

УДК 551.501.81

## АЛГОРИТМ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ О ПРОФИЛЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В РАЙОНЕ АЭРОДРОМА

**Болелов Э.А., д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Техническая эксплуатация радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта» МГТУ ГА, e-mail: edbolelov@mail.ru**

**Васильев О.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Техническая эксплуатация радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта» МГТУ ГА, e-mail: vas\_ov@mail.ru**

**Галаева К.И., к.т.н., старший преподаватель кафедры «Техническая эксплуатация радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта» МГТУ ГА, e-mail: ks.galaeva@mail.ru**

**Бояренко Э.С., аспирантка кафедры «Техническая эксплуатация радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта» МГТУ ГА, e-mail: boyarenko.elvira@mail.ru**

### AN ALGORITHM FOR COMPLEX PROCESSING OF INFORMATION ABOUT THE TEMPERATURE PROFILE IN THE AIRFIELD AREA

**Bolelov E.A., Vasiliev O.V., Galaeva K.I., Boyarenko E.C.**

This article presents mathematical models of the output data of temperature profile meters in the airfield area and an algorithm for complex processing of temperature profile information. Reliable information about the temperature profile in the airfield area is extremely important for ensuring the safety of aircraft flights, forecasting dangerous weather events in the airfield area, in particular, icing, fog, temperature inversion. In addition, reliable measurements of the temperature profile ensure that the value of the zero isotherm is determined in the output to the meteorological radar complex "Monocle" to identify the degree of danger of meteorological formations. Existing temperature meters at the airfield either do not have sufficient measurement accuracy and may miss emerging temperature profile anomalies or do not measure the temperature profile, but measure the air temperature at the earth's surface. Using an integrated approach to assessing the temperature profile in conjunction with the use of a promising radiosonding system based on unmanned systems, it is possible to achieve the required accuracy of measuring the temperature profile in the airfield area. The basis for solving the problem of developing an algorithm for complex processing of information about the temperature profile are the methods of the Markov theory of optimal aggregation. The article provides an assessment of the quality of the obtained algorithm for complex processing of information about the temperature profile.

**Key words:** data of temperature profile, algorithm for complex processing, safety of aircraft flights, temperature inversion, the methods of the Markov theory of optimal aggregation.

**Ключевые слова:** профиль температуры, комплексная обработка информации, температурная инверсия, температурный профилемер, аэродромная система радиозондирования атмосферы, марковская теория оптимального комплексирования.

#### Обоснование актуальности

Информация о профиле температуры в районе аэродрома является крайне важной при разработке прогнозов опасных метеообъявлений, выявления аномалий профиля температур, что в свою очередь позволяет обеспечить безопасность полетов воздушных судов [1, 2]. Рассмотрим наиболее характерные применения данных о профиле температуры.

Прогноз зон обледенения требует информации о профиле температуры  $T(h)$  и влажности  $RH(h)$ . На основании этой информации определяется диапазон высот, в которых выполняются критерии обледенения. Практикой установлено, что при обледенении температура воздуха, окружающего воздушное судно (ВС), по своим значениям обычно ниже нуля и равна или ниже температуры насыщения над

Приведены математические модели выходных данных измерителей профиля температуры в районе аэродрома и алгоритм комплексной обработки информации о профиле температуры. Достоверная информация о профиле температуры в районе аэродрома является крайне важной для обеспечения безопасности полетов воздушных судов, прогноза опасных метеообъявлений в районе аэродрома, в частности, обледенения, тумана, температурной инверсии. Кроме этого, достоверные измерения профиля температуры обеспечивают выдачу в метеорологический радиолокационный комплекс «Монокль» значения нулевой изотермы для идентификации степени опасности метеообразований. Существующие измерители температуры на аэродроме или не обладают достаточной точностью измерений и могут пропускать возникающие аномалии профиля температуры, или не проводят измерения профиля температуры, а измеряют температуру воздуха у поверхности земли. Используя комплексный подход к оценке профиля температуры совместно с применением перспективной системы радиозондирования на основе беспилотных систем, можно добиться требуемой точности измерения профиля температуры в районе аэродрома. Основой решения задачи разработки алгоритма комплексной обработки информации о профиле температуры являются методы марковской теории оптимального комплексирования. В статье приведена оценка качества полученного алгоритма комплексной обработки информации о профиле температуры.

льдом ( $T_{hl}$ ), которая определяется по формуле (1):

$$T_{hl} = -8(T - T_d), \quad (1)$$

где  $(T - T_d)$  – дефицит точки росы на высоте полета ВС.

