

## АЛГОРИТМЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОТОКА В АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБАХ МАЛЫХ СКОРОСТЕЙ

**Введение.** Известно [1, 2], что для экспериментальных исследований (ЭИ) распределения давления на моделях летальных аппаратов (МЛА) в промышленных аэродинамических трубах малых скоростей (АДТ) используются информационно-измерительные системы (ИИС) на базе пневмокоммутаторов (ПК) [3]. Для таких ИИС актуальна задача разработки адаптивного алгоритма управления ЭИ в АДТ и на МЛА в зависимости от внутренней структуры системы [4, 5] и качества потока [3, 6, 7].

**Постановка задачи:** разработка алгоритмов ЭИ качества потока в АДТ для оценки точностных характеристик и быстродействия ИИС [8].

**Оборудование.** Для решения поставленной задачи были исследованы две дренированные МЛА —  $M_1$  в АДТ Т-103 и  $M_2$  в АДТ Т-101.

МЛА  $M_1$  — это модель крыла с профилем СР-14 по центроплану и СР-16 по консолям, относительной толщиной профиля  $6 \div 6,25$  %, размахом 1,821 м, корневой хордой 0,977 м, концевой хордой 0,097 м, углом стреловидности  $56^\circ$  и площадью  $0,852 \text{ м}^2$ . Измерение давлений на  $M_1$  производилось в 26 дренажных точках в третьем сечении, расположенном на расстоянии 0,225 м от оси симметрии.

МЛА  $M_2$  — это модель полукрыла Ан-22 с профилем РР-151, относительной толщиной 10 %, размахом 5,985 м, корневой хордой 2,2 м, концевой хордой 0,8 м, углом стреловидности  $20^\circ$  и площадью  $8,94 \text{ м}^2$ . Давление на  $M_2$  измерялось в первом и втором сечениях.

В ЭИ использовались ИИС<sub>1</sub> на базе ПК [3], ИИС<sub>2</sub> АДТ Т-101 на базе спиртовых батарейных манометров (БМ) и ИИС<sub>3</sub> АДТ Т-103 на базе групповых регистрирующих манометров (ГРМ) [8].

На рис. 1 представлена блок-схема ИИС<sub>1</sub> [1–3, 6, 7], где АЦП — аналогоцифровой преобразователь; ПД — датчик давления; ДС — датчик синхроимпульсов; В — вычислитель, УУ — устройство управления;  $V_\infty$  — скорость потока в рабочей части АДТ, м/с;  $\alpha$  — угол атаки МЛА, град.;  $P_0$  — давление в форкамере;  $\omega$  — скорость вращения ротора ПК;  $P_s$ ,  $P_e$  — статическое и эталонное давления;  $P_i$  — измеряемое давление в  $i$ -й дренажной точке; К-сеть — компьютерная сеть.

Существенное влияние на точность экспериментальных данных (ЭД) ИИС оказывают низкочастотные пульсации давления (0,1–10 Гц) как на поверхности МЛА, так и в потоке АДТ. Они исследовались в диапазоне  $0 \div \pm 6 \cdot 10^4$  Па на МЛА, в форкамере АДТ и в потоке. Для этого были разработаны соответствующие алгоритмы ЭИ для ИИС<sub>1</sub>, ИИС<sub>2</sub> и ИИС<sub>3</sub>.

**Стендовые ЭИ ИИС<sub>1</sub>** проводились с целью получения оценки возможности применения ИИС<sub>1</sub> для измерения ожидаемых величин давлений ( $\pm 1,7 \cdot 10^3$ ;  $\pm 3,9 \cdot 10^3$ ;  $\pm 9,8 \cdot 10^3$ ;  $\pm 1,5 \cdot 10^4$  Па), оценки оптимальной скорости измерения  $\lambda$ , изм./с, и времени выравнивания давления в пневмотрассах (ПТ) [3, 5]. ЭИ проводились в соответствии с таким алгоритмом, в котором  $\lambda$  варьировалась в пределах  $2 \div 5,6$  изм./с:

- Шаг 1.** Установить необходимое давление в резервуаре.  
**Шаг 2.** Установить заданную  $\omega_0$ .  
**Шаг 3.** Измерить  $P_i$  во всех ПТ.  
**Шаг 4.** Если  $\omega_0 \leq \omega_{\max}$ , то переход на Шаг 3.  
**Шаг 5.** Переход на Шаг 1, если программа ЭИ не выполнена.  
**Шаг 6.** Конец.

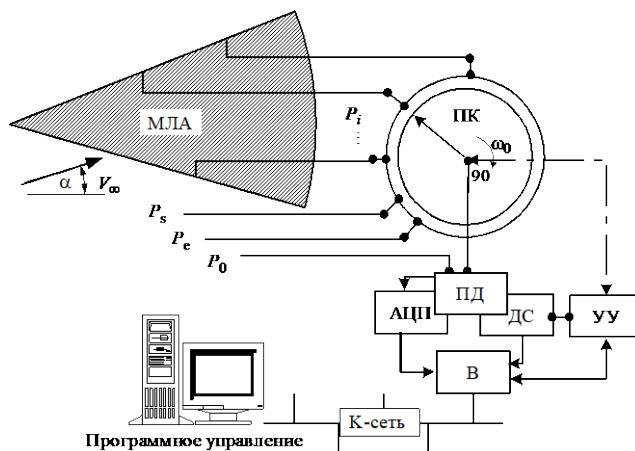


Рис. 1

Установка состояла из ПД типа ИКД6ТДф-0,16; ПК типа ПК-420; ПТ ( $d_0$  — диаметр дренажного отверстия, м;  $d, l$  — диаметр и длина ПТ, м) [9]; резервуара объемом  $0,2 \text{ м}^3$ ; автоматического задатчика давления (АЗД) класса 0,05 для поддержки  $P_e$  с точностью 0,15 %; регистрирующей аппаратуры (см. рис. 1).

