

УДК 629.7.022

Є.О. Українець, Є.І. Жилін, І.І. Шабрат, В.В. Сидоров, Е.В. Спіркін, А.С. Луценко

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## АЕРОДИНАМІЧНА ТРУБА МАЛИХ ДОЗВУКОВИХ ШВИДКОСТЕЙ ТН-1 ЗІ ЗМІННИМ КУТОМ НАХИЛУ РОБОЧОЇ ЧАСТИНИ

Побудована в якості діючого макету, аеродинамічна труба ТН-1 відрізняється змінним кутом нахилу робочої частини. Зміна кута нахилу робочої частини повнорозмірної аеродинамічної труби дозволить розширити номенклатуру режимів для тренування парашутистів на режими польоту з парашутом типу «крило». Реалізація зміни кута нахилу робочої частини при проектуванні аеродинамічних парашутних тренажерів дозволить тренувати основні режими польоту парашутиста з програмною зміною типу парашута і зовнішньої обстановки.

**Ключові слова:** аеродинамічна труба, макет, парашутна підготовка, якість аеродинамічної труби.

### Вступ

Як відомо, аеродинамічними трубами (АДТ) називаються лабораторні установки, які створюють еталонний потік заданих параметрів для вивчення характеристик обтікання твердих тіл. Поміщаючи в цей потік досліджуване тіло (модель літального апарату, автомобіля, локомотива і т.п.), можна визначити діючі на нього аеродинамічні навантаження. За допомогою різних оптичних засобів можна зробити видимою картину обтікання (вихрові сліди, скачки ущільнення, місцеві зони стиснення і розрідження, примежові шари та ін.).

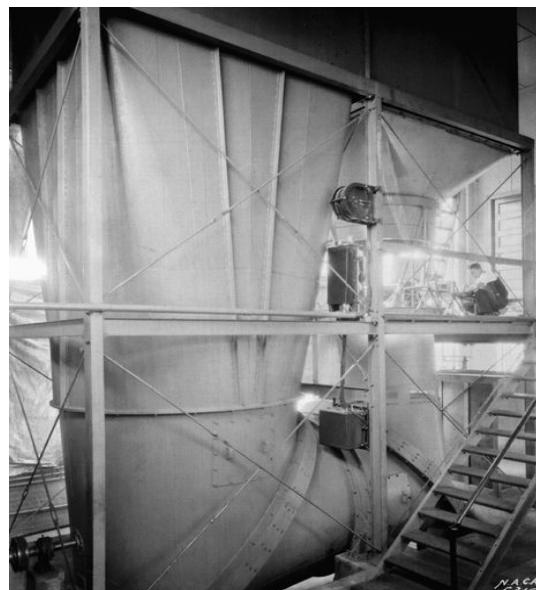
Методи і засоби вимірювань в АДТ головним чином орієнтовані на аеродинамічне проектування і розрахунок літальних апаратів. Проте їх слід сприймати значно ширше і поширювати на задачі газотурбінного, автомобільного та локомотивного маши-

нобудування, містобудування та парашутні тренування. Так, широко відомі парашутні тренажні комплекси Cesipal (Іспанія), SkyVenture (США), Вертикаль (Росія) до складу яких входять повнорозмірні вертикальні аеродинамічні труби.

Аеродинамічні труби мають механічні, конструктивні і вартісні межі, які обмежують досягнення натурних чисел Рейнольдса і низького рівня турбулентності набігаючого потоку. Проектування і будівництво діючих макетів АДТ для відпрацювання основних конструкторських рішень є ординарним, оскільки вартість розрахунків при будівництві таких складних і енерговитратних об'єктів як повнорозмірні АДТ надзвичайно велика, а створення макету дозволяє знизити технічний ризик і виключити грубі помилки при створенні повнорозмірної АДТ. В якості прикладу на рис. 1 а, б наведено макет та зовнішній вигляд натурної вертикальної АДТ NASA (США).