Облачный слой, где  $T < 0$  и одновременно  $T < T_{hl}$ , является слоем возможного обледенения.

Задача прогнозирования туманов также требует информации о профиле температуры. Для взлетающих ВС и ВС, выполняющих заход на посадку и посадку, особую опасность представляют радиационные туманы, образующиеся над поверхностью аэродрома. Такие туманы чаще всего возникают над сушей, а также могут наблюдаться над районами сплошных льдов. Возникновение радиационных туманов происходит при ясном небе и небольшом (до 2 м/с) ветре [3]. Прогнозирование туманов производится по информации о профиле температуры  $T(h)$  и ее градиенте  $dT(h)$ , влажности  $RH(h=0)$  и скорости ветра  $U(h=0)$  в приземном слое.

Опасность для ВС представляют температурные инверсии и наличие сверхдиабатического профиля температуры в приземном слое. Эти явления, при условии их скрытого от экипажа ВС характере, создают фактор опасности для безопасности полета.

Температурная инверсия представляет опасность как для взлетающих ВС, так и для ВС, совершающих посадку. При попадании ВС в слой более теплого воздуха снижается тяга двигателей и, следовательно, падает вертикальная скорость, следствием чего будет снижение высоты полета ВС, а в условиях малых высот на взлете или посадке это может привести к катастрофическим последствиям (см. рис. 1 и рис. 2).

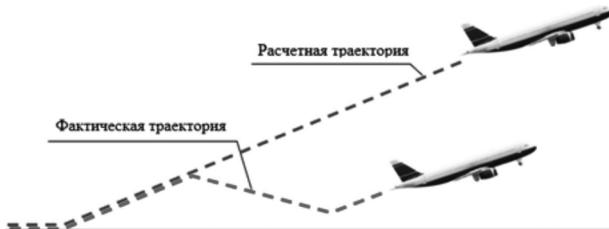


Рис. 1. Влияние температурной инверсии на траекторию взлета ВС

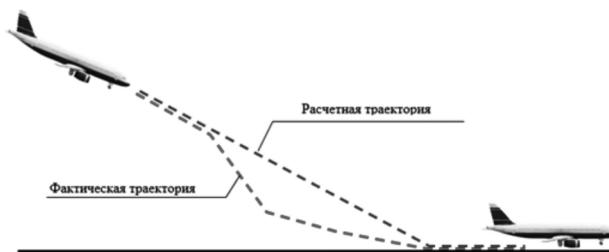


Рис. 2. Влияние температурной инверсии на траекторию посадки ВС

Достоверная информация о профиле температуры в районе аэродрома крайне важна для определения высоты нулевой изотермы. Положение нулевой изотермы является необходимой исходной информацией в радиолокационных метеосистемах, к которым относится метеорологический радиолокационный комплекс «Монокль», для уточнения структуры облачных образова-

ний и идентификации степени их опасности [4].

В настоящее время для измерения профиля температуры на аэродроме используется температурный профиллер (ТП) типа МТП-5. ТП обеспечивает измерение профиля температуры до высоты 1000 м в районе аэродрома и является оперативным средством получения информации о температуре на этих высотах. ТП обладает существенным недостатком, который связан с необходимостью проведения его калибровки. Отсутствие калибровки или недостаточная частота ее проведения может привести к тому, что измеренный профиль температуры будет иметь существенные отклонения от реальных значений температуры на высотах и может оказаться не пригодным для прогнозирования опасных метеоявлений и профиля температуры в районе аэродрома. В [5] предлагается для обеспечения калибровки использовать измеренные данные о температуре окружающей среды от аэродромной метеорологической станции (АМС)  $T_{AMC}(h=0)$ . На основании этой информации ТП производит сравнение собственных измерений температуры  $T_{TP}(h=0)$  и измерений температуры от АМС  $T_{AMC}(h=0)$ . Вычисленную разницу предлагается использовать для корректировки весовых коэффициентов, используемых в ТП при вычислении профиля температуры. Вместе с тем, такой способ калибровки имеет существенный недостаток, т.к. он не обеспечивает калибровку по всему измеренному профилю температуры.

В качестве системы альтернативной ТП можно использовать систему радиозондирования атмосферы, основу которой должен составлять беспилотный летательный аппарат (БЛА) [6-9]. Установленные на БЛА датчики температуры и влажности непосредственно контактируют с воздушными массами и передают на наземную станцию данные о профиле температуры и влажности. Такая аэродромная система радиозондирования (АСРЗ) может обеспечивать профили температуры до высоты 1000 м с высокой точностью. Однако, АСРЗ не является оперативным средством получения информации о профиле температуры.

