

УДК 629.7.022

Е.А. Українець, В.В. Василенко, І.В. Романенко, І.О. Коломиєц

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

## ЭКСПРЕСС-МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ МЕСТНОЙ СКОРОСТИ ПОТОКА В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ МАЛЫХ ДОЗВУКОВЫХ СКОРОСТЕЙ Т-1

Представлена экспресс-методика измерения местной скорости потока в аэродинамической трубе малых дозвуковых скоростей Т-1 Харьковского университета Воздушных Сил, обладающая большей наглядностью, чем определение скорости в ядре потока методом перепада давления в форкамере и рабочей части трубы. Показано, что существующее оборудование аэродинамической трубы Т-1 позволяет достоверно определять скорость в рабочей части, уровень начальной турбулентности потока, коэффициенты поля в рабочей части, однако в настоящий момент нет возможности исследовать местные турбулентные пульсации потока, установить уровень турбулентности по режимам работы трубы. Разработанная методика является переходным этапом к экспериментальным исследованиям турбулентных пульсаций потока.

**Ключевые слова:** аэродинамическая труба, экспериментальные исследования, скорость потока, термоанемометр, турбулентность, координатник, трубка Пито.

### Введение

В настоящее время при экспериментальных исследованиях турбулентных пульсаций наиболее широко используется проволочный или пленочный термоанемометр [1]. Этот прибор получил общее признание для измерения характеристик турбулентности в потоке. Причины широкого распространения термоанемометров обусловлены следующими их достоинствами:

1) чувствительные элементы (преобразователи) термоанемометров достаточно миниатюрны и потому слабо возмущают поток, в то же время искажения результатов измерений за счет пространственного осреднения пульсаций минимальны;

2) термоанемометры обладают малой инерционностью, что позволяет регистрировать высокочастотные пульсации до 133 кГц;

3) высокая чувствительность термоанемометров позволяет уверенно регистрировать и дифференцировать пульсации, которые составляют несколько процентов скорости потока;

4) электрические сигналы, поступающие с выхода термоанемометра, могут быть легко обработаны как на аналоговых приборах, так и на ПЕОМ;

5) термоанемометры работают достаточно стабильно. В связи с тем, что термоанемометр с нагретой нитью (или с пленочным датчиком) в настоящее время является лучшим, наиболее совершенным прибором для измерения турбулентности, поэтому этот метод был положен в основу разработанной методики измерения скорости потока в аэродинамической трубе малых дозвуковых скоростей Т-1 [1].

**Целью статьи** является разработка экспресс-методики измерения скорости потока в аэродинамической трубе малых дозвуковых скоростей Т-1. Разрабатываемая методика является переходным этапом к экспериментальным исследованиям турбулентных пульсаций потока.

### Анализ предыдущих исследований

#### Предназначение, внешний вид и технические характеристики аэродинамической трубы малых дозвуковых скоростей Т-1

Схема аэродинамического контура Т-1 с наименованием основных частей показан на рис. 1.

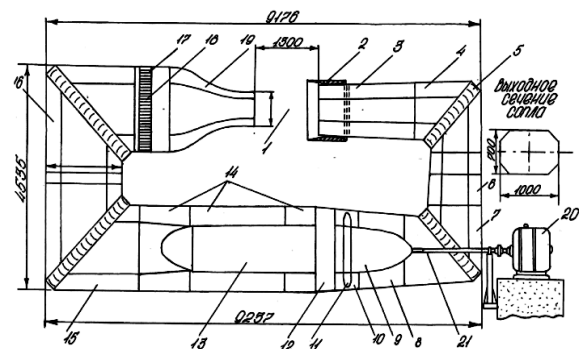


Рис. 1. Аэродинамический контур трубы Т-1:

- 1 – рабочая часть; 2 – кольцевой раструб;
- 3 – первый диффузор; 4 – колено №1; 5 – поворотные лопатки; 6 – второй диффузор; 7 – колено №2;
- 8 – переходник; 9 – передний обтекатель втулки вентилятора; 10 – вентиляторный отсек;
- 11 – вентилятор; 12 – спрямляющий аппарат;
- 13 – задний обтекатель втулки вентилятора;
- 14 – отсеки обратного канала; 15 – колено №3;
- 16 – колено №4; 17 – форкамера;
- 18 – спрямляющая решетка; 19 – сопло;
- 20 – приводной электромотор; 21 – вал