а



б

Рис. 1. Макет вертикальної аеродинамічної труби NASA (а) і її повнорозмірна реалізація (б)

Відомі також поворотні АДТ, призначені головним чином, для вивчення штопорних характеристик вільнолітаючих моделей. Можливість зміни кута нахилу ще більш ускладнює конструкцію АДТ та їх систем, обмежує швидкість потоку та погіршує його якість в робочій частині, що, в свою чергу, робить актуальним проведення широких параметричних досліджень для зниження ступеню технічного ризику створення повнорозмірної АДТ.

Таким чином, в умовах суттєво обмеженого фінансування є актуальними задачі створення діючого макету вертикальної АДТ малих дозвукових швидкостей з розімкненим контуром. Метою створення макета були:

- кількісна оцінка якості і основних параметрів АДТ з розімкненим контуром;
- експериментальне встановлення ступеня впливу нагромадження повітряного потоку на його рівномірність в робочій частині АДТ з замкнутим і розімкненим контурами;
- експериментальна оцінка параметрів аеродинамічного контуру АДТ розімкненого типу;
- встановлення принципової можливості розширення діапазону режимів польоту парашутистів, що моделюються, шляхом зміни нахилу АДТ.

**Мета статті** – представлення результатів експериментальних досліджень основних параметрів діючого макету вертикальної АДТ малих дозвукових швидкостей ТН-1 зі змінним кутом нахилу робочої частини.

## Основний розділ

### Схема побудови

Аеродинамічна труба малих дозвукових швидкостей ТН-1 побудована по схемі з розімкненим контуром з закритою робочою частиною. ТН-1 з дослідницькою метою виконана таким чином, що забезпечує можливість змінювати кут нахилу від  $0^\circ$  до  $180^\circ$  градусів з фіксацією в будь-якому положенні. ТН-1 оснащена системою плавного управління швидкістю потоку, в якості приводу використовується електричний двигун постійного струму незалежного збудження, живлення якого реалізовано за принципом двохступінчастого управління.

Основними частинами аеродинамічної труби ТН-1 є безпосередньо аеродинамічний контур малих дозвукових швидкостей, станина і комплекс вимірювального обладнання.

Схема аеродинамічної труби ТН-1 з найменуванням основних частин представлено на рис. 2, а.