Таким образом, для получения достоверной информации о профиле температуры необходимо использовать комплексную обработку информации (КОИ) на основе данных от ТП и АСРЗ (рис. 3).

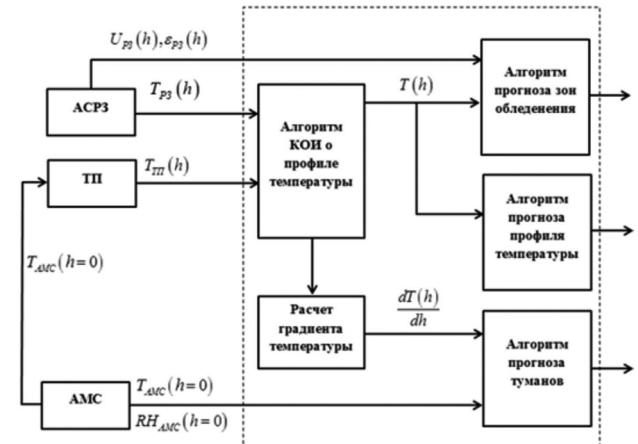


Рис. 3. Структура системы комплексной обработки информации о профиле температуры

Использование комплексной обработки информации от ТП и АСРЗ оправдано еще и тем, что в АСРЗ реализован контактный метод измерения температуры, а в ТП – дистанционный, следовательно, можно ожидать пользу от комплексирования этих систем [7]. Кроме этого, АСРЗ способен обеспечить качественную калибровку ТП по всему измеряемому профилю температуры.

### Постановка задачи и синтез алгоритма комплексной обработки информации о профиле температуры в районе аэродрома

В работах Решетова В.Д., Борисенко М.М. [10-11] приводятся результаты исследования пространственно-временной изменчивости метеопараметров атмосферы. В частности, показано, что изменчивость температуры в горизонтальной плоскости  $T(x, y)$  имеет достаточно небольшие значения и даже в мезомасштабе хорошо описывается простыми моделями. Эти выводы также подтверждаются серией экспериментов по исследованию изменчивости профиля температуры и разности высот нулевой изотермы по данным двух МТП-5, проведенных АО «Концерн «МАНС» на аэродроме Орловка в Тверской области. Основные результаты исследований приведены в [12-13]. Изменение температуры с высотой существенно, а вертикальный градиент температуры  $\frac{dT(h)}{dh}$  может достигать достаточно больших значений.

ТП измеряет профиль температуры угломестным способом последовательно во времени по высотам зондирования от 0 до 1000 м. Значения температуры выдаются в фиксированные моменты времени, при этом дискретность выдачи значений профиля температуры для высот от 0 м до 100 м составляет 25 м, а в диапазоне высот от 100 м до 1000 м – 50 м. Интервал выдачи значений профиля температуры составляет 75 сек. В АСРЗ измерение профиля температуры осуществляется последовательно во времени путем подъема БЛА на заданную высоту зондирования. АСРЗ может обеспечивать выдачу значений профиля температуры с интервалом от 2 сек и выше [14]. В дальнейшем для определенности будем полагать, что высота зондирования ТП и АСРЗ составляет 1000 м.

Синтез алгоритма комплексной обработки информации о профиле температуры (АКОИ ПТ) по данным ТП и АСРЗ предполагает описание статистической динамики  $T(t_k)$ . Математическая модель динамики  $T(t_k)$  может быть получена на основании статистической обработки измеренных профилей температуры за достаточно длительный период. Кроме этого, следует учитывать географическое расположение аэродрома. В данной задаче такой подход представляется не вполне продуктивным, так как корректное описание динамики изменения профиля температуры с учетом разнообразных факторов, как правило, приводит к весьма сложным математическим моделям. В связи с этим, синтез АКОИ ПТ может быть выполнен на основе метода распределения информации. Этот метод позволяет сократить размерность вектора состояния и, тем самым, уменьшить объем вычислений АКОИ ПТ [15].

Суть метода заключается в следующем. Пусть имеется некоторая совокупность переменных, значения

которых определяются в результате измерений. Измерения переменных проводятся с определенной, причем различной, точностью. В рамках решения конкретной задачи синтеза алгоритмов КОИ существует принципиальная возможность (это зависит от воли исследователя) часть переменных отнести к вектору наблюдения, а часть переменных (точность измерения которых существенно выше) к вектору известных функций времени, входящему в уравнение динамики вектора состояния. Эта возможность и порождает метод распределения информации.