Величина недовыравнивания давления определялась так:

$$\Delta P_e = \frac{1,963(u_i - u_0)}{P_e} \cdot 100 \%,$$

где  $u_i, u_0$  — показания ПД после АЦП.

Анализ ЭИ (рис. 2) показывает, что увеличение  $\lambda$  с 2 до 6 приводит к увеличению  $\Delta P$  от 0,1 до 7,5 %. При  $l \leq 2,5$ ,  $d_0 > 6 \cdot 10^{-4}$  и  $d \geq 16 \cdot 10^{-4}$  в исследуемом диапазоне давлений  $\Delta P \leq 0,4 \%$  при  $\lambda \leq 4,5$ . Для  $2,5 \leq l \leq 5$  необходимо применять ПТ с  $d \approx (16 \div 20) \cdot 10^{-4}$  и выдерживать  $\lambda$  в пределах от 2,5 до 3,5 изм./с [3, 5].

**ЭИ пульсаций давлений** проводились для определения амплитуды пульсаций в потоке ( $q$ ), форкамере ( $P_0$ ) и на поверхности МЛА ( $P_i$ ).

В АТД Т-103 применялась ИИС<sub>1</sub> (рис. 3) с короткими ПТ ( $0,5 \leq l \leq 5$ ), где для измерения  $q$  использовалась трубка Пито, которая устанавливалась на расстоянии 0,3 м от среза сопла или на расстоянии 0,6 м от  $M_1$ , с ПД ИКД6ТДф-0,16; для измерения  $P_0$  использовался ПД ИКД6ТДф-0,1 и весовой элемент (ВЭ) скоростного напора аэродинамических механических весов (АМВ) [2, 8].

Параметры ЭИ были такими:  $M_1$ ;  $\alpha = \{6^\circ, 12^\circ, 16^\circ, 18^\circ, 20^\circ, 24^\circ\}$ ;  $V_\infty = 60 \pm 2 \text{ м/с}$ ;  $\lambda = 2 \text{ изм./с}$ . Пульсации  $P_0$  измерялись только для  $\alpha = 24^\circ$ . Выполнялись стократные измерения  $q$  с помощью ИИС<sub>1</sub> и десятикратные — с помощью АМВ с интервалом в 20 с.

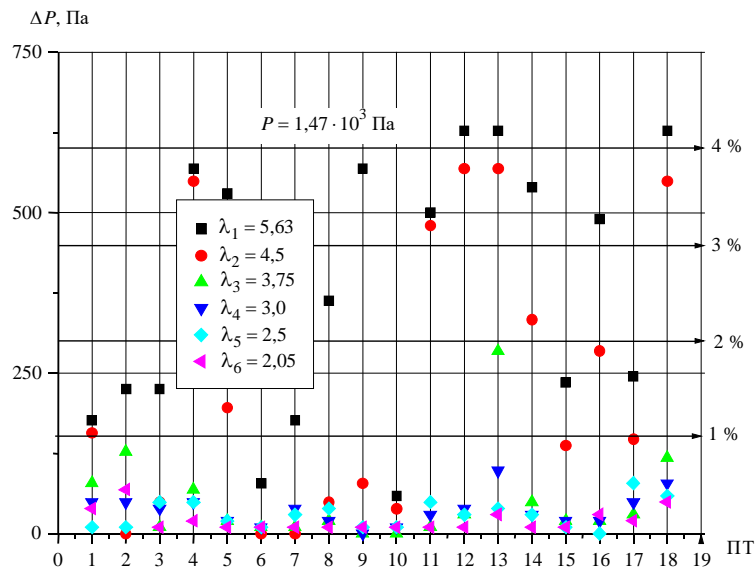


Рис. 2

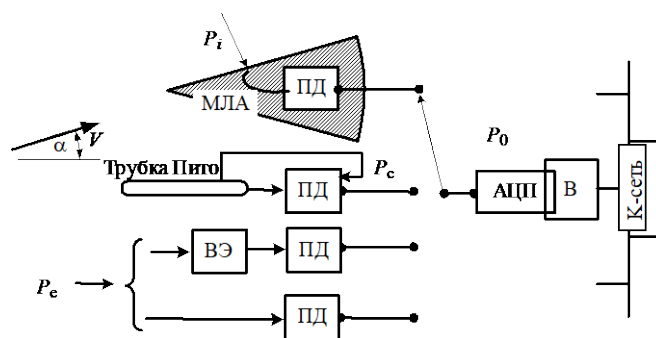


Рис. 3

Выборочные результаты ЭИ приведены на рис. 4 ( $q$  — измеренные АМВ), рис. 5 ( $P_0$ ) и рис. 6 ( $q$  при разных  $\alpha$ ). Отметим, что эти ЭД представляют собой усредненные значения давлений за период  $\tau = 100$  мс, измеренных со скоростью  $\lambda$ .