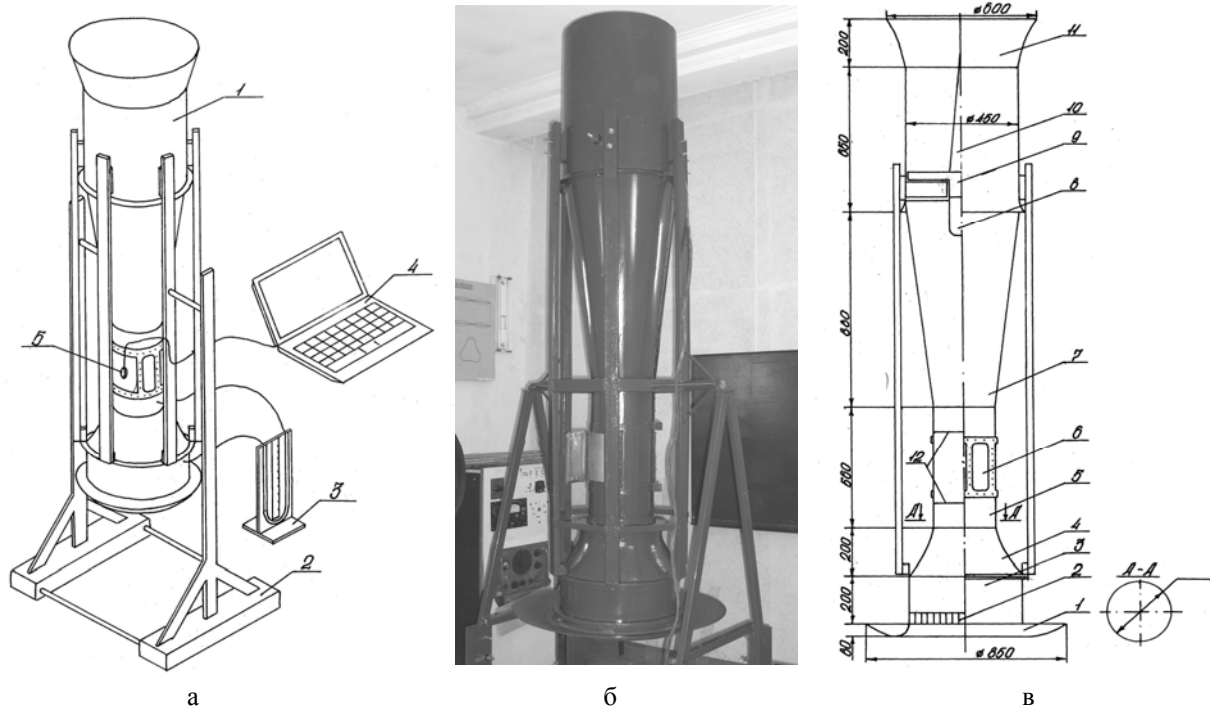


Рис. 2. Структурна схема (а); зображення (б) та схема аеродинамічного контуру (в) аеродинамічної труби ТН-1

На рис. 2, а:

- 1 – аеродинамічний контур;
- 2 – станина механізму повороту робочої частини;
- 3 – мікроманометр;
- 4 – комп'ютер;
- 5 – відеокамера.

На рис. 2, в:

- 1 – вхідний пристрій;
- 2 – хонейкомб;
- 3 – форкамера;
- 4 – сопло;
- 5 – робоча частина;

- 6 – вікно робочої частини;
- 7 – дифузор;
- 8 – двигун;
- 9 – вентилятор;
- 10 – обтічник;
- 11 – вихідний дифузор

Аеродинамічна труба сполучена зі станиною за допомогою шарнірного з'єднання, що дозволяє змінювати кут нахилу АДТ від  $0^\circ$  до  $180^\circ$  градусів з фіксацією в будь-якому положенні. Аеродинамічна труба виконана розбірною, складається з силового каркаса і корпусу. Силовий каркас забезпечує необхідну міцність АДТ і кріплення її до станини. Корпус труби металевий, складається з окремих модулів, скріплених між собою за допомогою фланцевих з'єднань. У всіх поперечних перетинах корпус має круглу форму. Силовий каркас та корпус труби скріплені між собою болтовими з'єднаннями.

Корпус труби складається з наступних основних частин: колектора, робочої частини, дифузора та корпусу агрегату приводу. Колектор, розташований перед робочою частиною, складається з форкамери і сопла. Ступінь звуження сопла з конструктивних і дослідницьких міркувань вибрано не високим, враховано, що поперечні турбулентні пульсації і обертання можуть збільшуватися зі збільшенням ступеня звуження. Робоча частина виконана закритою, площа поперечного перетину у напрямі потоку поступово збільшується з метою компенсації наростаючого прикордонного шару, що дозволяє зберігати швидкість потоку постійною вздовж робочої частини. Для полегшення доступу в проточний тракт, забезпечення зручності установки моделей і вимірювального обладнання, спостереження за ходом експерименту з боків робочої частини розташовані два вікна, закриті органічним склом. В середині циліндрового корпусу агрегату приводу розміщений вентилятор з профільованими лопатками направляючого апарату, втулка вентилятора закрита обтічником. Конструктивно, діючий макет аеродинамічної труби виконано за модульним принципом, що дозволяє в майбутньому вносити в конструкцію зміни, спрощує експлуатацію та обслуговування. Схема аеродинамічного контуру