Кроме этого, в постановке задачи синтеза АКОИ ПТ необходимо учесть то обстоятельство, что измерения профиля температуры АСРЗ проводятся с более высокой частотой, чем измерения ТП. Поэтому целесообразно использовать метод накопления информации, заключающийся в том, что можно накопить результаты  $N$  измерений АСРЗ и обрабатывать их в моменты времени  $t_k$ , тем более, что приращение информации за счет обработки результата одного измерения будет незначительным.

Действительное значение температуры может быть представлено как:

$$T(t_k) = T_{CA}(t_k) + \Delta T(t_k), \quad (2)$$

где:  $T_{CA}(t_k)$  – значение температуры для стандартной атмосферы (СА);  $\Delta T(t_k)$  – неизвестные случайные отклонения температуры от значения  $T_{CA}(t_k)$ . В (2) показана временная зависимость профиля температуры. Переход к временной зависимости объясняется тем, что измерения профиля температуры  $T(h)$  производится последовательно по высотам в течение заданного времени зондирования  $[t_0, t_3]$ .

Уравнение, описывающее динамику изменения  $\Delta T(t_k)$  можно записать в виде:

$$\Delta T(t_{k+1}) = \Delta T(t_k) + \Delta t \sum_{l=0}^{N-1} \frac{\Delta T(t_{l+1}) - \Delta T(t_{l-1})}{2\tau}, \quad (3)$$

где:  $\Delta T(t_k) = T(t_k) - T_{CA}$ ;  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ ,  $t_k \in [t_0, t_3]$ ;

$$\tau = t_{l+1} - t_l, \quad t_l \in [t_k, t_{k+1}], \quad N = \frac{\Delta t}{\tau}.$$

Математическая модель измерения профиля температуры ТП может быть представлена выражением:

$$T_{TP}(t_k) = T_{CA} + \Delta T(t_k) + \varepsilon_{TP}(t_k), \quad (4)$$

где:  $\varepsilon_{TP}(t_k)$  – ошибка измерения ТП.

Входящую в выражение (4) ошибку измерения температуры можно описать математической моделью:

$$\varepsilon_{TP}(t_k) = a_\varepsilon \varepsilon_{TP}(t_{k-1}) + b_\varepsilon n_{TP}(t_{k-1}), \quad \varepsilon_{TP}(t_0) = \varepsilon_{TP0}, \quad (5)$$

где:  $a_\varepsilon$  – коэффициент, определяемый постоянной времени измерителя;  $b_\varepsilon$  – коэффициент, определяемый значением стационарной дисперсии погрешности измерителя;  $n_{TP}(t_k)$  – случайная гауссовская величина с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией.

В соответствии с методом накопления информации к моменту проведения очередных наблюдений ТП вычис-

ляются значения  $T_{P3}(t_l)$  в моменты времени  $t_l \in [t_k, t_{k+1}]$ . Измерения АСРЗ отнесем к вектору известных функций времени, входящих в уравнение динамики вектора состояния. С практической точки зрения это вполне оправдано, т.к. точность измерения температуры контактным методом существенно выше точности измерения дистанционным методом. Тогда уравнение (3) может быть записано в виде:

$$\Delta T(t_{k+1}) = \Delta T(t_k) + \Delta t \sum_{l=0}^{N-1} \frac{\Delta T_{P3}(t_{l+1}) - \Delta T_{P3}(t_{l-1})}{2\tau}, \quad (6)$$

Измерение (4) с учетом (6) может быть представлено в виде:

$$\Delta T_{TP}(t_k) = \Delta T(t_k) + \Delta t \sum_{l=0}^{N-1} \frac{\Delta T_{P3}(t_{l+1}) - \Delta T_{P3}(t_{l-1})}{2\tau} + \quad (7)$$

$$+ a_\varepsilon \varepsilon_{TP}(t_{k-1}) + b_\varepsilon n_{TP}(t_{k-1}),$$

где:  $\Delta T_{TP}(t_k) = T_{TP}(t_k) - T_{CA}$ .

В рассматриваемой задаче с учетом (2)-(7) вектор состояния включает в себя следующие компоненты:

$$\mathbf{X}(t_k) = [\Delta T(t_k) \quad \varepsilon_{TP}(t_k)]^T, \quad (8)$$

а вектор наблюдения

$$\mathbf{Z}(t_k) = [\Delta T_{TP}(t_k)], \quad (9)$$

т.е. вектор наблюдения является скалярной величиной.

