

Б.О. Іванов, В.Б. Осіс, Л.М. Товстенко

ЛІТАКОВА АПАРАТУРА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ХМАР

Наведено опис розробленої апаратури для вимірювання параметрів хмар (водність та середній діаметр крапель) та оцінено похибки їх вимірювань.

За вимогами ІСАО при проведенні сертифікації протиобліднювальних систем нових типів літаків необхідно визначати водність та середній діаметр хмарових крапель.

У зв'язку з цим, за замовленням ОКБ "АНТОНОВ", розроблено та виготовлено апаратуру СИВО (російськомовна аббревіатура "Самолетный измеритель влажности облаков") для визначення середнього діаметра крапель та водності хмар з борта літака під час проведення сертифікації його протиобліднювальної системи.

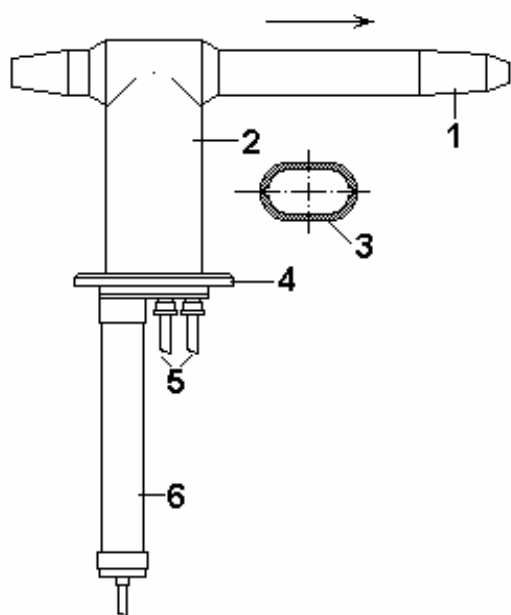


Рис. 1. Будова виносного блока ДПС апаратури СИВО: 1 – пробовідбірна трубка, 2 – стійка, 3 – поперечний переріз стійки, 4 – фланець кріплення, 5 – світловоди, 6 – тубус ОКГ. Стрілкою показано напрям польоту

Принцип роботи апаратури

Апаратура складається із трьох основних блоків: датчика первинних сигналів (ДПС), блока обробки фотоелектричних імпульсів (БОФІ) та блока живлення (БЖ). Блок ДПС є виносним пристроєм, що монтується зовні фюзеляжу літака в незбуреній зоні попереду гвинтів чи повітрозабірників реактивних двигунів. Блоки БОФІ та БЖ розташовуються всередині фюзеляжу і з'єднуються з ДПС світловодами та кабелями.

Конструктивно блок ДПС (рис. 1) виконано у вигляді порожнистої стійки овального перерізу довжиною 200 мм. На одному кінці стійки перпендикулярно до неї закріплено пробовідбірну трубку

обтічної форми довжиною 492 мм із вхідним отвором діаметром 10 мм, на другому – фланець кріплення з вісьмома отворами під гвинти М6, герметичними вводами для двох світловодів і багатожильного кабелю, а також нарізкою для під'єднання тубуса джерела світла – оптичного квантового генератора ЛГН-208А. В носовій частині пробовідбірної трубки вмонтовано термодатчик та два електронагрівники. Один із них за допомогою системи термостабілізації постійно підтримує оптимальну температуру потоку, щоб запобігти випаровуванню хмарових крапель; другий вмикається аварійно за сигналом бортового показчика обмерзання ВУО-1. В порожнині стійки розміщено всі вузли і деталі оптичної системи.

Схема оптичної системи показана на рис. 2. Промінь від ОКГ 1 за допомогою діафрагм 2, 3, 6, дзеркала 4 та напівциліндричної лінзи 5 набуває потрібної форми і напрямку, потрапляє до пробовідбірної трубки 7 під кутом 45° до її осі і поглинається світловою пасткою 8. Розсіюване окремими краплинами під кутом 45° світло збирається об'єктивом 9 і спрямовується на ділильну призму 10, де поділяється на два рівних пучки, які крізь діафрагми 11 та 12 потрапляють до світловодів 13 та 14, а далі – на фотокатоди фотоелектричних помножувачів ФЕП 15 та 16, розташованих у блоці БОФІ.