ТН-1 з найменуванням основних частин представлена на рис. 2, в. Робоча частина 5 з вікном 6, що відкривається, забезпечує зручність установки моделей, спостереження за ходом і порівнянню простоту експерименту. Для забезпечення рівномірності потоку в робочій частині у форкамері труби встановлений хонейкомб 2 з розміром осередків  $45 \times 45$  мм. Вентилятор 9 труби металевий, п'ятилопатевий, з профільованими лопатками випрямляючого апарату, встановлений за дифузором. Для забезпечення рівномірності потоку у внутрішньому каналі труби втулка вентилятора закрита обтічником 10.

Однією з найважливіших вимог до аеродинамічних труб малих дозвукових швидкостей є вимога забезпечення широкого діапазону швидкості потоку в робочій частині у поєднанні з можливістю плавного її регулювання. Виконання цієї вимоги досягається або за рахунок зміни частоти обертання вентиляторів постійного кроку (ВПК), або застосуванням вентиляторів змінного кроку (ВЗК) при незмінній частоті обертання. До достоїнств ВЗК слід віднести можливість застосування асинхронних електричних двигунів, простих по конструкції, відносно дешевих, проте практична реалізація ВЗК в макеті ускладнена. Слід зауважити, що конструктивно простіше реалізується регулювання частоти обертання ВПК, при цьому застосовуються:

- схема Вард-Леонарда з електричним двигуном постійного струму незалежного збудження;
- механічний варіатор;
- магазини активних баластних опорів і реостатів для регулювання напруги в ланцюзі живлення електродвигуна;
- тиристорне управління споживаної потужності електродвигуна.

Найбільш часто для забезпечення широкого діапазону зміни швидкості потоку в робочій частині АДТ в якості приводу ВПК використовується електричний двигун постійного струму незалежного збудження, живлення якого здійснюється по класичній системі Вард-Леонарда з двоохступеневим управлінням (рис. 3, а). Окрім широкого діапазону регулювання частоти обертання дана схема дає можливість отримати плавний пуск приводного двигуна.

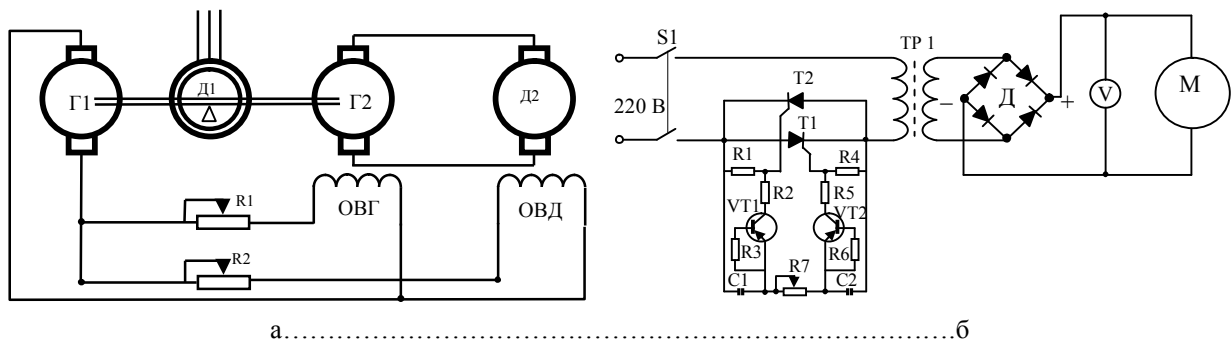


Рис. 3. Схема Вард-Леонарда (а) та тиристорного регулятора (б) енергетичної установки аеродинамічної труби