Динамика изменения компонент вектора состояния описывается уравнением:

$$\mathbf{X}(t_{k+1}) = \Phi_{xx}\mathbf{X}(t_k) + \Phi_{xz} + \Gamma_x \mathbf{N}(t_k), \quad \mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0, \quad (10)$$

где ненулевые элементы матриц имеют значения:

$$\Phi_{xx}(1,1) = 1, \quad \Phi_{xx}(2,2) = a_\varepsilon,$$

$$\Phi_{xz}(1,1) = \Delta t \sum_{l=0}^{N-1} \frac{\Delta T_{P3}(t_{l+1}) - \Delta T_{P3}(t_{l-1})}{2\tau}, \quad \Gamma_x(2,1) = b_\varepsilon;$$

$$\mathbf{N}(t_k) = [n_{TP}(t_k)].$$

Уравнение наблюдения (9) в векторно-матричном виде имеет вид:

$$\mathbf{Z}(t_k) = \Delta T_{TP}(t_k) = \Phi_{zx}\mathbf{X}(t_k) + \Phi_{zz} + \Gamma_z \mathbf{N}(t_k), \quad (11)$$

где ненулевые элементы матриц имеют значения:

$$\Phi_{zx}(1,1) = 1, \quad \Phi_{zx}(1,2) = a_\varepsilon,$$

$$\Phi_{zz} = \Delta t \sum_{l=0}^{N-1} \frac{\Delta T_{P3}(t_{l+1}) - \Delta T_{P3}(t_{l-1})}{2\tau}, \quad \Gamma_z = b_\varepsilon.$$

Приведенные соотношения полностью определяют модели векторов состояния и наблюдения.

Таким образом, располагая априорными сведениями об изменении во времени компонент вектора состояния (10) и располагая наблюдением (11), требуется определить наилучшую оценку вектора состояния  $\mathbf{X}^*(t_k)$ , которая должна удовлетворять критерию минимума апостериорного среднего риска при квадратичной функции потерь [15]:

$$\mathbf{X}^* = \tilde{\mathbf{X}} : \min_{[\tilde{\mathbf{X}}]} \left\{ \int c(\mathbf{X}, \tilde{\mathbf{X}}) p(k, \mathbf{X} | \mathbf{Z}_0^k) d\mathbf{X} \right\}, \quad (12)$$

где:  $c(\mathbf{X}, \tilde{\mathbf{X}})$  – функция потерь;  $p(k, \mathbf{X} | \mathbf{Z}_0^k)$  – апостериорная плотность вероятности процесса  $\mathbf{X}_k$ ;  $\tilde{\mathbf{X}}$  – оцен-

ка;  $\mathbf{Z}_0^k$  – вектор.

В соответствии [15], для АКОИ ПТ справедливо уравнение:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}^*(t_{k+1}) &= \Phi_{xx}\mathbf{X}^*(t_k) + \Phi_{xz} + \\ &+ \mathbf{K}(t_{k+1}) [\Delta T_{TP}(t_{k+1}) - \Phi_{zx}\mathbf{X}^*(t_k) - \Phi_{zz}]; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\mathbf{K}(t_{k+1}) = [\Phi_{xx}\mathbf{R}(t_k)\Phi_{zx}^T + \mathbf{B}_{xz}] [\Phi_{zx}\mathbf{R}(t_k)\Phi_{zx}^T + \mathbf{B}_{zz}]^{-1}; \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(t_{k+1}) &= [\Phi_{xx}\mathbf{R}(t_k)\Phi_{xx}^T + \mathbf{B}_{xx}] - \\ &- \mathbf{K}(t_{k+1}) [\mathbf{B}_{xz} + \Phi_{xx}\mathbf{R}(t_k)\Phi_{zx}^T], \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{где: } \mathbf{B}_{xx} = \Gamma_x \Gamma_x^T, \quad \mathbf{B}_{xz} = \Gamma_x \Gamma_z^T, \quad \mathbf{B}_{zz} = \Gamma_z \Gamma_z^T.$$

Выражения (13)-(15) описывают оптимальный линейный фильтр, реализующий алгоритм АКОИ ПТ. Выражение (13) определяет структурную схему АКОИ ПТ по выходным данным ТП  $T_{TP}(t_k)$  и АСРЗ  $T_{P3}(t_l)$  (см. рис. 4).

В состав схемы комплексной обработки информации о профиле температуры входят:

– блок формирования наблюдений (БФН), выполняющий формирование новых наблюдений:

$$\Delta T_{TP}(t_k) = T_{TP}(t_k) - T_{CA}, \quad (16)$$

$$\sum \tilde{T}_{P3} = \Delta t \sum_{l=0}^{N-1} \frac{\Delta T_{P3}(t_{l+1}) - \Delta T_{P3}(t_{l-1})}{2\tau}; \quad (17)$$

– блок формирования невязок измерений (БНИ), выполняющий операцию формирования невязки:

$$\Delta \mathbf{Z}(t_{k+1}) = [\Delta T_{TP}(t_{k+1}) - \Phi_{zx}\mathbf{X}^*(t_k) - \Phi_{zz}]; \quad (18)$$

– блок формирования оценки (БФО), выполняющий операцию вычисления оценок в соответствии с (13)-(15).