Така бісекція променя необхідна для уникнення похибок визначення спектра розмірів крапель за рахунок випадків, коли крапля не повністю потрапляє в поле зору, а проходить по його межі. Фотоімпульси від таких крапель не

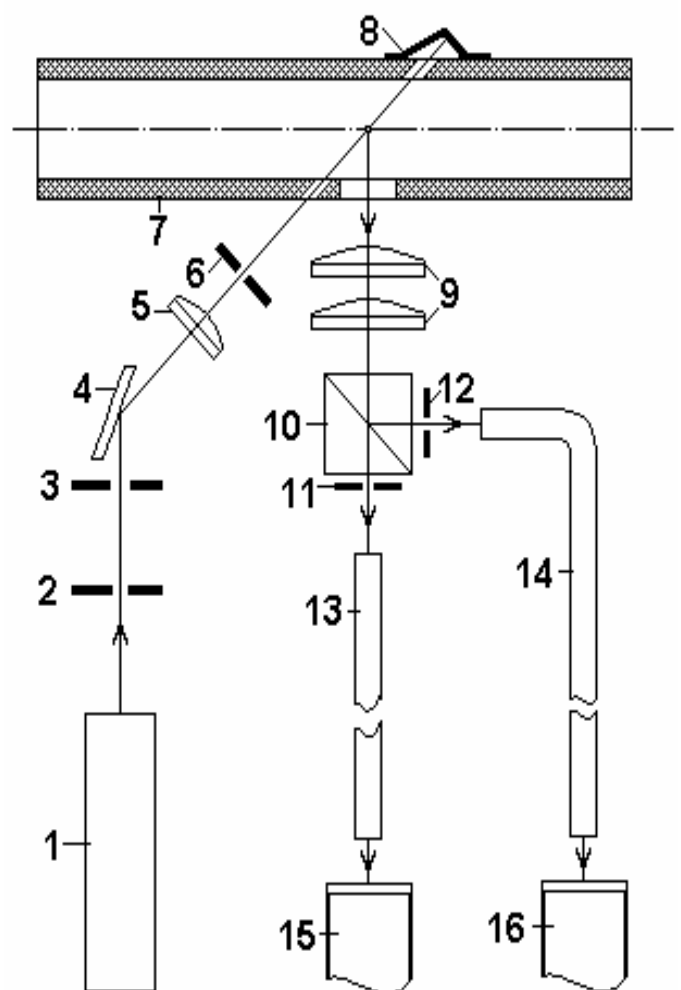


Рис. 2. Оптична схема апаратури СИВО: 1–ОКГ, 2, 3, 6, 11,12–діафрагми, 4 – дзеркало, 5 – напівциліндрична лінза, 7 – канал пробовідбірної трубки, 8 – світлова пастка, 9 – об'єктив, 10 – ділильна призма, 13, 14 – світловоди, 15, 16 – фотопомножувачі

пропорційні їхньому міделевому перерізу, тому можуть бути помилково приписані краплям меншого розміру.

Щоб запобігти цьому, в приладі застосовано систему двох діафрагм різного діаметра та схему збігів під час реєстрації фотоімпульсів. Основний канал (11–13–15) призначений для визначення розміру крапель, а допоміжний (12–14–16) – для визначення концентрації їх. Він має менше поле зору, обмежене діафрагмою 12; поля зору обох каналів строго концентричні.

Програмне забезпечення дозволяє автоматично здійснювати віртуальне збільшення поля зору допоміжного каналу на величину ΔD , коли крапля діаметром D лише частково потрапляє в це поле.

Блок БОФІ з допомогою вбудованих компараторів та логічного пристрою здійснює селекцію імпульсів, розподіляє їх по 10 каналах і приводить до вигляду, придатного для реєстрації апаратурою ГАММА-11 або РЕГАТА.

Блок живлення містить перетворювачі напруги бортової мережі (27 В постійного струму і 115 В змінного струму частотою 400 Гц) в набір напруг для живлення різних вузлів апаратури, в тому числі два високовольтних регульованих параметричних стабілізатори на напівпровідникових стабілітронах для живлення ФЕП і три стабілізатори напруги компенсаційного типу з транзисторним виходом для живлення електронних схем. До складу БЖ входить також система терморегуляції потоку в пробовідбірній трубці. На передній панелі БЖ розміщені органи управління апаратурою та індикатори її роботи.

