бы произведены одновременные отсчеты по этим СИ, то статическая погрешность (допустимый предел которой установлен для рассматриваемого поверяемого СИ равным $0,5^{\circ}\text{C}$

по точке росы) оказалась бы повышенной (или заниженной — в зависимости от направления скачка в 1°C) на $0,12^\circ\text{C}$.

Во втором случае изменения точки росы — по линейному закону со скоростью $U_T = 3,6^\circ\text{C}/\text{ч} = 0,001^\circ\text{C}/\text{с}$:

$$\Delta_{\text{сл. дин}} = U_T (\lambda_{\text{п}} - \lambda_{\text{д}}) = 0,001 \cdot 20 = 0,02^\circ\text{C}. \quad (18)$$

Рассмотренный конкретный пример указывает на степень допускаемого отличия $\lambda_{\text{д}}$ от $\lambda_{\text{п}}$. При использовании в качестве образцового некорректированного СИ влажности гигрометра точки росы /10/, в котором контур регулирования температуры конденсационной поверхности на уровне текущего значения точки росы замыкается оператором, необходимо учитывать динамические возможности последнего как звена контура регулирования. Отработанная методика измерения с помощью этого гигрометра допускает смещение наблюдаемого фотосигнала на 1 деление шкалы индикатора состояния конденсационной поверхности за время не менее чем 20 с (при положительных значениях точки росы), что соответствует отличию температуры поверхности конденсата от точки росы не более чем на $0,05^\circ\text{C}$. Следовательно, демпфер, включенный на входе гигрометра, должен ослаблять амплитуды колебаний точки росы с периодами, меньшими 40 с, до значений, не больших чем $0,05^\circ\text{C}$ по точке росы. За колебаниями с большим периодом динамические свойства оператора позволяют ему следить и поддерживать соответствующую температуру конденсационной поверхности.

У демпфера с вышеуказанными параметрами амплитудно-частотная характеристика при периоде колебаний влажности атмосферы, равном 40 с, имеет значение

$$A(\omega) \Big|_{\omega = \frac{2\pi}{40}} = \frac{1}{\sqrt{\lambda_{\text{д}}^2 \omega^2 + 1}} = \frac{1}{\sqrt{50^2 \left(\frac{2\pi}{40}\right)^2 + 1}} = 0,126, \quad (19)$$

т. е. все колебания с периодом, меньшим 40 с, и с амплитудой колебаний не более $0,4^\circ\text{C}$ по точке росы будут ослаблены демпфером до амплитуды, меньшей $0,05^\circ\text{C}$.

Выполним теперь для рассматриваемых сличаемых СИ влажности оценку дисперсии динамической погрешности их сличений в естественных условиях (в открытой атмосфере), когда спектральная плотность случайной составляющей изменения точки росы аналитически описывается, например, формулой

$$G(\omega) = \frac{D}{\pi} \frac{a}{a^2 + \omega^2},$$

где ω — круговая частота.

Параметры D и a в этом выражении имеют те же значения, что и в выражении для корреляционной функции $R(\tau)$, описывающей этот же про-

цесс и связанной с $G(\omega)$ обратным преобразованием Фурье, т. е.

$$R(\tau) = D e^{-a|\tau|},$$

где $D = R(0) = \sigma^2$ — дисперсия процесса; σ — среднее квадратическое отклонение; a — показатель ослабления корреляции; τ — интервал корреляции.

Положим $D = 0,1$ ($^{\circ}\text{C}$)², $a = 0,5$ с⁻¹. Пользуясь формулой (6), выражением для $G(\omega)$ и принятыми численными значениями λ_d , λ_n , D и a , получим, что $D(\Delta_{\text{сл. дин}}) = 0,001$ ($^{\circ}\text{C}$)².

Экспериментальные /11/ лабораторные и полевые исследования демпфированного конденсационного гигрометра с управляемой динамической характеристикой подтверждают вышеизложенные выводы по способу управления ДХ образцового СИ и методике оценки качества сличений СИ влажности при различных законах изменения этой величины. Методика и гигрометр были использованы при полевых испытаниях гигрометра с сорбционно-резистивным влажочувствительным элементом.