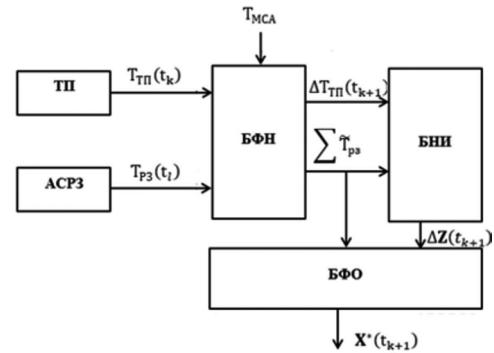


Рис. 4. Структурная схема комплексной обработки информации о профиле температуры

### Оценка качества алгоритма комплексной обработки информации о профиле температуры

Была разработана методика расчета характеристик качества синтезированного АКОИ ПТ в районе аэродрома, которая заключается в следующем.

1. На основании математических моделей (2)-(7) формируются постоянные матрицы  $\Phi_{xx}$ ,  $\Gamma_x$ .

2. На основании математических моделей (10) и (11) вычисляются значения матриц  $\Phi_{xz}$ ,  $\Phi_{zz}$ .

3. Выбираются начальные значения матрицы апостериорных центральных моментов второго порядка ошибок оценивания компонент вектора состояния  $\mathbf{R}(t_0)$ .

4. Вычисляются значения матрицы оптимальных коэффициентов  $\mathbf{K}(t_{k+1})$  на основании (14).

5. В соответствии с (15) проводится расчет матриц апостериорных центральных моментов второго порядка ошибок оценивания  $\mathbf{R}(t_{k+1})$  компонент вектора состояния.

6. Определяется зависимость элементов матрицы  $\mathbf{R}(t_{k+1})$  от времени путем повторения вычислений для  $k = 1, \bar{K}$ .

В качестве исходных данных для расчетов использованы типовые значения параметров МТП-5 и системы радиозондирования атмосферы [16].

На рис. 5 представлены результаты моделирования профилей температуры в районе аэродрома до высоты 1000 м и результаты измерения ТП и АСРЗ. На рис. 5, а представлен фактический профиль температуры в районе аэродрома  $T(h)$  соответствующий ситуации, когда температура уменьшается при увеличении высоты. Измерения профиля температуры ТП  $T_{TP}(h)$  и АСРЗ схожи, максимальные отклонения в результатах измерения ТП и АСРЗ не превышают  $0,5^{\circ}\text{C}$ . На рис. 5, б иллюстрируется случай профиля температуры с изотермией до высоты  $\sim 200$  м и приподнятой температурной инверсией в интервале высот  $\sim 200$ -600 м. Рассмотрен случай, когда ТП не регистрирует температурную изотернию и приподнятую инверсию. Максимальная ошибка измерения температуры ТП составляет  $\sim 4^{\circ}\text{C}$ . Случай приподнятой температурной инверсии в слое  $\sim 300$ -800 м с некоторой изотермиеи в слое  $\sim 400$ -600 м

илюстрируется на рис. 5, в. Здесь также рассмотрен случай, когда ТП не регистрирует эти особенности профиля температуры в районе аэродрома. На рис. 5, г представлен случай, когда результаты измерений ТП показывают более теплый воздух до высоты  $\sim 500$  м.

Во всех случаях, иллюстрируемых на рис. 5, измерения АСРЗ с небольшими ошибками практически повторяют профиль температуры в районе аэродрома. При моделировании не учитывались ошибки радиозондирования, связанные с динамикой подъема БЛА, а также ошибки, вызванные солнечной радиацией и смачиванием поверхности датчиков температуры [16]. Влияние перечисленных факторов можно свести к минимуму за счет оптимального выбора конструкции и компоновки БЛА.

Числовые значения характеристик точности получены на основе численного решения уравнений (14) для апостериорных вторых центральных моментов ошибок оценивания вектора состояния  $\mathbf{R}(t_{k+1})$  и матрицы (15) оптимальных коэффициентов  $\mathbf{K}(t_{k+1})$ . На рис. 6, а представлена графическая зависимость ошибки оценивания первой компоненты ветра состояния  $\Delta T^*(h)$  от высоты зондирования.