Корпус трубы разборный, изготовлен из дерева, все отсеки, кроме вентиляторного, восьмигранного сечения. Открытая рабочая часть 1 обеспечивает удобство установки моделей, наблюдения за ходом и сравнительную простоту эксперимента. Во всех четырех коленах трубы установлены поворотные профилированные лопатки 5, служащие для уменьшения

гидравлических потерь, плавного поворота потока во внутреннем канале трубы, и закрепляющиеся по выполнении наладки потока в рабочей части. Для обеспечения равномерности потока в рабочей части в форкамере трубы служит также спрямляющая решетка 18 с размером ячеек 40x40 мм. Для устранения пульсаций воздушного потока и связанных с ними вибраций корпуса трубы предусмотрено специальное устройство, состоящее из профилированного кольцевого раструба 2 и прямоугольных отверстий, выполненных по периметру входного участка первого диффузора 3. Место расположения раструба по отношению к отверстиям установлено ранее экспериментально. Вентилятор 11 трубы металлический, шестилопастный, с профилированными лопатками спрямляющего аппарата 12, установлен в обратном канале. Для обеспечения равномерности потока во внутреннем канале трубы втулка вентилятора закрыта крупногабаритными обтекателями 9 и 13, стыки и щели внутреннего канала тщательно зашпаклеваны и обработаны. На весах непосредственно измеряются лобовое сопротивление  $X_a$ , подъемная сила  $U_a$  и продольный момент  $M_z$  установленной модели. Основные технические данные аэродинамической трубы Т-1 сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты эксперимента

Размеры рабочей части:	
Ширина	1,0 м
Высота	0,7 м
Длина	1,3 м
Степень поджатия сопла	5
Диаметр вентилятора	1,5 м
Число оборотов вентилятора /максимальное/	1000 об/мин
Мощность приводного электродвигателя	30 кВт
Скорость потока в рабочей части:	
максимальная	50 м/с
минимальная	1,5 м/с
Аэродинамическое качество трубы со спрямляющей решеткой	2,7

### Основные данные аэродинамической трубы Т-1

Скорость потока в рабочей части измеряется, как правило, методом перепада давления в форкамере и рабочей части (рис. 2). Для измерения статического давления по периметру форкамеры установлен ряд приемников статического давления, объединенных в один коллектор для подачи давления к чашке микроманометра. Поскольку среднее статическое давление в открытой рабочей части равно атмосферному, то верхний конец градуированной трубки микроманометра оставлен открытым (рис. 3). Рабочая формула для определения скорости потока при заполнении чашки микроманометра этиловым спиртом ( $\rho = 809,5 \text{ кг/м}^3$ ) имеет вид:

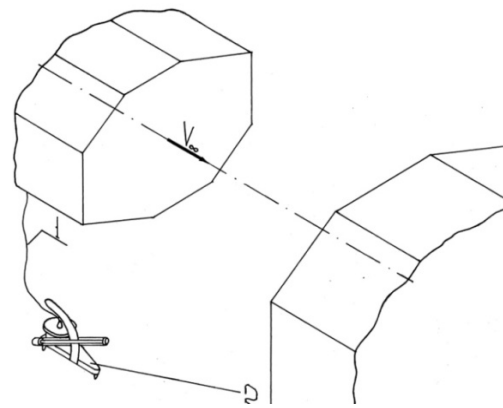


Рис. 2. Схема измерения скорости потока в рабочей части методом перепада давления в форкамере и рабочей части: (1 – воздушная трасса для подачи давления в форкамере к чашке микроманометра; 2 – микроманометр)