Помимо рассмотренных и оцененных факторов, воздействующих на корректность результатов сличений в условиях открытой атмосферы, необходимо отметить особенность такой операции, проводимой внутри психрометрической будки при ослабленной естественной вентиляции. В этом случае даже если сравниваются два однотипных и не отличающихся по метрологическим свойствам экземпляра СИ (температуры или влажности), на результатах сказываются параметры явления выравнивания /8/ соответственно температуры воздуха и концентрации водяного пара.

В работах (например, /12/), посвященных динамическим (фильтрующим) свойствам психрометрической будки, этот вопрос не рассмотрен, поскольку в них не обсуждается задача сличений.

При скачкообразном изменении во времени упомянутых величин конечность скорости выравнивания создает эффект, аналогичный транспортному запаздыванию. Глубина проникновения к моменту времени t фронта скачка температуры

$$L_T = \sqrt{\chi t}, \quad (20)$$

где χ — температуропроводность воздуха, а глубина проникновения фронта скачка концентрации водяного пара

$$L_c = \sqrt{\mu t}, \quad (21)$$

где μ — коэффициент диффузии водяного пара в воздухе.

В общем случае изменения метеорологической величины как случайного процесса в условиях ослабленной вентиляции оказывается, что поле этой величины внутри будки деформируется. Это происходит из-за того, что глубина проникновения колебаний зависит не только от χ и μ , но и от частот спектральных составляющих процесса. Так, глубина проникновения L_T синусоидальных колебаний температуры с частотой ω

$$L_T = \chi^{0,5} \omega^{-0,5}, \quad (22)$$

а глубина проникновения L_c колебаний концентрации водяного пара с частотой ω

$$L_c = 0,5 \omega^{-0,5} \quad (23)$$

Например, при периоде колебаний 50 секунд и $\mu = 0,023 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ $L_c = 0,02 \text{ м}$. Поэтому при штиле или малых скоростях переноса (ветра) изменения температуры и влажности наружного воздуха сказываются лишь в тонком пристеночном слое внутри психрометрической будки. Следовательно, если одно из идентичных по точностным и динамическим характеристикам СИ (температуры или влажности) расположено ближе к центру психрометрической будки, а другое — ближе к стенке ее, то их показания в один и тот же момент времени будут различаться.

Оценим разность показаний, если влагочувствительный элемент одного из СИ находится на расстоянии 6 см от стенки будки, а другой — на расстоянии 2 см от нее. Тогда, как нетрудно убедиться, обращаясь к формуле (23), все колебания влажности вне будки с периодом более 20 минут будут доходить до каждого из этих приборов. Если же в спектре присутствуют, например, колебания с периодом 10 минут (и с амплитудой 3 % относительной влажности) и 1 минута (с амплитудой 1 %), то они будут воздействовать только на СИ, расположенное у стенки. Поскольку может оказаться, что измерения, сличаемыми приборами, будут произведены в момент времени, когда указанные колебания находятся в одной фазе, то разность результатов наблюдений при сличениях способна достигнуть значения 4 % относительной влажности.

Рассмотренный пример указывает на необходимость принятия дополнительных мер при этих условиях сличений СИ в динамическом режиме. Наилучшим решением явилось бы снабжение психрометрической будки средством ее принудительной вентиляции, что в конечном итоге приводит и к стабилизации ее фильтрующих свойств.

Выполненный анализ точности методики натуральных сличений СИ в динамическом режиме приводит к следующим выводам:

— точность таких сличений поддается расчетной оценке с использованием выведенных формул;

— в качестве доступных средств управления динамической характеристикой одного из сличаемых СИ влажности может быть использован демпфер;

— в динамическом отношении демпфер для гигрометра является аperiодическим звеном первого порядка;

— рассмотренные средства управления динамической характеристикой одного из сличаемых СИ и методика выполнения сличений в динамическом режиме позволяют обеспечить необходимую точность результатов натуральных сличений;

— при ослабленной естественной вентиляции психрометрической будки погрешность сличений расположенных в ней даже идентичных по метрологическим свойствам СИ может достигать недопустимых значений, в связи с чем в этих случаях необходима принудительная вентиляция.