Апаратура споживає до 4 А постійного і до 3 А змінного струму, розрахована на 3 год. безперервної роботи в умовах температури за бортом літака до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, швидкості польоту від 150 до 500 км/год., перевантажень до 5 g, атмосферного тиску від 760 до 170 мм. рт. ст.

Технічні характеристики апаратури СИВО:

1. Діапазон вимірювань водності хмар – $0,1\text{--}2,5\text{ г/м}^3$.
2. Діапазон вимірювань середнього діаметра крапель хмар – $8,0\text{--}64,0\text{ мкм}$.

Експериментальні дослідження

Обладнання для експериментальних досліджень апаратури СИВО та його компоновка наведено на рис. 3. Воно необхідне для створення потоку водяного аерозолію.

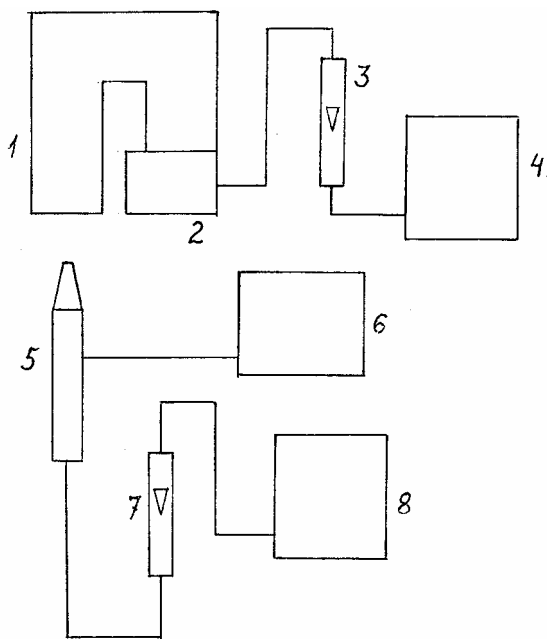


Рис. 3. Обладнання для досліджень апаратури СИВО: 1 – V-подібний патрубок; 2 – генератор; 3 – ротаметр; 4 – насос; 5 – датчик; 6 – електронний блок; 7 – ротаметр. 8 – насос

апаратури СИВО виконується обробка отриманої інформації про водність та середній діаметр крапель тестового аерозолі.

Відбір проб, їх обробка, розрахунок водності W та середнього діаметру крапель d тестового аерозолі, а також похибок методу мікрофотографування виконувались згідно Стандарту підприємства СТП 52.4.7.01-99 (Методика визначення мікроструктури водяного аерозолі).

Дослідження було виконано методом порівняння результатів, отриманих за допомогою апаратури СИВО та методу мікрофотографування. Було проведено дві серії вимірювань для двох різних значень водності тестового аерозолі та проаналізовані випадкова і систематична складові похибки вимірювань.

Результати досліджень наведені в табл. 1-4.

Розраховуємо для $n = 10$ вимірювань:

- середнє квадратичне відхилення $S^2 = 0,001981 : 9 = 0,00022$;
- дисперсію $S = 0,015$;
- дисперсію абсолютної різниці $S_{\Delta} = S : \sqrt{n} = 0,015 : 3 = 0,005$;
- коефіцієнт Стьюдента $t = (\bar{\Delta} \cdot \sqrt{n}) : S = (0,028 \cdot \sqrt{10}) : 0,015 = 5,90$.

Тестовий аерозоль, що створює генератор 2, за допомогою насоса 4 нагнітається в U-подібний патрубок 1 перерізом приблизно 100 см^2 . Патрубок 1 спрямовує потік аерозолі вертикально вниз. Об'ємна швидкість потоку аерозолі контролюється за допомогою ротаметра 3. Датчик 5 апаратури СИВО розташовується вертикально в потоці аерозолі на відстані не більше 5 см від патрубком 1. Проба аерозолі всмоктується безперервно насосом 8. Об'ємна швидкість проби контролюється за допомогою ротаметра 7. Проби крапель для мікрофотографування беруться в проміжку між патрубком 1 та датчиком 5. У електронному блоці 6

Таблиця 1

Результати визначення водності аерозолю (г/м³)