Асинхронний двигун Д1, що живиться від промислової лінії, приводить в рух два генератори Г1 і Г2, що знаходяться на одному валу. Потужність на виході генератора Г2 прямо пропорційно залежить від напруги на обмотці збудження генератора (ОВГ), яке, у свою чергу, регулюється реостатом R1. Обороти двигуна Д2 прямо пропорційно залежать від потужності, видаваної генератором Г2 і обернено пропорційно – від напруги на обмотці збудження двигуна (ОВД), регульованого реостатом R2. Генератор Г1 використовується для забезпечення живлення другорядних споживачів: обмоток збудження двигуна і генератора, автоматики енергетичної установки. Дана схема передбачає певну послідовність запуску силової установки і виходу її на робочі режими. Крім того, зважаючи на значні габарити, вона не застосовується при потужностях приводу більше 2 МВт.

Використання механічного варіатора пов'язано з значними конструктивними складнощами, а для великих потужностей стає неможливим. Магазили активних баластних опорів і реостатів для регулювання напруги в ланцюзі живлення електродвигуна не застосовуються для великих напруг, неекономічні, тому обмежені в своєму застосуванні.

Перевагою тиристорного управління споживаної потужності електродвигуна (рис. 3, б) є простота і доступність елементної бази, простота управління та відсутність потреби в додатковому налаштуванні.

Тиристорний регулятор потужності безпосередньо включений в первинну обмотку силового знижувального трансформатора ТР1 і діодного випрямляча Д. Напруга на двигуні (М) контролюється за допомогою вольтметра V.

Дана схема забезпечує плавний запуск аеродинамічної труби, а також зміну частоти обертання вентилятора в діапазоні 0...100% від максимальної потужності. Регулювання потужності відбувається при періодичному відключенні на фіксований проміжок часу первинної обмотки знижувального трансформатора на кожному напівперіоді струму, при цьому середнє значення струму зменшується.

Основні елементи регулятора (тиристори) Т1, Т2 включені зустрічно і паралельно один одному і відкриваються по черзі імпульсами струму, сформованими транзисторами VT1 та VT2.

Зміна опору резистора R7 дає можливість регулювати момент включення тиристорів від початку до кінця напівперіоду, що призводить до зміни загального струму в первинній обмотці трансформатора ТР1. На вторинній обмотці трансформатора утворюється напруга від 0 до 45 В, яке після випрямляча Д поступає на двигун М. Резистори та конденсатори R1, R2, R3, R4, R5, R6, C1, C2, S1 – допоміжні елементи, які не мають принципового значення.

Оскільки схема Вард-Леонарда застосована на АДТ Т-1 Харківського університету Повітряних Сил і повністю досліджена, то для проведення порівняльного аналізу при спорудженні діючого макета було обрано тиристорне управління споживаної потужності електродвигуна, а в якості приводу використаний електричний двигун ГС-1000, основні характеристики якого представлені у таб. 1.

Таблиця 1

Основні характеристики ГС-1000

Потужність	1000 Вт
Напруга	27,5±1 А
Сила току	36,4 А
Обороти в хвилину	3800–5900 об/хв
Передавальне число	7/3
Перевантаження 50%	на протязі 5 хв.

### Технічні характеристики

Методика визначення основних параметрів аеродинамічних труб представлена в роботах [2 – 11]. Важливим параметром, що характеризує аеродинамічні труби, є ступінь рівномірності повітряного потоку в робочій частині (ядрі потоку) труби. Відомо, що в ядрі потоку відхилення величини швидкісного натиску не повинне перевищувати ±2% від середнього значення:

$$\mu_i = \frac{q_i}{q_{\text{пер}}},$$

де  $\mu_i$  – коефіцієнт поля в досліджуваній точці робочої частини аеродинамічної труби;  $q_i$  – швидкісний напір в досліджуваній точці робочої частини аеродинамічної труби;  $q_{\text{пер}}$  – швидкісний напір, виміряний методом перепаду тиску.

Методика проведення експерименту за визначенням коефіцієнта поля в робочій частині аеродинамічної труби стандартна, незначна відмінність полягала у формі перетинів робочої частини і типі координатника.