Проведенный анализ призван содействовать корректности метрологического контроля СИ метеорологического назначения в условиях их применения, при натурных испытаниях новых СИ, а также в комплексных международных метеорологических экспериментах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азизов А. М., Гордов А. Н. Точность измерительных преобразователей. — Л.: Энергия, 1975. — 253 с.
2. Воронов А. А. Основы теории автоматического регулирования. — М.: Наука, 1965. — 369 с.
3. Грановский В. А., Конопелько Л. А., Этингер Ю. С. Нормирование и определение динамических погрешностей приборов контроля атмосферы. — Измерительная техника, 1977, № 9, с. 75—77.
4. ГОСТ 8.256—77. ГСИ. Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых средств измерений. — М.: Изд-во стандартов, 1978. — 9 с.
5. ГОСТ 16263—70. ГСИ. Метеорология. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1972. — 53 с.
6. Земельман М. А. Методический материал по применению ГОСТ 8.009—72. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. — М.: Изд-во стандартов, 1975. — 78 с.
7. Кавалеров Г. И., Мандельштам С. М., Солопченко Г. Н., Хрумало В. М. Основные вопросы оценки динамических погрешностей измерений. — Приборостроение и автоматический контроль, 1978, № 1, с. 19—61.
8. Ландау Л. Д., Ахиезер А. И., Лившиц Е. М. Курс общей физики. — М.: Наука, 1969. — 400 с.
9. Резников Г. П., Рогалев Ю. В. Адаптивная система поверки средств измерения метеорологических элементов. — Труды ГГО, 1978, вып. 414, с. 95—105.
10. Резников Г. П. Анализ физических процессов и погрешностей гигрометрического комплекса, основанного на термодинамическом принципе. — Труды ГГО, 1973, вып. 300, с. 13—39.
11. Резников Г. П., Рогалев Ю. В. Исследования по обоснованию возможности поверки автоматических метеорологических станций в естественных условиях методом непосредственного сличения (по каналу влажности и температуры). — Труды ГГО, 1977, вып. 392, с. 72—83.
12. Рождественский Б. Г., Мануйлов К. Н. Частотные характеристики метеорологической сетевой термометрической установки. — В кн.: Информационные материалы по гидрометеорологическим приборам и методам наблюдений. — М., Гидрометеиздат, 1972, вып. 49, с. 12—17.
13. Шендерович И. М. Анализ динамических характеристик метеорологических датчиков. — Труды НИИГМП, 1973, вып. 29, с. 79—88.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ИЗ-ЗА ЗАДЕРЖЕК В ПОЛУЧЕНИИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ В АЭРОПОРТАХ ВЫЛЕТА

Задержки в получении метеорологической информации метеорологическим подразделением аэропорта ведут к задержке представления необходимых данных органам управления воздушным движением (УВД). Это влечет за собой задержку рейсов воздушных судов (ВС). Задержка рейсов ВС выливается в материальные потери отдельного авиапредприятия и Министерства гражданской авиации (МГА) в целом.

Очевидно, что время задержки рейсов ВС ($t_{зр}$) по метеорологическим условиям находится в определенной зависимости от времени задержки поступления метеорологической информации ($t_{зн}$), т. е. $t_{зр} = P t_{зн}$, где P — коэффициент пропорциональности.

Время задержки информации в системе метеорологического обеспечения органов УВД — величина случайная, обусловленная влиянием большого числа случайных факторов. Эти факторы можно подразделить на две группы. Одна группа связана с работой метеоспециалистов, другая определяется характеристиками каналов связи. К первой группе факторов относятся различная скорость съема метеорологических параметров и их интерпретации различными метеоспециалистами при неавтоматизированных методах измерений, различное время составления метеорологических сообщений и ввода их в каналы связи и т. п. Вторая группа факторов включает отказы каналов связи, их загруженность, необходимость блокирования и др.