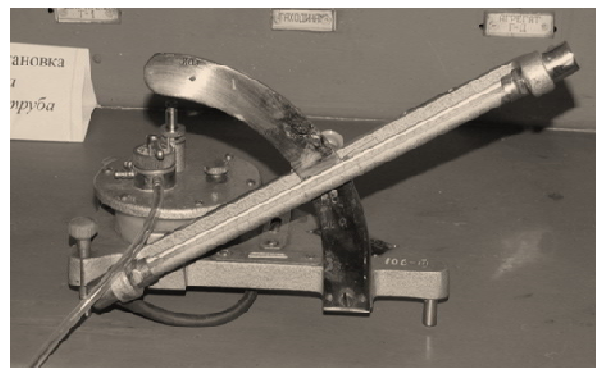


Рис. 3. Фотография внешнего вида микроманометра

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho} \mu k g l}, \quad (1)$$

где  $\mu = 1 / \left( 1 - \left( F_{рч} / F_{\phi} \right)^2 \right)$  – коэффициент перепада давления;  $F_{рч}, F_{\phi}$  – площади сечений рабочей части и форкамеры аэродинамической трубы;  $k$  – фактор микроманометра (значения фактора микроманометра соответствуют углу наклона трубки, указан на механизме наклона микроманометра и может в данном случае принимать значения 0,1; 0,2; 0,4; 0,6);  $l$  – показания микроманометра в миллиметрах, отсчитываемые по градуированной трубке;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho$  – плотность воздуха при данной температуре и атмосферном давлении определяется по формуле:

$$\rho = \rho_{MCA} \frac{p}{p_{MCA}} \frac{273 + t_{MCA}}{273 + t}, \quad (2)$$

где  $\rho_{MCA}, p_{MCA}, t_{MCA}$  – соответственно плотность, давление и температура воздуха в стандартных атмосферных условиях.

Измерение температуры и атмосферного давления осуществляется стационарным чашечным ртут-

ным барометром, наиболее точным стандартным прибором, скомбинированным с ртутным термометром.

Недостатком измерения скорости потока методом перепада давления в форкамере и рабочей части является невозможность измерения местных скоростей за исследуемой моделью, тем более, турбулентных пульсаций потока. Кроме того высокая гигроскопичность и испаряемость спирта обуславливает необходимость его периодичной замены на эталонный.

Для определения начальной турбулентности  $\varepsilon$ , количественно влияющей на аэродинамические характеристики испытываемых моделей, в аэродинамической трубе Т-1 используется свойство чувствительности шара к турбулентности [2 – 4].

Под степенью турбулентности понимается отношение среднеквадратичного отклонения скорости по времени к осредненной скорости в той самой точке за один и тот же промежуток времени:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{t} \int_{t_1}^{t_2} \Delta V^2 dt} / \left( \frac{1}{t} \int_{t_1}^{t_2} V dt \right). \quad (3)$$

При увеличении скорости потока в аэродинамической трубе от минимальной ламинарный пограничный слой на шаре переходит в турбулентное состояние, при этом точка отрыва сдвигается назад и коэффициент лобового сопротивления уменьшается. Используется допущение, что этот переход происходит мгновенно при некотором числе  $Re$ , называемом критическом и соответствующем значению коэффициента лобового сопротивления шара  $C_{xa}=0,3$ .

Весовые испытания шара и определение начальной турбулентности по зависимости  $\varepsilon = f(Re_{кр})$  проводилось аналогично весовым испытаниям шара [4], количественно отличались сила лобового сопротивления подвески, что связано с особенностями конструкции подвески шара к весам ЗКТ-1, а диаметр испытываемого шара был несколько меньше  $d_{ш} = 0,14$  м. Шар деревянный, склеенный из заготовок, внешняя поверхность тщательно полирована.

Фотография внешнего вида шара – измерителя турбулентности, установленного в рабочей части трубы Т-1 представлена на рис. 4, схема проведения эксперимента на рис. 5.

Важным параметром, характеризующим аэродинамические трубы, является степень равномерности воздушного потока в рабочей части (ядре потока) трубы [2 – 4]. Известно, что в ядре потока отклонение величины скоростного напора не должно превышать  $\pm 2\%$  от среднего значения:

$$\mu_i = q_i / q_{пер}, \quad (4)$$

где  $\mu_i$  – коэффициент поля в исследуемой точке рабочей части аэродинамической трубы;  $q_i$  – скоростной напор в исследуемой точке рабочей части аэродинамической трубы;  $q_{пер}$  – скоростной напор, измеренный методом перепада давления.