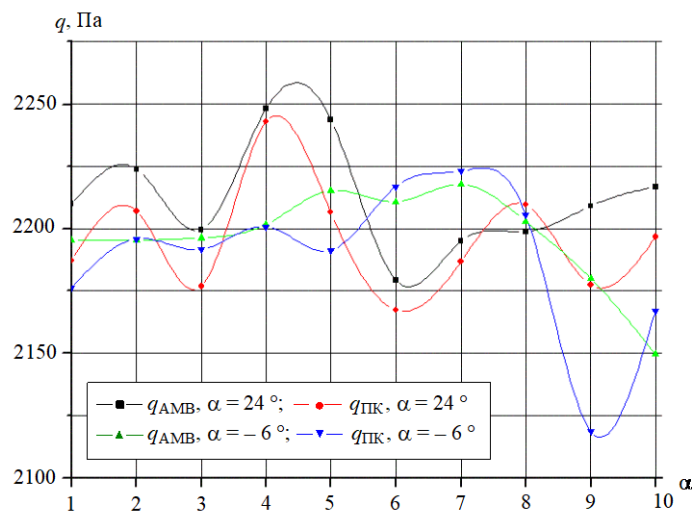


Рис. 4

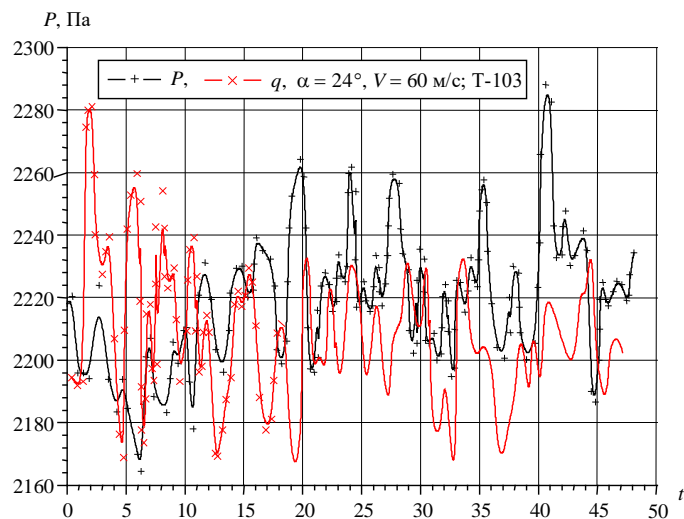


Рис. 5

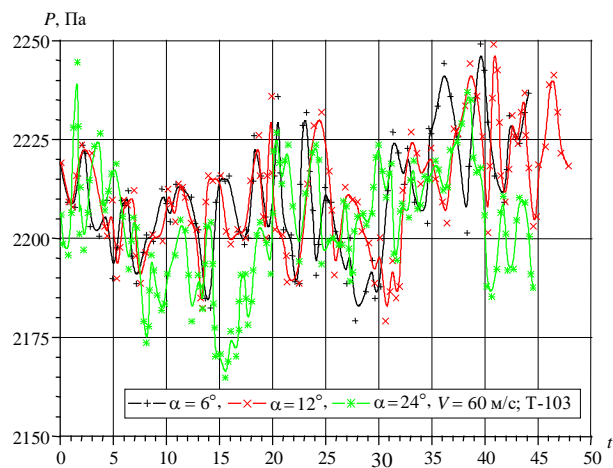


Рис. 6

Анализ ЭД показывает, что амплитуда пульсаций  $q$  в АДТ Т-103 в диапазоне частот  $0,2 \div 1,0$  Гц лежит в пределах  $20 \div 54$  Па, причем при увеличении  $\alpha$  с  $6^\circ$  до  $24^\circ$  она возрастает в 2,5 раза. Амплитуда пульсаций  $q$ , измеренная ВЭ АМВ, составляет  $49 \div 59$  Па.

В АДТ Т-101 применялась ИИС<sub>1</sub> для исследования пульсации давления: непосредственно у заборной шайбы форкамеры —  $P_0$  (ПД типа ИКД6ТДф-0,016); в форкамере —  $q$  (ВЭ АМВ); на  $M_2$  —  $P_i$  (ПД типа ИКД6ТДф-0,16).

Параметры ЭИ были такими:  $M_2$ ;  $\alpha = \{6^\circ, 12^\circ, 16^\circ, 18^\circ, 20^\circ, 24^\circ\}$ ;  $V_\infty = 60 \pm 2$  м/с;  $\lambda = 5 \div 20$  изм/с. Во время ЭИ выполнялось стократное измерение  $q$  и  $P_i$  со скоростью  $\lambda$ . Результаты ЭИ приведены на рис. 7 ( $q$ ), 8 и 9 ( $P_i$  на  $M_2$ ).

Анализ ЭД показывает, что амплитуда пульсации давления в форкамере АДТ Т-101 в диапазоне частот  $0,05 \div 2,0$  Гц и в диапазоне углов атаки  $0 \div 20^\circ$  меньше 10 Па, а на частотах  $2,0 \div 10,0$  Гц составляют около 25 Па и мало зависят от  $\alpha$   $M_2$ .

Амплитуда пульсаций давления в форкамере АДТ Т-101 в диапазоне частот  $0,05 \div 10,0$  Гц при  $\alpha = 0$  составляет  $50 \div 70$  Па, при  $\alpha = 12^\circ$  — до 127 Па, а при  $\alpha = 20^\circ$  — около 157 Па. Это примерно  $4 \div 30$  % от постоянной составляющей давления в данной точке на  $M_2$ .