Сказанное выше позволяет утверждать, что материальные потери ($\hat{P}_{зр}$) от задержек рейсов по метеорологическим условиям на случайное время $\hat{t}_{зр}$ являются также величиной случайной, которая связана с временем задержки получения метеорологических сообщений функциональной зависимостью вида

$$\hat{P}_{зр} = K \hat{t}_{зр} = K P \hat{t}_{зн}, \quad (1)$$

где $\hat{P}_{зр}$, $\hat{t}_{зр}$, $\hat{t}_{зн}$ — случайные величины, K — оператор связи случайных величин.

Из математического анализа известно, если функция $y(x)$ отвечает определенным условиям, то законы распределения случайных величин \hat{x} и \hat{y} могут быть заданы в виде плотностей распределения $I_{\hat{x}}(x)$ и $I_{\hat{y}}(y)$, при этом

$$I_{\hat{y}}(y) dy = I_{\hat{x}}(x) dx. \quad (2)$$

Геометрически это означает, что площади под кривыми $I_{\hat{x}}(x)$ и $I_{\hat{y}}(y)$, заштрихованные на рис. 1, должны быть равны между собой. Рис. 1 отображает связь между плотностями распределения прямой $y(x)$ и обратной

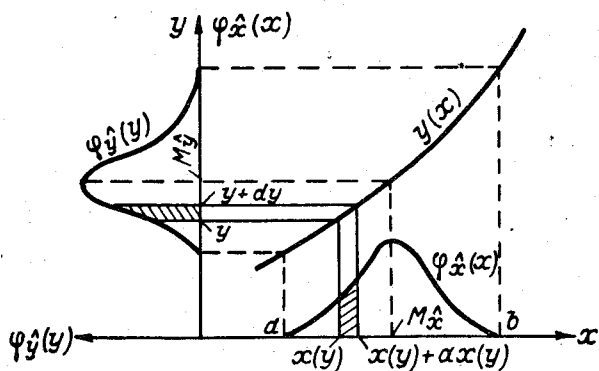


Рис. 1.

$x(y)$ функций.

В общем виде зависимость плотностей распределения прямой и обратной функций определяется следующим соотношением [1]:

$$I_{\hat{y}}(y) = I_x[x(y)] |x'(y)|. \quad (3)$$

Пусть, например, задана случайная функция $\hat{y} = ax$ и случайная величина x подчинена нормальному закону распределения с параметрами M_x и σ_x^2 , т. е.

$$I_x(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x - M_x)^2}{2\sigma_x^2}}. \quad (4)$$

Необходимо найти плотность распределения функции \hat{y} .

Так как $y = ax$, $x = y/a$, $|x'(y)| = 1/|a|$, то в соответствии с (3)

$$I_{\hat{y}}(y) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y/a - M_x)^2}{2\sigma_x^2}} \frac{1}{|a|}. \quad (5)$$

Преобразуя (5), получим

$$I_{\hat{y}}(y) = \frac{1}{\sigma_{\hat{y}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y - M_{\hat{y}})^2}{2\sigma_{\hat{y}}^2}}, \quad (6)$$

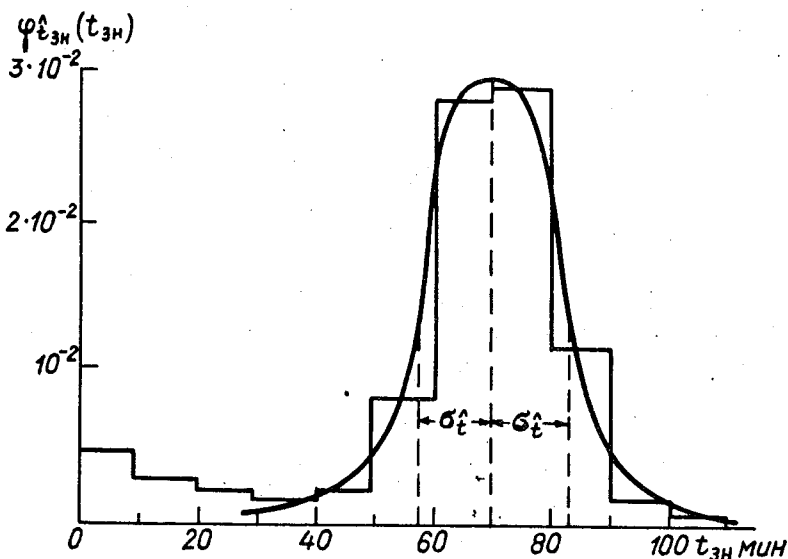


Рис. 2.