Рис. 4. Фотография внешнего вида шара – измерителя турбулентности, в рабочей части трубы Т-1

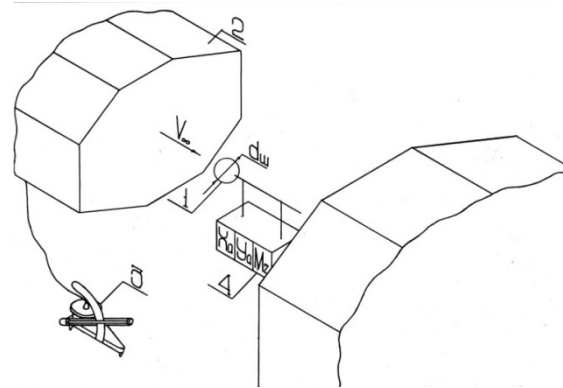


Рис. 5. Схема проведения эксперимента по определению начальной турбулентности (1 – шар-измеритель турбулентности; 2 – раструб аэродинамической трубы; 3 – микроманометр; 4 – трехкомпонентные весы)

Методика проведения эксперимента по определению коэффициента поля в рабочей части аэродинамической трубы аналогична [4] (рис. 6), незначительное отличие состояло в форме многоугольника в сечениях рабочей части (рис. 7) и типе применяемого координатника (рис. 8) и эталонной трубке Пито (рис. 9). На рис. 10 представлен полученный в результате обработки экспериментальных данных график изменения коэффициента поля вдоль оси z для центрального сечения рабочей части аэродинамической трубы при условии  $x=const$ ;  $y=const$ .

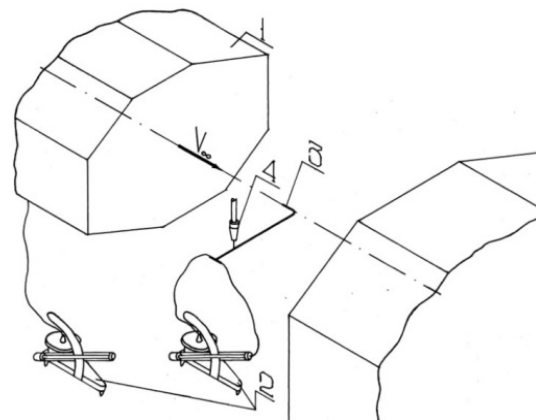


Рис. 6. Схема проведения эксперимента по определению коэффициента поля в рабочей части аэродинамической трубы: (1 – раструб аэродинамической трубы; 2 – микроманометры; 3 – трубка Пито; 4 – координатник)

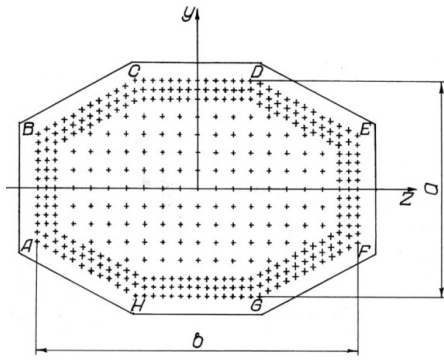


Рис. 7. Схема проведения эксперимента по определению коэффициента поля в рабочей части аэродинамической трубы (A B C D E F G H – восьмиугольник, ограничивающий исследуемую область рабочей части аэродинамической трубы)

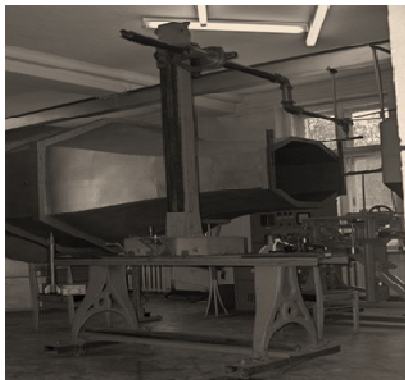


Рис. 8. Фотография внешнего вида применяемого координатника



Рис. 9. Фотография внешнего вида применяемой трубки Пито

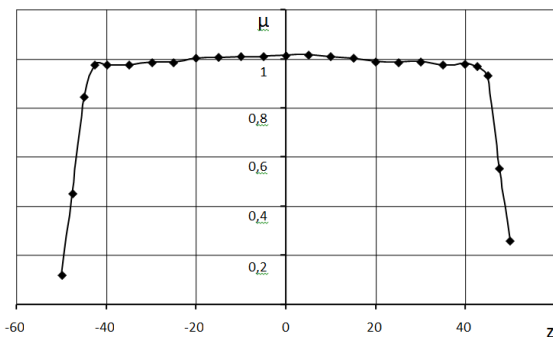


Рис. 10. График изменения коэффициента поля вдоль оси z для центрального сечения рабочей части аэродинамической трубы при условии  $x=\text{const}$ ;  $y=\text{const}$