На рис. 4 представлений отриманий в результаті обробки експериментальних даних графік зміни коефіцієнта поля вздовж осі z для центрального перетину робочої частини аеродинамічної труби ТН-1 за умови  $x = \text{const}$ ;  $y = \text{const}$ .

Таким чином, умови проведення аеродинамічних випробувань в аеродинамічній трубі ТН-1 відповідають нормальним умовам, встановленим для засобів вимірювань аеродинамічного випробувального комплексу (ГОСТ 8.395-80). Крім того, якість потоку в ТН-1 дещо вища якості потоку Т-1 [11].

Основні параметри аеродинамічної труби ТН-1 зведено до табл. 2.

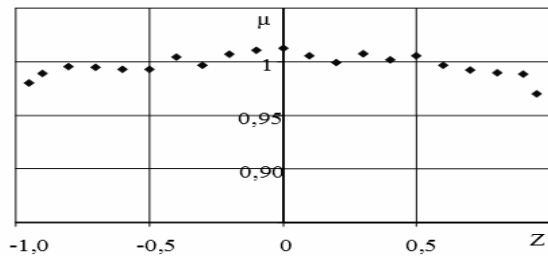


Рис. 4. Графік зміни коефіцієнта поля вздовж осі z для центрального перетину робочої частини аеродинамічної труби ТН-1

Таблиця 2  
Параметри аеродинамічної труби ТН-1

Розміри робочої частини:	
Діаметр	0,25 м
Висота робочої частини	0,56 м
Ступінь підтискання сопла	3,25
Діаметр вентилятора	0,45 м
Відносний діаметр втулки вентилятора	0,5
Число оборотів вентилятора /максимальне/	2500 об/хв.
Потужність приводного електромотора	1 кВт
Швидкість потоку в робочій частині:	
Максимальна	15 м/с
Мінімальна	1 м/с
Аеродинамічна якість труби	0,35

### Функціонування

Змінний кут нахилу робочої частини передбачає наступні варіанти використання ТН-1:

- проведення тренувань вільного падіння;
- політ під парашутом з поступальною швидкістю, випробування парашутних систем типу «крило»;
- випробування купольних парашутних систем;
- проведення аеродинамічних експериментів.

На рис. 2, а, б представлена схема основного варіанту використання АДТ з вертикальним станом робочої частини – тренування вільного падіння парашутистів і фотографія зовнішнього вигляду ТН-1 в зібраному варіанті.

На рис. 5, а представлена схема варіанту використання АДТ з похилою робочою частиною – тренування парашутистів на режимах польоту з парашутом типу "крило".

В повнорозмірній АДТ при цьому, можлива імітація навантаження на парашутиста через систему підвіски, тактильні відчуття при управляючих діях, у тому числі, при приземленні (рухома платформа в нижній частині).

В сукупності все це дозволяє безпечно тренувати основні режими польоту парашутиста з програмною зміною типу парашута і зовнішньої обстановки.

Крім того, зміна кута нахилу дозволяє проводити дослідження літакових моделей в режимі вільного польоту (штопорні випробування).