где $\sigma_{\hat{y}} = |a| \sigma_x$, $M_{\hat{y}} = a M_x$.

Таким образом, вид законов распределения случайных величин x и y будет одинаков, однако параметры M и σ этих законов различны.

Для практического решения уравнения (1) необходимо найти закон распределения случайной величины \hat{t}_{3H} , а также определить коэффициент K .

Для нахождения закона распределения \hat{t}_{3H} была произведена статистическая обработка данных по задержкам метеорологических сообщений. На рис. 2 приведена гистограмма распределения времени задержки метеорологических сообщений, поступающих в аэропорты по каналам СПАС.

Из приведенного рисунка видно, что гистограмма с достаточной для практического использования точностью может быть аппроксимирована кривой, соответствующей нормальному закону распределения, описываемому соотношением (4), с параметрами $M_{\hat{t}_{3H}} = 70$ мин, $\sigma_{\hat{t}_{3H}} = 14$ мин.

Коэффициент K в (1) может быть определен исходя из следующих соображений.

В каждом аэропорту эксплуатируется несколько (M) типов ВС. Задержка вылета ВС каждого (m) типа на время \hat{t}_{3P} вызывает определенную долю экономических потерь. Если обозначить C_{om} — стоимость единицы времени задержки рейса ВС m -го типа, n_m — число ВС m -го типа, задержанных на время \hat{t}_{3P} , то функцию (1) можно записать в виде

$$\hat{P}_{3\Sigma} = \sum_{m=1}^M C_{om} n_m P_{\hat{t}_{3H}} \quad (7)$$

Из сравнения (1) и (7) следует, что коэффициент К в (1) равен $K = \sum_m^M C_{om} n_m$.

Используя соотношения (1) и (3-7), получим аналитические выражения плотности и функции распределения величины экономических потерь из-за задержек рейсов в зависимости от времени задержки поступления метеорологической информации в аэропорт вылета. Они имеют вид

$$I_{\Pi_{3\Sigma}}^{\Lambda}(\Pi_{3\Sigma}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \alpha_{t_{3m}}^{\Lambda} \sum_m C_{om} n_m} e^{-\frac{(Pt_{3m} \sum_m C_{om} n_m - Mt_{3m}^{\Lambda} \sum_m C_{om} n_m)^2}{2(\alpha_{t_{3m}}^{\Lambda} \sum_m C_{om} n_m)^2}}, \quad (8)$$

$$F_{\Pi_{3\Sigma}}^{\Lambda}(\Pi_{3\Sigma}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \alpha_{t_{3m}}^{\Lambda} \sum_m C_{om} n_m} e^{-\frac{(Pt_{3m} \sum_m C_{om} n_m - Mt_{3m}^{\Lambda} \sum_m C_{om} n_m)^2}{2(\alpha_{t_{3m}}^{\Lambda} \sum_m C_{om} n_m)^2}} d\Pi_{3\Sigma}. \quad (9)$$

Значения величин C_{om} , n_m , P в (7-9) могут быть получены из соответствующих источников, например путем анализа диспетчерских материалов и материалов метеорологических подразделений аэропортов.

Рассмотрим пример оценки экономических потерь из-за задержки поступления метеорологической информации в аэропорт вылета.

В таблице 1, взятой из [2], приведены приближенные значения величины потерь от задержки рейсов основных типов ВС на одну минуту.