Следует отметить громоздкость применения координатника, наличие деформации системы «координатник – трубка Пито» и зависимость этой деформации от скорости. Применение жидкостного манометра обуславливает периодичную замену спирта вследствие его высокой гигроскопичности и испаряемости. Использование этой методики в учебном процессе затруднено, недостаточно наглядно.

Таким образом, существующее оборудование аэродинамической трубы Т-1 позволяет достоверно определять скорость в рабочей части, уровень начальной турбулентности потока, коэффициенты поля в рабочей части. Однако в настоящий момент нет возможности исследовать местные турбулентные пульсации потока, установить уровень турбулентности по режимам работы трубы, что делает актуальным разработку экспресс-методики измерения скорости потока с использованием термоанемометра.

### Экспресс-методика измерения местной скорости потока в аэродинамической трубе малых дозвуковых скоростей Т-1

Как известно [1], термоанемометрический метод измерения скоростей потока основан на использовании свойства металлического проводника электрического тока изменять свое сопротивление при изменении температуры. Поэтому главной частью термоанемометра является миниатюрный металлический преобразователь, вводимый в исследуемый поток и нагреваемый электрическим током. Отвод тепла от преобразователя в поток происходит тем интенсивнее, чем выше скорость потока в области преобразователя. Полное количество переносимого тепла зависит от следующих факторов:

- скорости потока;
- разницы температур преобразователя потока;
- физических свойств среды;
- геометрических размеров и физических свойств преобразователя;
- положения преобразователя относительно вектора скорости.

При условии теплового равновесия потери тепла в единицу времени должны равняться количеству тепла, выделяемого в единицу времени электрическим током, проходящим через преобразователь. Так, для преобразователя в виде цилиндра будем иметь:

$$I^2 R_w = c \pi k_f l (T_w - T_g) \times [0,42(\text{Pr}_f^{0,2} + 0,57(\text{Pr}_f^{0,33} (\text{Re}_f^{0,5})), \quad (5)$$

где  $c$  – коэффициент преобразования;  $k_f$  – коэффициент теплопроводности газа при пленочной температуре;  $l$  – длина преобразователя термоанемометра;  $T_g$  – температура газа;  $T_w$  – температура нити.

Применительно к термоанемометрическим измерениям удобно и потому общепринято записывать это соотношение в форме:

$$\frac{I^2 R_w}{R_w - R_g} = A + B\sqrt{u}; \tag{6}$$

$$A = 0.42 \frac{c\pi k_f l}{bR_0} (Pr)_f^{0.2}; \tag{7}$$

$$B = 0.57 \frac{c\pi k_f l}{bR_0} (Pr)_f^{0.33} \left(\frac{\rho f d}{\mu f}\right)^{0.5}, \tag{8}$$

где  $f$  – значению, взятому при пленочной температуре;  $b$  – температурный коэффициент удельного электрического сопротивления преобразователя;  $R_0$  – сопротивление нити при  $T = 293K$ .

При измерениях термоанемометром коэффициенты  $A$  и  $B$  не вычисляются по формулам (7) и (8), а определяются экспериментально.

Если температура преобразователя поддерживается постоянной, т.е. и электрическое сопротивление его тоже, то в этом случае, согласно уравнению (6), связь между  $I^2$  и  $\sqrt{u}$  должна быть линейной. Постоянство температуры преобразователя (сопротивления) или тока осуществляется с помощью специальной электрической схемы. Преобразователь термоанемометра включается в одно из плеч моста (рис. 11).

В результате охлаждения преобразователя его сопротивление меняется, и мост разбалансируется. Сигнал разбаланса моста поступает на вход усилителя, который работает или по схеме постоянного тока (рис. 11, а) или по схеме постоянной температуры (сопротивления) преобразователя (рис. 11, б).