Установившееся значение апостериорной ошибки оценивания  $\Delta T^*(h)$  составляет  $\sigma_{\Delta T} = 0,1^{\circ}\text{C}$ . Это вполне соответствует требованиям к точности измерения температуры [16-18]. На рис. 6, б представлена зависимость ошибки оценивания второй компоненты ветра состояния  $\varepsilon_{TP}(h)$  от высоты зондирования.

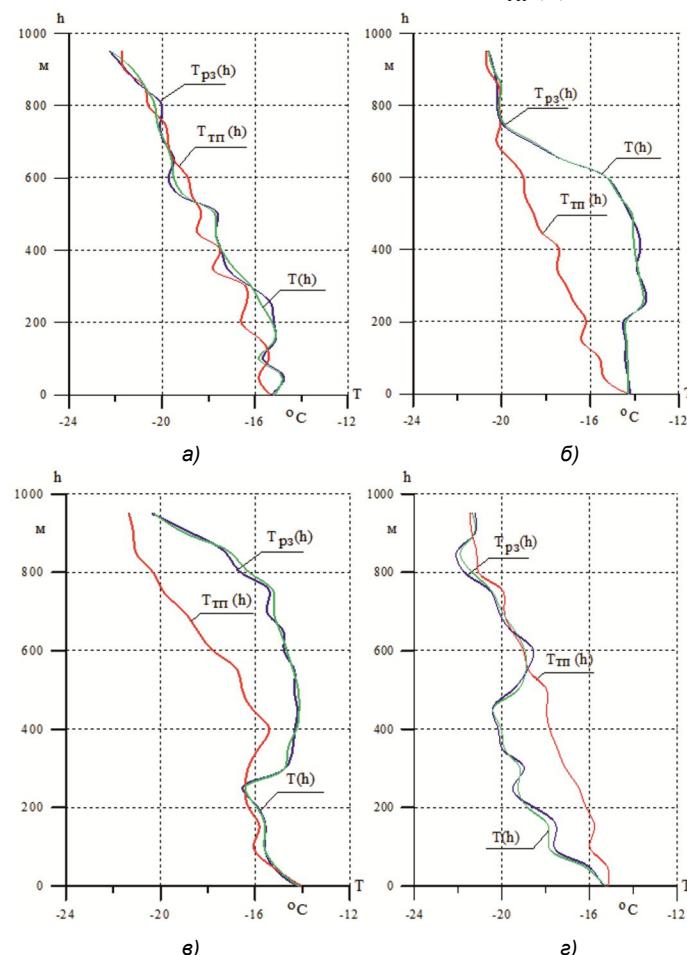


Рис.5. Результаты моделирования профиля температуры и его измерения ТП и АСРЗ

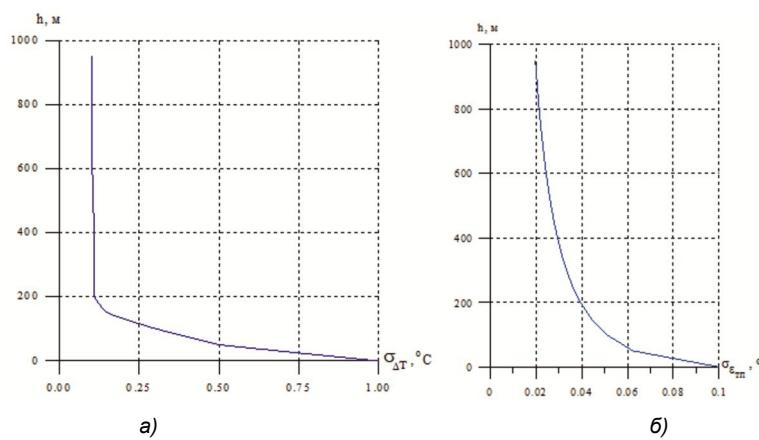


Рис. 6. Зависимости СКО ошибок оценивания компонент вектора состояния

Алгоритм КОИ о профиле температуры был синтезирован применительно к режиму слежения за оцениваемыми параметрами. В качестве начальных значений ошибок оценивания выбраны  $\sigma_{\Delta T} = 1^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma_{\varepsilon_m} = 0,1^{\circ}\text{C}$ . Полученные СКО ошибок оценивания вектора состояния позволяют судить о высокой эффективности АКОИ ПК и возможности их практического использования в аэродромных метеосистемах.

### Заключение

Опираясь на результаты моделирования АКОИ ПК можно сделать вывод, что в штатных условиях функционирования ТП и АСРЗ комплексная обработка информации о профиле температуры в районе аэродрома позволяет снизить отрицательный эффект от недостоверных измерений ТП и, тем самым, повысить безопасность полета на этапах взлета и посадки ВС. При отсутствии измерений температуры от АСРЗ точность измерения профиля температуры будет определяться только техническими характеристиками ТП и качеством его калибровки.