Таблица 1

№ п/п	Тип (m) воздушного судна	Ущерб (C_{om}): от задержки вылета на одну минуту (руб)		№ п/п	Тип (m) воздушного судна	Ущерб (C_{om}): от задержки вылета на одну минуту (руб)	
1	Ил-62	6,5		6	Ту-124	1,7	
2	Ту-154	5,3		7	Як-40	1,6	
3	Ил-18	4,8		8	Ан-24	1,5	
4	Ту-104	4,0		9	Ан-2	0,7	
5	Ту-134	2,5					

Обычно оцениваются годовые потери. Предположим, что среднее годовое число задержек рейсов по метеорологическим условиям в аэропорту с достаточно высокой интенсивностью движения равно 1800, при этом по основным типам ВС число задержек составляет: $n_1^{\text{Ил-62}} = 30$, $n_2^{\text{Ил-18}} =$

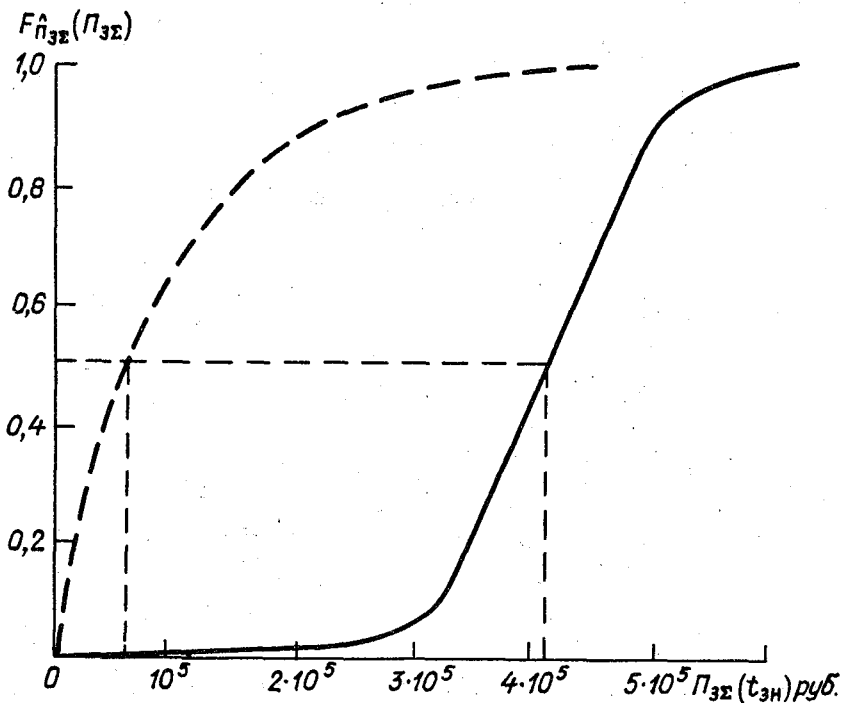


Рис. 3.

$$= 70, n_3^{Ty-154} = 570, n_4^{Ty-134} = 760, n_5^{Як-40} = 150, n_6^{Ан-24} = 220.$$

Предположим далее, что время задержки рейса равно времени задержки получения метеорологической информации, т. е. $P=1, t_{зр} = t_{3н}$.

При использовании приведенных выше в качестве примера данных в соответствии с (9) был построен график функции распределения материальных потерь, терпимых аэропортом вылета из-за задержек рейсов, вызванных задержками метеорологической информации. Этот график приведен на рис. 3 (сплошная линия). Из графика следует, что при принятых исходных данных средний годовой ущерб, наносимый задержками метеорологических сообщений, составляет 420 тыс. руб. и может достигать величины 600 тыс. руб.

Представляет интерес вопрос о влиянии автоматизации процесса обмена информацией на возможность сокращения материальных потерь.

Как известно, в последние годы для обмена информацией в целях УВД Министерство гражданской авиации начинает использовать автоматизированные каналы связи с центрами коммутации сообщений (ЦКС). В некоторых аэропортах (например, Пулково) через ЦКС проходит также и часть метеорологических сообщений.

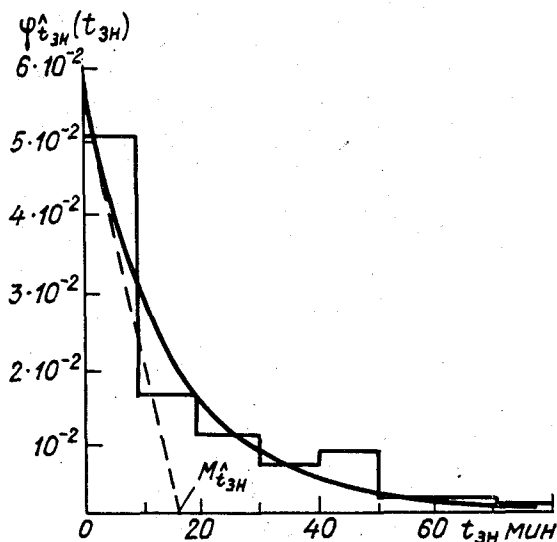


Рис. 4.