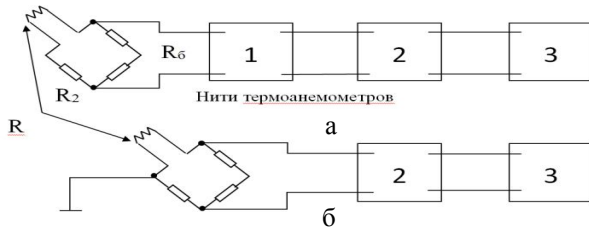


Рис. 11. Схема измерений для метода постоянного тока (а) и метода постоянной температуры (б): (1 – компенсатор; 2 – усилитель; 3 – регистрирующее устройство)

В первом случае температура, а, следовательно, и электрическое сопротивление преобразователя изменяются в зависимости от пульсационной скорости, во втором – температура (сопротивление) поддерживаются постоянными, а пульсирующей величиной является электрический ток. В настоящее время наибольшее распространение получил метод постоянной температуры, который по сравнению с методом постоянного тока имеет следующие преимущества: более высокая точность измерения, значительно меньшая постоянная времени измерительной системы, возможность регистрации высоких уровней интенсивности турбулентности.

На рис. 12 представлена принципиальная схема термоанемометра, используемого в эксперименте.

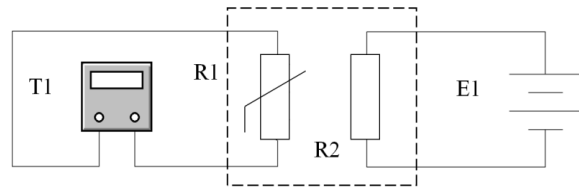


Рис. 12. Принципиальная схема термоанемометра: ( $R1$  – терморезистор;  $R2$  – нить нагрева;  $T1$  – омметр;  $E1$  – источник постоянного тока)

Датчик, вводимый в поток, представляет собой терморезистор, изготовленный из полупроводникового материала, у которого под воздействием температуры изменяется сопротивление. Датчик имеет размеры  $d = 3,5$  мм, диапазон измерения температуры лежит в пределах  $T = -55...+125^\circ C$ , сопротивление при температуре  $+25^\circ C$  составляет  $10k\Omega$ . Вокруг датчика размещается нагревательная спираль, изготовленная из нихрома, сопротивление спирали составляет  $5 \Omega$ . При подаче напряжения номиналом  $5 В$  сила тока равна  $1 А$  соответственно. Напряжение подается с регулируемого источника питания. При подаче напряжения под действием тока спираль начинает разогреваться и нагревать датчик температуры.

Информационным параметром данного устройства является сопротивление терморезистора, вследствие нагрева спиралью датчика его сопротивление начинает падать до значения  $2k\Omega$ . После помещения датчика со спиралью в воздушный поток аэродинамической трубы, под действием потока воздуха от спирали отводится тепло, спираль начинает охлаждаться, сопротивление термодатчика повышается. Значение этого изменения сопротивления, снимаемого цифровым мультиметром, зависит от температуры спирали, а температура спирали от скорости отвода тепла, скорости воздушного потока в аэродинамической трубе. Следует отметить, что значение сопротивления датчика также будет зависеть от температуры воздуха в помещении лаборатории и, в большей степени, от ориентации датчика относительно вектора скорости, что является существенным недостатком.

На рис. 13 представлена фотография внешнего вида используемого оборудования и исследуемой модели в рабочей части аэродинамической трубы Т-1. На рис. 14 представлена схема проведения эксперимента с обозначением точек, в которых проводились измерения скорости. Результаты измерений представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерения скорости

Скорость в ядре потока $V$ , м/с	Показания мультиметра		
	В ядре потока	Перед крылом (точка 1)	За моделью (точка 2)
20,1908	12,84	12,35	11
24,48494	12,27	12,78	11,42



Рис. 13. Фотографія зовнішнього виду використовуваного обладнання та досліджуваної моделі в робочій частині аеродинамічної труби Т-1

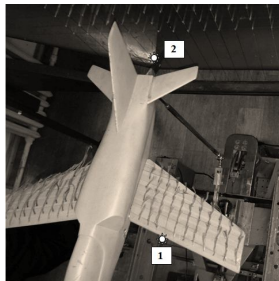


Рис. 14. Схема проведення експеримента: (1 – точка перед крилом, 2 – точка за моделлю)

### Выводы

1. Разработанная экспресс-методика измерения местной скорости потока в аэродинамической трубе малых дозвуковых скоростей Т-1 обладает

большой наглядностью, чем определение скорости в ядре потока методом перепада давления в форкамере и рабочей части трубы, и может быть использована в учебном процессе Харьковского университета Воздушных Сил.