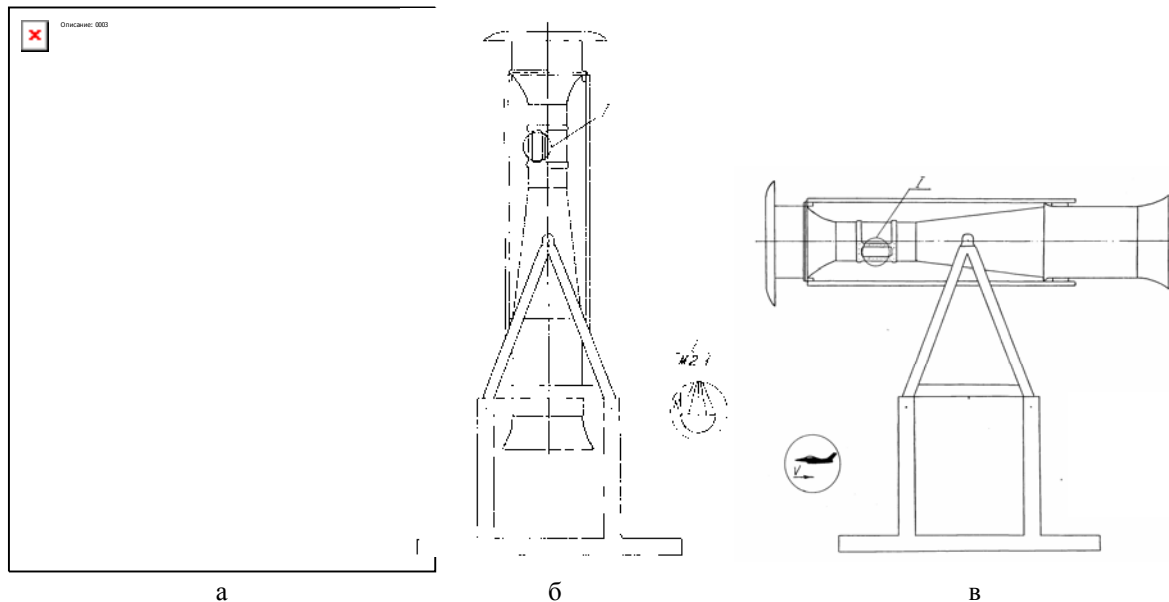


Рис. 5. Функціональні можливості аеродинамічної труби ТН-1 при різних кутах нахилу робочої частини: а –  $0^{\circ} < \beta < 90^{\circ}$ ; б –  $\beta = 180^{\circ}$ ; в –  $\beta = 90^{\circ}$

На рис. 5, б представлена схема варіанту використання АДТ з похилою робочою частиною – випробування купольних парашутних систем. Перевагою даного варіанту є зручність розміщення і гарантованість наповнення купольної системи. В цьо-

му положенні труби можуть проводитись також випробування моделей аеродинамічних об'єктів для визначення їх лобового опору. На рис. 5, в представлена схема традиційного варіанту використання АДТ з горизонтальною робочою частиною.

## Висновки

Таким чином, експериментально доведено, що якість потоку в аеродинамічній трубі із замкнутим контуром Т-1 поступає якості потоку в аеродинамічній трубі з розімкненим контуром ТН-1, проте цим погіршенням якості у разі її використання як парашутного тренажера можна знехтувати.

Необхідно зазначити, що при виборі схеми аеродинамічної труби для парашутного тренажера чинник якості потоку не є визначальним, при цьому для вертикальної аеродинамічної труби не потрібна розробка нових функціональних вимог, достатньо вимагати виконання нормальних умов, встановлених для засобів вимірювань аеродинамічного випробувального комплексу та існуючих державних стандартів.