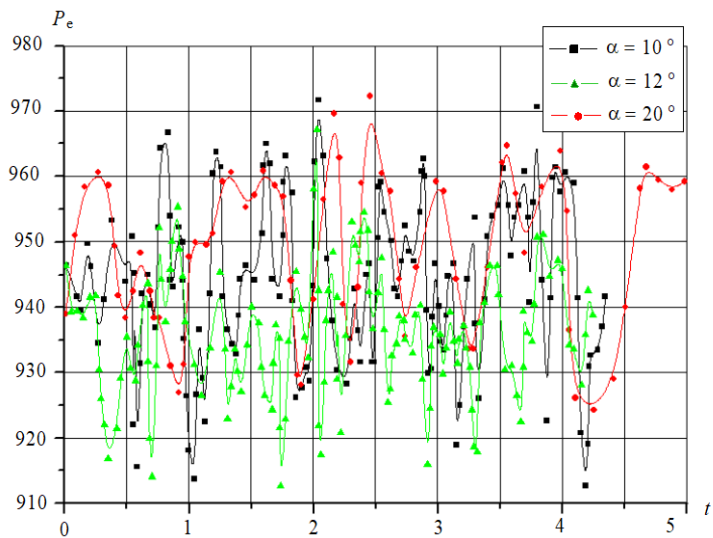


Рис. 7

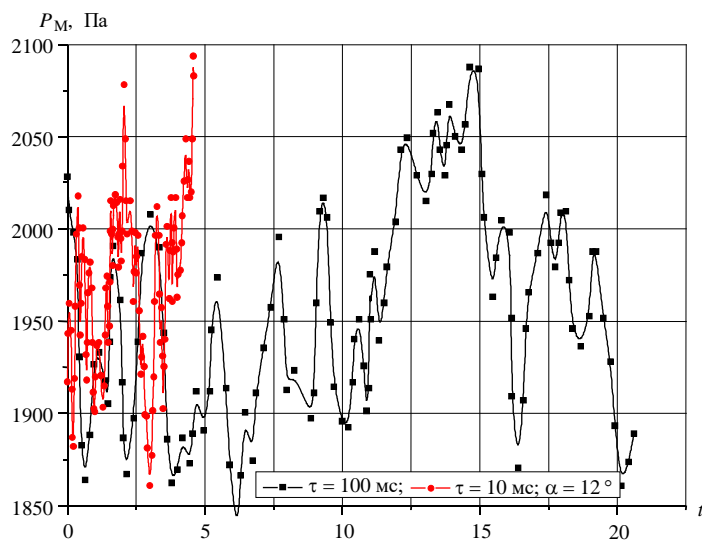


Рис. 8

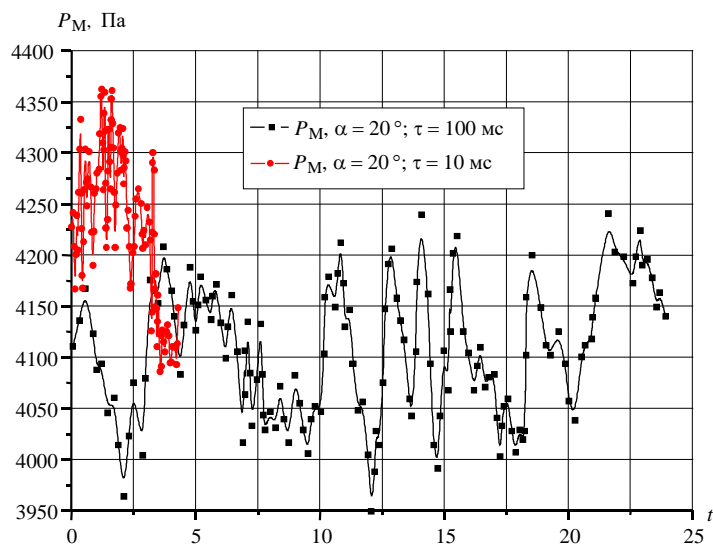


Рис. 9

ЭИ ИИС<sub>1</sub> и ИИС<sub>2</sub> проводились с целью оценки сходимости и точности регистрации ЭД на М<sub>1</sub>.

В АДТ Т-103 использовались ПТ с параметрами  $1 \leq l \leq 1,5$ ,  $d_0 = 5 \cdot 10^{-4}$ ,  $d = 2 \cdot 10^{-3}$ , ПД ИКД6ТДф-0,16, а также АЗД для поддержки опорного ( $1,18 \cdot 10^4 \pm 20$ ) Па и эталонного ( $5,2 \cdot 10^3 \pm 10$ ) Па давлений. ПК и ПД из-за малых габаритов М<sub>1</sub> размещались в обтекателе на расстоянии 0,6 м от нее.

В ИИС<sub>2</sub> применялись ГРМ на два диапазона измерений ( $\pm 4,415 \cdot 10^3$ ,  $\pm 9,8 \cdot 10^3$  Па) со среднеквадратической ошибкой 29 Па.

Дренажные точки М<sub>1</sub> подключались к ПК и ГРМ. Кроме дренажных точек М<sub>1</sub> через каждые 7–8 точек на ПК был подключен канал измерения скоростного напора  $q$  и статическое давление потока от трубки Пито, давление в форкамере, атмосферное давление и эталонное давление от АЗД.

ЭИ в АДТ проводились при скорости потока  $V_\infty = 60 \pm 2$  м/с, углах атаки М<sub>1</sub>  $\alpha = \{-6^\circ, 0^\circ, 6^\circ, 12^\circ, 16^\circ, 18^\circ, 20^\circ\}$  и в соответствии со следующим алгоритмом:

**Шаг 1.** ПТ М<sub>1</sub> подсоединить к ПК.

**Шаг 2.** Установить заданные программой ЭИ  $\alpha$  М<sub>1</sub> и  $V_\infty$  АДТ.

**Шаг 3.** Выполнить десятикратное измерение  $P_i$  при  $\alpha$  — fix и  $\lambda = 4$  изм./с.

**Шаг 4.** ПТ М<sub>1</sub> подсоединить к ГРМ.

**Шаг 5.** Установить заданные программой ЭИ  $\alpha$  М<sub>1</sub> и  $V_\infty$  АДТ.

**Шаг 6.** Выполнить десятикратное измерение  $P_i$  при  $\alpha$  — fix,  $\lambda = 0,05$  изм./с с интервалом 5 с.

**Шаг 7.** Переход на Шаг 2, если программа ЭИ не выполнена.

**Шаг 8.** Конец.

При обработке ЭД были определены среднеарифметическое значение относительного давления в каждой дренажной точке, отклонение относительного давления разовых измерений от среднеарифметического значения и среднеквадратическая погрешность измерений.

ЭД ИИС<sub>2</sub> обработаны по методикам ЦАГИ, грубые ошибки были исключены из обработки. ЭД из ИИС<sub>1</sub> обработаны по методикам и программам, описанным в [10, 11], грубые ошибки не исключались.

На рис. 10 представлены эпюры распределения относительного давления по М<sub>1</sub>, полученные с использованием ИИС<sub>1</sub> и ИИС<sub>2</sub>. Из эпюров следует, что средние значения давления на М<sub>1</sub> во всех 26 исследованных дренажных точках практически совпадают [3, 6, 7].