2. Разработанная методика при определении коэффициента поля лишена такого недостатка, как наличие деформации системы «координатник – трубка Пито» стандартной методики. Использование разработанной методики и в этом случае более наглядно.

3. Разработанная методика является переходным этапом к экспериментальным исследованиям турбулентных пульсаций потока после закупки нитей термоанемометров и стабилизированного блока питания. Что позволит, в отличие от стандартной методики, определять не только начальную турбулентность потока, но и зависимость уровня турбулентности по режимам работы аэродинамической трубы.

### Список литературы

1. Постнов В.Ф. Измерение характеристик турбулентности в газовых потоках / В.Ф. Постнов, В.М. Янковский; под ред. А.В. Талантова. – Казань: КАИ, 1982. – 40 с.
2. Dryden H.L. Effect of turbulence in wind-tunnel measurements. / H.L. Dryden, A.M. Kuethe // NACA Rep. 342. – 1929.
3. Закс Н.А. Основы экспериментальной аэродинамики / Н.А. Закс. – М.: Оборонгиз, 1953. – 371 с.
4. Соляник П.Н. Экспериментальная аэродинамика: [учеб. пос. по лабораторному практикуму] / П.Н. Соляник, М.Л. Сургалю, В.В. Чмовж. – Х.: ХАИ, 2007. – 96 с.

Поступила в редколлегию 24.01.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.А. Калкаманов, Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Харьков.

### ЕКСПРЕС-МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ МІСЦЕВОЇ ШВИДКОСТІ ПОТОКУ В АЕРОДИНАМІЧНІЙ ТРУБІ МАЛИХ ДОЗВУКОВИХ ШВИДКОСТЕЙ Т-1

Є.О. Українець, В.В. Василенко, І.В. Романенко, І.О. Коломієць

Представлена експрес-методика вимірювання місцевої швидкості потоку в аеродинамічній трубі малих дозвукових швидкостей Т-1 Харківського університету Повітряних Сил, що володіє більшою наочністю, ніж визначення швидкості в ядрі потоку методом перепаду тиску в форкамері та робочій частині труби. Показано, що існуюче обладнання аеродинамічної труби Т-1 дозволяє достовірно визначати швидкість в робочій частині, рівень початкової турбулентності потоку, коефіцієнти поля в робочій частині, однак на даний момент немає можливості досліджувати місцеві турбулентні пульсації потоку, встановити рівень турбулентності по режимам роботи труби. Розроблена методика є перехідним етапом до експериментальним дослідженням турбулентних пульсацій потоку.

**Ключові слова:** аеродинамічна труба, експериментальні дослідження, швидкість потоку, термоанемометр, турбулентність, координатник, трубка Пито.

### EXPRESS-METHOD OF MEASUREMENT OF THE LOCAL VELOCITY OF FLOW IN THE WIND TUNNEL SMALL SUBSONIC SPEED T-1

E.A. Ukrainets, V.V. Vasilenko, I.V. Romanenko, I.O. Kolomic

Presents an Express-method of measurement of the local velocity of flow in the wind tunnel small subsonic speed T-1 of the Kharkiv University of Air Forces, with greater visibility than the determination of the velocity in the core method of pressure drop in the settling chamber and a working part of the pipe. It is shown that the existing equipment of the wind tunnel T-1 allows you to reliably determine the rate in the working part, the initial level of turbulence flow coefficients fields in the working part, however at the moment there is no possibility to explore the local flow turbulent pulsations, set the turbulence on the operation modes of the tube. The developed method is a transitional stage to experimental studies of turbulent fluctuations of flow.

**Keywords:** wind-channel, experimental researches, speed of stream, heat loss anemometer, turbulence, coordinatnik, tube Pito.