Перша серія				
Апаратура СИВО W_a	Мікрофотографування W_b	$\Delta = W_a - W_b $	$ \Delta - \bar{\Delta} $	$(\Delta - \bar{\Delta})^2$
0,562	0,558	0,004	0,024	0,000576
0,452	0,469	0,017	0,011	0,000121
0,367	0,413	0,046	0,018	0,000323
0,541	0,563	0,022	0,006	0,000036
0,663	0,627	0,036	0,008	0,000064
0,525	0,491	0,034	0,006	0,000036
0,528	0,483	0,045	0,017	0,000289
0,566	0,582	0,016	0,012	0,000144
0,611	0,593	0,018	0,010	0,000100
0,472	0,427	0,045	0,017	0,000289
$\bar{W}_a = 0,529$	$\bar{W}_b = 0,521$	$\bar{\Delta} = 0,028$	$\sum(\Delta - \bar{\Delta})^2 = 0,001981$	

Таким чином, $t > t_{\text{табл.}}$ ($t_{\text{табл.}} = 2,26$ для $n - 1 = 9$), тому розходження є значущим. Тому середнє значення водності, отримане за допомогою апаратури СИВО, має бути зменшено на $\bar{\Delta} = 0,028$ г/м³, тобто скласти $\bar{W}_a = 0,501$ г/м³.

Межі довірчого інтервалу результату вимірювання водності апаратурою СИВО при цьому $\delta = \pm(\bar{\Delta} + t \cdot S_{\Delta}) = \pm 0,039$. Відносна похибка результату 7,8%.

З табл. 2 розраховуємо для $n = 12$ вимірюванням: $S^2 = 0,001569 : 11 = 0,000143$; $S = 0,012$; $S_{\Delta} = S : \sqrt{n} = 0,012 : 3,16 = 0,005$; $t = (\bar{\Delta} \cdot \sqrt{n}) : S = (0,013 \cdot \sqrt{12}) : 0,012 = 3,75$.

Таким чином, $t > t_{\text{табл.}}$ ($t_{\text{табл.}} = 2,20$ для $n - 1 = 11$), тому розходження є значущим. Середнє значення водності, отримане за допомогою апаратури СИВО, має бути зменшено на $\bar{\Delta} = 0,013$ г/м³, тобто скласти $\bar{W}_a = 0,232$ г/м³. Границі довірчого інтервалу результату вимірювання водності апаратурою СИВО при цьому $\delta = \pm(\bar{\Delta} + t \cdot S_{\Delta}) = \pm 0,020$. Відносна похибка результату 8,6%.

Внаслідок проведених досліджень встановлено:

- випадкова складова похибки вимірювання водності методом мікрофотографування складає 4,8%;
- систематична складова похибки вимірювання водності апаратурою СИВО складає 8,6%;

- сумарна відносна похибка вимірювання водності апаратурою СИВО складає 13,4%.

Таблиця 2

Результати визначення водності аерозолі (г/м³)

Друга серія				
Апаратура СИВО W_a	Мікрофотографування W_b	$\Delta = W_a - W_b $	$ \Delta - \bar{\Delta} $	$(\Delta - \bar{\Delta})^2$
0,168	0,190	0,022	0,009	0,000081
0,268	0,273	0,005	0,008	0,000064
0,326	0,335	0,005	0,008	0,000064
0,214	0,220	0,006	0,007	0,000049
0,224	0,229	0,005	0,008	0,000064
0,221	0,258	0,037	0,024	0,000576
0,247	0,253	0,006	0,007	0,000049
0,298	0,307	0,009	0,004	0,000016
0,252	0,217	0,035	0,022	0,000484
0,256	0,240	0,016	0,003	0,000009
0,203	0,208	0,005	0,008	0,000064
0,265	0,259	0,006	0,007	0,000049
$\bar{W}_a = 0,245$	$\bar{W}_b = 0,249$	$\bar{\Delta} = 0,013$	$\sum(\Delta - \bar{\Delta})^2 = 0,001569$	

Згідно з даними табл. 3 розраховуємо для $n = 10$ вимірюванням: $S^2 = 2,34 : 9 = 0,260$; $S = 0,51$; $S_{\Delta} = S : \sqrt{n} = 0,51 : 3,16 = 0,2$; $t = (\bar{\Delta} \cdot \sqrt{n}) : S = (1,2 \cdot \sqrt{10}) : 0,51 = 7,44$; $t_{\text{табл.}} = 2,26$; $\bar{d}_a = 19,5 - 1,2 = 18,3$ мкм.