По результатам измерения эталонного давления ИИС<sub>1</sub> в реальных условиях АДТ Т-103 была определена его среднеквадратическая ошибка, равная 10 Па ( $\bar{\sigma} = 0,05\%$ ) [12]. При этом величина недовыравнивания эталонного давления составляла примерно 20 Па для ПТ с параметрами  $l \approx 10$ ,  $d_0 = 5 \cdot 10^{-4}$ ,  $d = 3 \cdot 10^{-3}$ .

На рис. 11 представлены минимальные и максимальные значения среднеквадратической ошибки отдельных измерений ИИС<sub>1</sub> и ИИС<sub>2</sub> для различных  $\alpha$  и в зависимости от расположения дренажных точек на М<sub>1</sub>.

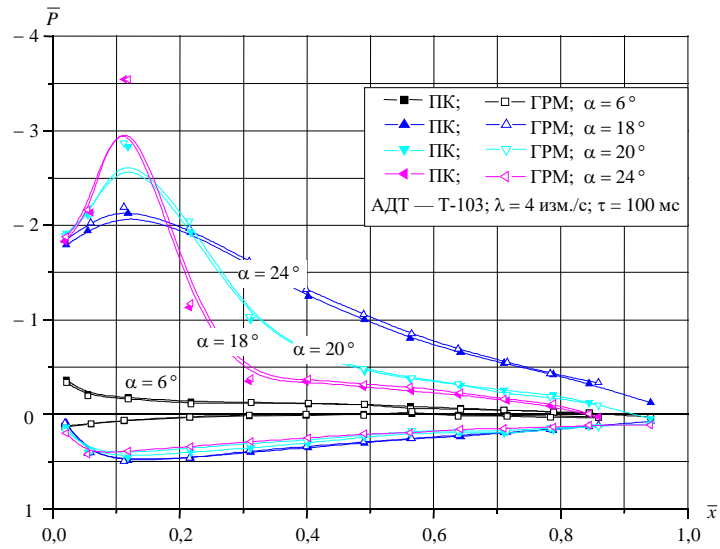


Рис. 10

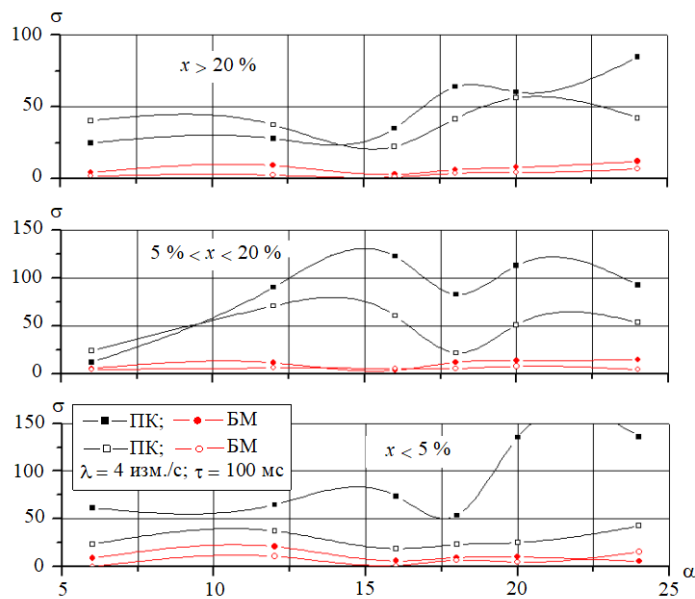


Рис. 11

Полученные ЭД показывают, что при  $\bar{x} > 20\%$  и  $5\% < \bar{x} < 20\%$  для  $\alpha \leq 12^\circ$  диапазоны среднеквадратических ошибок практически совпадают. Для  $\alpha \geq 16^\circ$  на носике профиля ( $\bar{x} < 5\%$ ) максимальное значение среднеквадратической ошибки ИИС<sub>1</sub> выше и составляет  $49 \div 127$  Па, что объясняется наличием больших пульсаций  $P_i$  на  $M_1$  при больших  $\alpha$ .

ЭИ ИИС<sub>1</sub> и ИИС<sub>3</sub> проводились с целью оценки сходимости и точности регистрации ЭД на  $M_2$ .

В АДТ Т-101 использовались ПТ с параметрами  $2,5 \leq l \leq 3,5$ ,  $d_0 = 1,5 \cdot 10^{-3}$ ,  $d = 2 \cdot 10^{-3}$ ; ПД ИКД6ТДф-0,16 и ИКД6ТДф-0,1, а также АЗД для поддержки опорного ( $1,18 \cdot 10^4 \pm 20$  Па) и эталонного ( $5,384 \cdot 10^3 \pm 10$  Па) давлений. Для уменьшения влияния на ЭД инерционности длинных ПТ ( $l \approx 25$  м) использова-

лись дополнительные объемы по  $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ . Их эффективность изучалась путем установки объемов по  $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$  и измерений давлений на конце ПТ дренажных точек 56, 58, 60, 62 и 64.

В ИИС<sub>3</sub> для измерения давления на  $M_2$  применялись шесть БМ типа ИД-2 на 50 точек каждый с регистрацией показаний фотоаппаратом [8]. Общая длина ПТ от  $M_2$  до БМ составляла около 17 м при внутреннем их диаметре  $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . После фотографирования и проявления фотопленок ЭД были расшифрованы с погрешностью  $\pm 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

Кроме 67 дренажных точек  $M_2$  на ПК через каждые  $14 \div 17$  точек были подключены каналы измерения скоростного напора, статическое давление потока и эталонное давление от АЗД.