На рис. 4 приведена гистограмма распределения времени задержки метеорологической информации, построенная по результатам статистической обработки данных о прохождении метеорологических сообщений через ЦКС. Из рисунка видно, что это распределение с достаточной для практических целей точностью может быть описано аналитическим выражением, соответствующим экспоненциальному закону, т. е.

$$I_{t_{3H}}^{\wedge}(t_{3H}) = e^{-\lambda t_{3H}}. \quad (10)$$

Для данного случая параметры этого закона оказываются равными: $M_{t_{3H}}^{\wedge} = 17$ мин, $\lambda = 1/M_{t_{3H}}^{\wedge} ; 0,06$.

При использовании тех же исходных данных, что и в предыдущем примере, была построена функция распределения материальных потерь из-за задержек рейсов ВС, вызванных задержками метеорологических сообщений при передаче их по каналам МГА (пунктирная линия на рис. 3).

Из сравнения кривых рис. 3 следует, что при равных вероятностях потерь даже частичная автоматизация процесса обмена метеорологической информацией дает возможность значительно сократить величину материального ущерба из-за задержек ВС по метеорологическим условиям.

В заключение отметим, что предложенный подход может быть использован для экономического анализа воздушных перевозок и выработки рекомендаций по совершенствованию систем их обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иоффе А. Я., Марков В. М., Петухов Г. Б., Юсупов Р. М. Вероятностные методы в прикладной кибернетике. Учебное пособие. — Л.: ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1976. — 424 с.
2. Методические рекомендации по оценке экономической эффективности авиационных прогнозов погоды. — Алма-Ата: изд. КазНИГМИ, 1978. — 15 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Э. Г. Богданова. Состояние и перспективы получения информации об интенсивности осадков на сети гидрометеорологических станций	3
А. В. Завьялова, В. С. Копычева, Т. П. Светлова. О выборе алгоритма для задачи контроля и восстановления режимной информации по срокам	8
А. В. Завьялова. Исследование эффективности контроля и восстановления ежедневных значений температуры воздуха по срокам методом временной интерполяции	21
С. М. Персин, Л. В. Анискин, А. А. Боровиков. О сверхкраткосрочном прогнозе метеорологических элементов	29
Л. Ф. Школяр, Г. Ф. Ивлева, Л. Н. Щербакова. Об измерении больших скоростей ветра анеморумбометром М-63М и флюгером с тяжелой доской	44
Е. А. Федорова. Особенности обработки данных автоматических радиометеорологических станций АРМС М-107	49
В. Е. Карпуша, Р. А. Круглов, М. С. Стернзат. Промышленный образец импульсного фотометра ФИ-1	56
Е. И. Плешкова, <u>Н. Г. Протопопов.</u> Оценка погрешности анемометра для измерения составляющих вектора скорости ветра	62
Л. В. Анискин, Т. А. Поляченко. Приведение давления к условиям стандартной атмосферы автоматическими метеорологическими станциями	70
Н. А. Плешкова, Е. В. Романов, В. В. Фомишкин. Сoglусующее устройство триангуляционного облакомера М-105 и КРАМС-М.	74
Л. П. Афиногенов, С. В. Кузьминов, Б. Н. Молчанов. О построении запоминающего устройства автоматических метеорологических станций	80
С. М. Стернзат, И. Б. Фогельсон. Измерение влажности почвы компенсационным способом	92
Г. П. Резников. Анализ точности методики натуральных сличений средств измерения влажности воздуха в динамическом режиме	98
В. В. Изюмский, Л. В. Патрикеев. Статистическая оценка экономических потерь из-за задержек в получении метеорологических данных в аэропортах выпета	109