Довірчий інтервал $\delta = \pm (\bar{\Delta} + t \cdot S_{\Delta}) = \pm 1,6$ мкм. Відносна похибка результату 8,7%.

Розраховуємо для $n = 12$ вимірюванням: $S^2 = 1,09 : 11 = 0,099$; $S = 0,315$; $S_{\Delta} = S : \sqrt{n} = 0,315 : 3,46 = 0,09$; $t = (\bar{\Delta} \cdot \sqrt{n}) : S = (0,8 \cdot \sqrt{12}) : 0,315 = 8,79$; $t_{\text{табл.}} = 2,20$; $\bar{d}_a = 19,5 - 0,8 = 18,7$ мкм.

Можливість вимірювання водності з відносною похибкою 13,4% та довірчий інтервал $\delta = \pm (\bar{\Delta} + t \cdot S_{\Delta}) = \pm 1,0$ мкм. Відносна похибка результату 5,3%.

Внаслідок проведених досліджень встановлено:

- випадкова складова похибки вимірювання середнього діаметра крапель методом мікрофотографування складає 1,6%;

- систематична складова похибки вимірювання середнього діаметра крапель апаратурою СИВО складає 8,7%;

- сумарна відносна похибка вимірювання середнього діаметра крапель апаратурою СИВО складає 10,3%.

Таблиця 3

Результати визначення середнього діаметра крапель (мкм)

Перша серія				
Апаратура СИВО d_a	Мікрофотографування d_b	$\Delta= d_a- d_b $	$ \Delta-\bar{\Delta} $	$(\Delta-\bar{\Delta})^2$
18,0	19,4	1,4	0,2	0,04
22,1	20,5	1,6	0,4	0,16
19,2	19,5	0,3	0,9	0,81
17,0	18,3	1,3	0,1	0,01
17,6	18,7	1,1	0,1	0,01
17,4	18,3	0,9	0,3	0,09
20,8	19,4	1,6	0,4	0,16
21,0	19,5	1,5	0,3	0,09
22,0	20,4	1,6	0,4	0,16
19,7	19,4	0,3	0,9	0,81
$\bar{d}_a = 19,5$	$\bar{d}_b = 19,3$	$\bar{\Delta} = 1,2$	$\sum(\Delta-\bar{\Delta})^2 = 2,34$	

Таблиця 4

Результати визначення середнього діаметра крапель (мкм)

Друга серія				
Апаратура СИВО d_a	Мікрофотографування d_b	$\Delta= d_a- d_b $	$ \Delta-\bar{\Delta} $	$(\Delta-\bar{\Delta})^2$
17,5	18,4	0,9	0,1	0,01
21,2	20,5	0,7	0,1	0,01
18,4	19,1	0,7	0,1	0,01
17,2	18,4	1,2	0,4	0,16
19,8	19,4	0,4	0,4	0,16
21,1	19,8	1,3	0,5	0,25
22,0	21,3	0,7	0,1	0,01
19,4	19,7	0,3	0,5	0,25
18,5	19,6	1,1	0,3	0,09
16,8	17,3	0,5	0,3	0,09
20,7	19,8	0,9	0,1	0,01
21,8	20,7	1,1	0,2	0,04
$\bar{d}_a = 19,5$	$\bar{d}_b = 19,5$	$\bar{\Delta} = 0,8$	$\sum(\Delta-\bar{\Delta})^2 = 1,09$	

Апаратура СИВО пройшла метрологічну атестацію в Українському державному науково-виробничому центрі стандартизації, метрології та сертифікації (свідоцтво № 36-2/176 від 30.06.1998 р.) та використовується при випробуваннях літаків Ан-38, Ан-140 та Ан-70.

Висновки

Розроблено та виготовлено апаратуру СИВО для визначення середнього діаметра крапель та водності хмар при проведенні сертифікації протиобліднювальних систем нових типів літаків. Проведені експериментальні дослідження та дана оцінка метрологічних характеристик апаратури.

Показана можливість вимірювання водності з відносною похибкою 13,4% та середнього діаметра крапель з відносною похибкою 10,3%.

* *

Приведено описание разработанной аппаратуры для измерения параметров облаков (водность и средний диаметр капель) и дана оценка погрешностей их измерений.

*Український науково-дослідний
гідрометеорологічний інститут, Київ*