Параметры ЭИ были такими:  $M_2$ ;  $\alpha = \{-4^\circ, 0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ, 16^\circ, 20^\circ, 24^\circ\}$ ;  $V_\infty = 40 \pm 0,25 \text{ м/с}$ ;  $\lambda = \{3, 4, 5, 7, 9, 10, 13\}$  изм./с. ЭИ проводились по такому алгоритму:

**Шаг 1.** ПТ  $M_2$  подсоединить к ПК.

**Шаг 2.** Установить заданные программой ЭИ  $\alpha$   $M_2$  и  $V_\infty$  в АДТ.

**Шаг 3.** Выполнить девятикратное измерение  $P_i$  при  $\alpha = \text{fix}$  и  $\lambda = 4$  изм./с.

**Шаг 4.** Выполнить измерение  $P_i$  при  $\alpha = \text{fix}$  и  $\lambda = 3$  изм./с.

**Шаг 5.** Выполнить измерение  $P_i$  при  $\alpha = \text{fix}$  и  $\lambda = 5$  изм./с.

**Шаг 6.** Выполнить измерение  $P_i$  при  $\alpha = \text{fix}$  и  $\lambda = 7$  изм./с.

**Шаг 7.** Выполнить десятикратное измерение  $P_i$  при  $\alpha = \text{fix}$  и  $\lambda = 9$  изм./с.

**Шаг 8.** Выполнить измерение  $P_i$  при  $\alpha = \text{fix}$  и  $\lambda = 10$  изм./с.

**Шаг 9.** Выполнить измерение  $P_i$  при  $\alpha = \text{fix}$  и  $\lambda = 13$  изм./с.

**Шаг 10.** Переход на Шаг 2, если программа ЭИ не выполнена.

**Шаг 11.** Конец.

При этом на каждом  $\alpha$  производилось восемнадцатикратное измерение  $P_i$  на  $M_2$  при двух режимах работы ИИС. На десятом цикле изменения  $\alpha$   $M_2$  измерение  $P_i$  производилось при  $\lambda = \{3, 5, 7, 9, 11, 13\}$  изм./с.

ЭИ ИИС на базе БМ проводились по следующему алгоритму:

**Шаг 1.** ПТ  $M_2$  подсоединить к БМ.

**Шаг 2.** Установить значение  $V_\infty$  в соответствии с программой ЭИ.

**Шаг 3.** Установить значение  $\alpha$   $M_2$  в соответствии с программой ЭИ.

**Шаг 4.** Выполнить измерение  $P_i$  при  $\alpha = \text{fix}$  и однократное фотографирование БМ.

**Шаг 5.** Переход на Шаг 3, если  $\alpha \leq 24^\circ$ .

**Шаг 6.** Переход на Шаг 2, если программа ЭИ не выполнена.

**Шаг 7.** Конец.

Таким образом, выполнялось десять циклов изменения  $\alpha$  (от  $-4^\circ$  до  $+24^\circ$ ) и десятикратное измерение  $P_i$  путем фотографирования БМ на каждом  $\alpha$ .

ЭИ комбинированной ИИС<sub>1</sub> и ИИС<sub>3</sub> производилось в соответствии с таким алгоритмом:

**Шаг 1.** ПТ  $M_2$  подсоединить к БМ и к ПК при помощи тройников.

**Шаг 2.** Установить значение  $V_\infty$  в соответствии с программой ЭИ.



**Шаг 3.** Установить значение  $\alpha$   $M_2$  в соответствии с программой ЭИ.

**Шаг 4.** Выполнить измерение  $P_i$  при  $\alpha = \text{fix}$  и однократное фотографирование БМ.

**Шаг 5.** Выполнить девятикратное измерение  $P_i$  при  $\alpha = \text{fix}$  и  $\lambda = 5$  изм./с.

**Шаг 6.** Выполнить десятикратное измерение  $P_i$  при  $\alpha = \text{fix}$  и  $\lambda = 9$  изм./с.

**Шаг 7.** Переход на Шаг 3, если  $\alpha \leq 24^\circ$ .

**Шаг 8.** Переход на Шаг 2, если программа ЭИ не выполнена.

**Шаг 9.** Конец.

Кроме этого, на каждом  $\alpha$  было произведено двукратное измерение давления ПК и однократное БМ.

Материалы ЭИ ИИС<sub>3</sub> получены в виде негативов фотографий БМ, которые были расшифрованы и обработаны по методике и программе, изложенной в [4]. При обработке грубые ошибки не исключались.

Для оценки применения аппроксимирующих полиномов и влияния грубых ошибок на результаты ЭИ была выполнена обработка ЭД для 1-й–9-й дренажных точек первого и для 56-й–64-й дренажных точек второго сечений  $M_2$  и углов атаки  $0^\circ, 12^\circ, 20^\circ, 24^\circ$ .

Анализ полученных ЭД показывает [3, 6, 7], что средние значения давления на  $M_2$  в 66 дренажных точках практически совпадают. В десяти дренажных точках, расположенных на верхней поверхности  $M_2$  вблизи носика профиля на больших  $\alpha$  ( $16^\circ, 20^\circ, 24^\circ$ ), средние значения  $P_i$ , измеренные с помощью ИИС<sub>1</sub>, превосходят аналогичные значения  $P_i$  по данным ИИС<sub>3</sub> на  $49 \div 383$  Па. Это объясняется неодинаковой инерционностью ПТ и БМ при изменении давления в условиях существования переменной составляющей.

На рис. 12 представлены среднеквадратические погрешности измерения  $P_i$  от углов атаки  $M_2$  для комбинированной ИИС<sub>1</sub> и ИИС<sub>3</sub> в диапазоне дренажных точек с координатами  $0 \leq \bar{x} < 5\%$ ,  $5\% \leq \bar{x} < 20\%$ ,  $20\% \leq \bar{x} \leq 100\%$ .