*Статья подготовлена в рамках поддержанного грантом Российского научного фонда проекта № 23-29-00450 «Исследование отражательных и турбулентных характеристик атмосферы с использованием нового отечественного метеорологического радиолокационного комплекса ближней зоны «Монокль» в различных климатических зонах в интересах повышения достоверности автоматической классификации опасных метеоявлений».*

### Литература

1. Васильев О.В., Зябкин С.А., Никоненко А.В., Чиров Д.С. Функционально-ориентированная модель формирования метеорологического продукта в х-диапазоне от гидрометеоров переохлажденной жидкости при полном поляризационном приеме. Цифровая обработка сигналов, № 1, 2023. С.54-61.
2. Болелов Э.А., Васильев О.В., Зябкин С.А., Чиров Д.С. Разработка нечетко-логического классификатора фазового состояния гидрометеоров для алгоритма классификации зон вероятного обледенения воздушных судов в метеолокаторах Х-диапазона. Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. № 10. С. 4-12.
3. Богаткин О.Г. Основы авиационной метеорологии. Учебник. СПб.: Изд. РГГМУ, 2009. 339 с.
4. Галаева К.И., Болелов Э.А., Губерман И.Б., Ещенко А.А., Далеций С.В. Обоснование задач, решаемых метеорологическим радиолокационным комплексом ближней аэродромной зоны. Научный вестник ГосНИИ ГА, № 20 (331), 2018. С. 74-81.
5. Кораблев Ю.Н. Оперативное информирование экипажей воздушных судов об опасных метеоявлениях в районах арктических посадочных площадок. Научный вестник МГТУ ГА, том 21, № 5, 2018. С. 137-149.
6. Болелов Э.А. Проблемы метеорологического обеспечения полетов гражданской авиации на аэродромах местных воздушных линий, временных аэродромах и аэродромных площадках. Сборник статей по материалам 55-х научных чтений памяти К.Э. Циолковского. Калуга, 2020. С. 83-87.
7. Болелов Э.А., Кудинов А.Т., Биктеева Е.Б., Губерман И.Б. Варианты построения устройства комплексной обработки информации о пространственном положении аэродромного беспилотного метеоразведчика. Научный вестник ГосНИИ ГА, № 26 (337), 2019. С. 100-112.
8. Болелов Э.А. Повышение оправдываемости метеопрогнозов по аэродрому путем комплексирования измерителей метеопараметров атмосферы. Научный вестник МГТУ ГА. 2019 т. 22, № 5. С. 43-53.
9. Болелов Э.А., Кораблев Ю.Н., Барапов Н.А., Демин С.С., Ещенко А.А. Комплексная обработка метеоинформации в аэродромных мобильных комплексах метеолокации и зондирования атмосферы. Научный вестник ГосНИИ ГА, №20 (331), 2018. С. 82-92.
10. Борисенко М.М. Вертикальные профили ветра и температуры в нижних слоях атмосферы. Труды ГГО. 1974. Вып. 320. 205 с.
11. Решетов В.Д. Изменчивость метеорологических элементов в атмосфере. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 215 с.
12. Болелов Э.А., Васильев О.В., Галаева К.И. Пространственная изменчивость профиля температуры воздуха в районе аэродрома. Научный вестник ГосНИИ ГА, № 29, 2019. С. 146-154.
13. Bolelov E.A., Vasiliev O.V., Galaeva K.I., Ziabkin S.A. Analysis of the height difference of the zero isotherm according to two temperature profilers. Civil Aviation High Technologies. 2020; 23(1):19-27.
14. Азаров М.А. Обработка сигналов телеметрии и дальности аэрологического зонда. Цифровая обработка сигналов, № 2, 2004. С. 34-39.
15. Ярлыков М.С., Миронов М.А. Марковская теория оценивания случайных процессов. М.: Радио и связь, 1993. 464 с.
16. Фридзон М.Б. Метрология радиозондирования атмосферы (Методология и достоверность результатов радиозондирования атмосферы). Изд. LAPLAMBERT Academic Publishing, Berlin, 2011. 288 с.
17. Федеральные авиационные правила «Предоставления метеорологической информации для обеспечения полетов воздушных судов» 3.03.2014 г. № 60.
18. Болелов Э.А., Ермошенко Ю.М., Фридзон М.Б., Кораблев Ю.Н. Динамические погрешности датчиков температуры при радиозондировании атмосферы. Научный вестник МГТУ ГА, том 20, № 5, 2017. С. 88-97.