## Список літератури

1. Харитонов А.М. Техника и методы аэрофизического эксперимента. – Ч. 1. Аэродинамические трубы и газодинамические установки: [учебник] / А.М. Харитонов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – 220 с.
2. Аеродинамічна труба зі змінним кутом нахилу робочої частини для проведення спеціальних досліджень / О.М. Коломейченко, Є.В. Спіркін, Є.О. Українець, І.І. Шабрат // Тези доповіді Х наук.-техн. конф. "Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах". – Феодосія: ДНВЦ ЗСУ, 2010. – 169 с.
3. Радциг А.Н. Экспериментальная гидроаэромеханика / А.Н. Радциг. – М.: МАИ, 2004. – 296 с.
4. Закс Н.А. Основы экспериментальной аэродинамики / Н.А. Закс. – М.: Оборонгиз, 1953. – 371 с.
5. Соляник П.Н. Экспериментальная аэродинамика: Учеб. пособие по лабораторному практикуму / П.Н. Соляник, М.Л. Сургалю, В.В. Чмовж. – Х.: ХАИ, 2007. – 96 с.
6. Дубов Б.С. Моделирование условий полета летательных аппаратов при испытаниях в аэродинамических трубах: Учеб. пособие / Б.С. Дубов, А.Н. Радциг, Н.В. Семенчиков, О.В. Яковлевский. – М.: МАИ, 2004. – 76 с.
7. Дубов Б.С. Сертификационное обеспечение аэродинамических испытаний: учеб. пособ. / Б.С. Дубов, А.Н. Радциг, Н.В. Семенчиков, О.В. Яковлевский. – М.: МАИ, 2004. – 84 с.
8. Радциг А.Н. Модельный эксперимент в аэродинамических трубах / А.Н. Радциг, Н.В. Семенчиков. – М.: МАИ, 1992. – 65 с.
9. Пэнкхерст Р. Техника эксперимента в аэродинамических трубах / Р. Пэнкхерст, Д. Холдер. – М.: Издательство иностранной литературы, 1955. – 668 с.
10. Газаев В.В. Моделирование условий полета беспилотных летательных аппаратов в аэродинамических трубах / В.В. Газаев, Е.А. Українець, І.І. Шабрат // V наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба "Новітні технології для захисту повітряного простору", 15-16 квітня 2009 року: тези доповідей. – Х.: ХУ ПС ім. І. Кожедуба, 2009. – 51 с.
11. Анипко О.Б. Экспериментальное определение значенний критериев совершенства аэродинамической трубы Т-1 Харьковского университета Воздушных Сил / О.Б. Анипко, В.В. Газаев, А.Р. Джимиев, Е.В. Спіркін, Е.А. Українець, І.І. Шабрат // Аэрогидродинамика и аэроакустика: проблемы и перспективы. – Х.: Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», 2009. – № 3. – С. 28-32.

Надійшла до редколегії 29.09.2011

Рецензент: канд. техн. наук, проф. Ю.І. Миргород, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТРУБА МАЛЫХ ДОЗВУКОВЫХ СКОРОСТЕЙ ТН-1 С ПЕРЕМЕННЫМ УГЛОМ НАКЛОНА РАБОЧЕЙ ЧАСТИ

Е.А. Українець, Е.І. Жилин, І.І. Шабрат, В.В. Сидоров, Е.В. Спіркін, А.С. Луценко

Построенный действующий макет – аэродинамическая труба ТН-1 отличается переменным углом наклона рабочей части. Изменение угла наклона рабочей части полноразмерной аэродинамической трубы позволит расширить номенклатуру режимов для тренировки парашютистов на режимы полета с парашютом типа «крыло». Реализация изменения угла наклона рабочей части при проектировании аэродинамических парашютных тренажеров позволит тренировать основные режимы полета парашютиста с программным изменением типа парашюта и внешней обстановки.

**Ключевые слова:** аэродинамическая труба, макет, парашютная подготовка, качество аэродинамической трубы

## WIND-CHANNEL OF THE SMALL SUBSONIC SPEEDS TN-1 WITH THE VARIABLE ANGLE OF SLOPE OF WORKING PART

E.A. Ukrainets, E.I. Zhilin, I.I. Shabrat, V.V. Sidorov, E.V. Spirkin, A.S. Lucenko

Built as operating to the model a wind-channel TN-1-1 differs by the variable angle of slope of working part. The change of angle of slope of working part wind-channel will allow to extend the nomenclature of the modes for training of parachutists on the modes of flight with the parachute of type «wing». Realization of change of angle of slope of working part at planning of the aerodynamic parachute trainers will allow to train the basic modes of flight of parachutist with the program change of type of parachute and external situation.

**Keywords:** wind-channel, model, parachute preparation, quality of wind-channel.