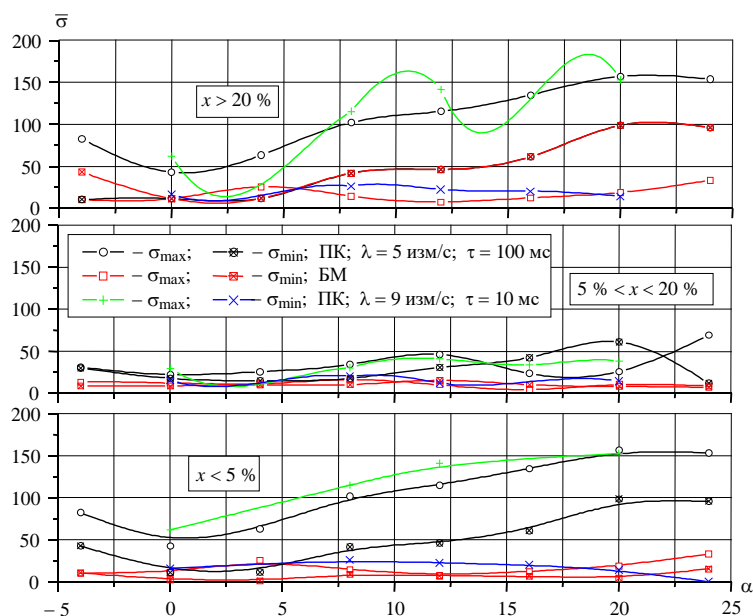


Рис. 12

Из ЭД следует, что среднеквадратические погрешности измерения давления на носике  $M_2$  ( $0 \leq \bar{x} < 5\%$ ) ИИС<sub>1</sub> больше аналогичных погрешностей для ИИС<sub>3</sub> в  $1,2 \div 2$  раза. На основной части  $M_2$  ( $20\% \leq \bar{x} \leq 100\%$ ) среднеквадратические погрешности для обеих ИИС не превышают  $0,25\%$ . Большие расхождения погрешностей измерения  $\bar{P}_i$  вблизи носика  $M_2$  вызваны большой амплитудой пульсации давления на носике профиля.

По результатам измерений эталонного давления ИИС<sub>1</sub> в реальных условиях АДТ была проверена гипотеза о подчинении ЭД нормальному закону на основании критерия согласия Пирсона  $\chi^2$  [12]. В нашем случае  $\chi = 7,13$ , что допустимо с достоверностью  $0,95$ . При этом среднеквадратическая ошибка измерения эталонного давления  $\sigma = 10$  Па ( $\bar{\sigma} = 0,05\%$ ).

Наличие систематической ошибки в  $25$  Па при замере эталонного давления не является систематической ошибкой при измерении  $P_i$  на  $M_2$ , это величина недовыравнивания давления вследствие инерционности ПТ длиной  $\sim 25$  м и наличия объема  $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$  при  $\lambda = 5$  изм./с.

Анализ ЭД показывает, что ИИС<sub>3</sub> в диапазоне частот  $0,5 \div 5$  Гц интегрирует переменную составляющую давления на  $20\text{--}40\%$ , а ИИС<sub>1</sub> при таких ПТ интегрирующими свойствами в этом диапазоне частот не обладает. Отметим, что для ПТ с параметрами  $l = 2,5$ ;  $d_0 = 1,5 \cdot 10^{-4}$ ;  $d = 2 \cdot 10^{-3}$  наличие емкостей объемом  $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$  на ее конце не уменьшает переменную составляющую измеряемого давления.

Аналогично получены значения давления в 3-й, 7-й и 63-й точках  $M_2$  при  $\alpha = 20^\circ$ , измеренные ИИС<sub>1</sub> при  $\lambda$  от 3 до 13 изм./с. Из-за наличия в 3-й точке переменной составляющей давления до  $275$  Па не удается обнаружить недовыравнивание давления в ПК при больших  $\lambda$ . В 7-й и 63-й точках при  $\lambda = 10\text{--}13$  изм./с  $\Delta P_i$  составляет  $20 \div 75$  Па. Результаты многократных измерений ИИС<sub>1</sub> эталонного давления показали, что даже в случае  $\lambda = 3$  изм./с при первом съеме данных  $\Delta P_i \approx 29$  Па, а при втором съеме данных давление выравнивается. С увеличением скорости до  $13$  изм./с при первом съеме данных  $\Delta P_i$  достигает  $98$  Па, при втором —  $29$  Па. Это свидетельствует о том, что емкость объемом  $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$  на конце ПТ с  $l \approx 25$  м при использовании ПД ИКДБТДф-0,16 недостаточна.

На рис. 13 приведены значения  $\bar{P}_i$ , однократно измеренные ПК при подключенных ПТ ИИС<sub>3</sub>. Из ЭД можно сделать вывод, что длинные ПТ после ПК практически не влияют на результаты измерений  $\bar{P}_i$  на  $M_2$ . Кроме того, анализ значений  $\bar{P}_i$ , измеренных при  $\lambda = 5 \div 9$  изм./с, показал, что средние значения во всех дренажных точках практически совпадают. А из графиков рис. 12 следует, что среднеквадратические погрешности измерения давления ИИС<sub>1</sub> при времени интегрирования  $10$  мс на  $10\text{--}30\%$  выше, чем при времени интегрирования  $100$  мс, что объясняется разной разрешающей способностью ИИС ( $1,96$  Па на младший разряд при  $\tau = 100$  мс и  $20$  Па при  $\tau = 10$  мс).

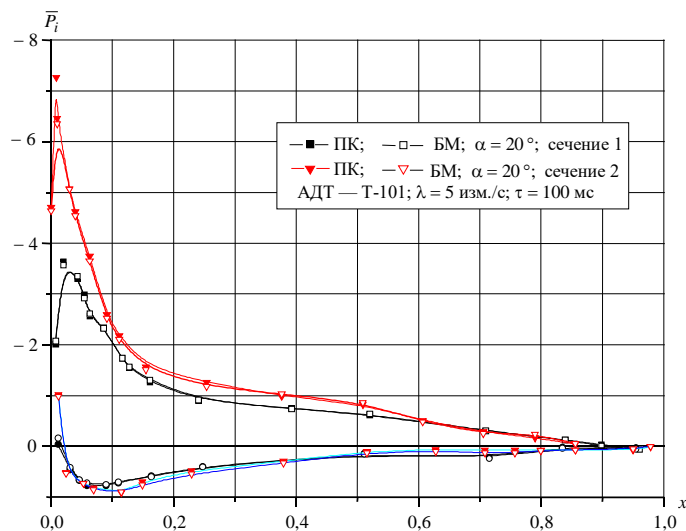


Рис. 13

**Выводы.** Разработаны алгоритмы ЭИ и получены характеристики качества потока в рабочей части АДТ в диапазоне давлений испытаний МЛА, которые приведены в таблице. Показано, что ИИС<sub>1</sub> по своим характеристикам не уступает ИИС<sub>2</sub> и ИИС<sub>3</sub>, при допустимом недовыравнивании давления в 0,4 % ИИС<sub>1</sub> обеспечивает скорость измерения давления 2,5÷5 изм./с, средние значения давления на поверхности МЛА, получаемые с помощью трех ИИС, в основном совпадают, за исключением давления в дренажных точках на носике профиля, где обнаружены большие пульсации давления.

Таблица

Параметры	Т-101		Т-103	
	$P_s$	на $M_2$	$P_s$	на $M_2$
ИИС <sub>1</sub>	10	3 ÷ 157	10	5 ÷ 88
ИИС <sub>2</sub>	—	—	3	3 ÷ 55
ИИС <sub>3</sub>	—	3 ÷ 98	—	—
Амплитуда пульсаций при $-4^\circ \leq \alpha \leq 12^\circ$ , Па	20 ÷ 25		39 ÷ 69	
	20 ÷ 25		88 ÷ 108	

Результаты данного исследования использованы при создании современной информационной технологии экспериментальных исследований МЛА в промышленных аэродинамических трубах.

*В.П. Зінченко*

### АЛГОРИТМИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОТОКУ В АЕРОДИНАМІЧНИХ ТРУБАХ МАЛИХ ШВИДКОСТЕЙ

Наведено алгоритми і результати експериментальних досліджень якості потоку в промислових аеродинамічних трубах малих швидкостей. Якість потоку досліджувалася з точки зору оцінки характеристик точності, швидкості та надійності інформаційно-вимірювальних систем в діапазоні тисків, які виникають на поверхні моделей літальних апаратів.

## ALGORITHMS AND OUTCOMES OF RESEARCHES OF A FLOW IN WIND TUNNELS OF LOW SPEEDS

The algorithms and outcomes of experimental researches of quality of a flow in industrial wind tunnels of low speeds are adduced. The quality of a flow was investigated from the point of view of an estimation of the characteristics of accuracy, response and reliability of informational-measuring systems in pressure range arising on a surface of models of flight vehicles.

1. *Зинченко В.П.* Автоматизация экспериментальных исследований в аэродинамической трубе // УСиМ. — 1989. — № 1. — С. 95–99.
2. *Египко В.М., Зинченко В.П., Белоусов Б.Н., Горин Ф.Н.* Системы автоматизации экспериментальных исследований в аэродинамических трубах. — Киев : Наук. думка, 1992. — 264 с.
3. *Разработка и исследование пневмоизмерительных систем на базе пневмокоммутаторов для многоточечного измерения давления в аэродинамических трубах / Н.В. Руденко, В.К. Артамонов, В.П. Зинченко, В.П. Каськов, Т.Г. Наценок, Ю.М. Чумак, В.П. Резник // Тр. ЦИАМ. — 1981. — Вып. 972. — С. 78–97.*
4. *Зинченко В.П.* Алгоритм адаптивного управления информационной измерительной системой // Автоматика-2000. Пр. Міжнар. конф. автомат. управлін. : В 7 т. — Львів : Держ. НДІ інфрамац. інфраструктури, 2000. — Т. 3. — С. 183–191.
5. *Зинченко В.П.* Исследование и реализация алгоритма адаптивного управления экспериментом // Проблемы управления и информатики. — 2001. — № 3. — С. 58–69.
6. *Зинченко В.П.* Исследование характеристик информационно-измерительной системы распределения давления // Вестн. НТУУ «КПИ». Машиностроение. — Киев : НТУУ «КПИ», 2000. — Вып. 39. — С. 313–321.
7. *Зинченко В.П.* Характеристики информационно-измерительной системы распределения давления // Технічна електродинаміка. — 2000. — № 6. — С. 70–74.
8. *Горлин С.М., Слезингер И.И.* Аэродинамические измерения. — М. : Наука, 1964. — 720 с.
9. *Зинченко В.П.* Результаты исследований качества потока в аэродинамических трубах малых скоростей // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». — Харьков, 2001. — Вып. 10. — С. 141–151.
10. *Программное обеспечение испытаний по распределению давления в трубах малых дозвуковых скоростей / В.П. Зинченко, С.Г. Безвушко, А.А. Ермоленко, Н.Г. Пятецкая // IV Всес. шк. по метод. аэрофиз. исслед. — Новосибирск : ИТПМ СО АН СССР, 1986. — С. 183.*
11. *Алгоритм обработки результатов дренажных испытаний моделей с внутримодельными пневмокоммутаторами в аэродинамических трубах малых скоростей / Н.В. Руденко, Т.Г. Наценок, В.П. Зинченко, В.И. Руденя, В.К. Артамонов // III Всес. шк. по метод. аэрофиз. исслед. — Новосибирск : ИТПМ СО АН СССР, 1982. — С. 204–208.*
12. *Химмельблау Д.* Анализ процессов статистическими методами. — М. : Мир, 1973. — 975 с.

Получено 22.08.2001  
После доработки 05.08.2003