

УДК 536.24

**ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКУ НА
РОБОЧІЙ ДІЛЯНЦІ РОЗІМКНЕНОЇ АЕРОДИНАМІЧНОЇ ТРУБИ
ДОЗВУКОВИХ ШВИДКОСТЕЙ**

В. Г. Горобець, доктор технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Ю. О. Богдан, кандидат технічних наук, доцент

Херсонська державна морська академія

В. І. Троханяк, кандидат технічних наук, старший викладач

Є. О. Антипов, кандидат технічних наук, старший викладач

*М. Ю. Масюк, аспірант**

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: masiuk.mykola@gmail.com

Анотація. Метою дослідження було вимірювання і аналіз полів швидкості та тиску і визначення їх локальних та середніх значень у робочій ділянці досліджуваної аеродинамічної труби.

Проведено експериментальне дослідження гідродинамічних характеристик розімкнутої аеродинамічної труби дозвукових швидкостей. Проведено вимірювання полів швидкості і тиску у робочій ділянці аеродинамічної труби. Визначено середню швидкість і тиск потоку повітря в робочій ділянці аеродинамічної труби. Визначено область, у якій локальні розподіли швидкостей і тисків мають рівномірний характер. При подальших дослідженнях дослідних зразків в аеродинамічній трубі вимірювання слід проводити в зоні рівномірного розподілу вказаних величин,

Ключові слова: аеродинамічна труба, експериментальне дослідження, робоча ділянка, поле швидкостей, поле тисків

Актуальність. Експериментальне дослідження аеродинамічних та теплотехнічних характеристик багатьох об'єктів у лабораторних умовах виконується за допомогою аеродинамічної труби. Аеродинамічна труба – це пристрій, що створює потік газу (в більшості випадків повітря) з метою вивчення його впливу на об'єкт обтікання, а також експериментального вивчення

аеродинамічних та теплових характеристик при обтіканні досліджуваних об'єктів. Застосування труб в аеродинаміці базується на принципі оборотності рухів і теорії подібності фізичних явищ. Об'єктами випробувань в аеродинамічних трубах є моделі натурних літальних апаратів або їх елементів, вітрогенераторів (геометрично подібні, пружно подібні, термічно подібні і т. д.), натурні об'єкти або їх елементи, зразки матеріалів (винос матеріалів, каталітичність поверхні і т. д.). В теплотехніці аеродинамічна труба застосовується для досліджень теплообміну, аеродинамічного опору і закономірностей обтікання газовим потоком пучків труб та інших теплообмінних поверхонь.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аеродинамічна труба складається з одного або декількох вентиляторів (або інших пристроїв для нагнітання або всмоктування повітря), які нагнітають або всмоктують повітря в трубу, де знаходиться модель досліджуваного тіла, тим самим створюється ефект руху тіла в повітрі з великою швидкістю (принцип обернення руху) або натікання потоку на досліджуваний об'єкт.

Залежно від швидкості потоку в робочій частині аеродинамічні труби діляться на наступні види:

- а) дозвукові ($0 < M < 0,8$);
- б) не звуковою і трансзвукові ($0,8 < M < 1,2$);
- в) надзвукові ($1,2 < M < 5$);
- г) гіперзвукові ($M > 5$).

За конструктивними ознаками аеродинамічні труби можна розділити на два класи:

- а) труби незамкнутого типу;
- б) труби замкнутого типу.

По виду робочої частини розрізняються труби:

- а) з відкритою робочою частиною;

- б) із закритою робочою частиною;
- в) з герметичною камерою (камера Ейфеля).

Також існують окремі групи аеродинамічних труб:

- Високотемпературні - додатково дозволяють вивчати вплив високих температур і пов'язаних з ними явищ дисоціації і іонізації газів.
- Висотні - для дослідження обтікання моделей розрідженим газом (імітація польоту на великій висоті).
- Аероакустичні - для дослідження впливу акустичних полів на міцність конструкції, роботу приладів і т. д.

Випробування, проведені на аеродинамічних трубах, в основному вирішують такі завдання:

1. Дослідження впливу форми обтічного об'єкта газом на аеродинамічні характеристики цього об'єкта в залежності від швидкості набігаючого потоку і положення тіла в просторі.
2. Дослідження повітряних машин - газових турбін, компресорів, гвинтів, вітряків, вентиляторів і т.п.
3. Дослідження характеристик двигунів (поршневих турбореактивних, прямоточних і ін.).
4. Дослідження динаміки польоту літаючого апарату.
5. Дослідження впливу аеродинамічних сил на пружні характеристики конструкцій літаючого апарату (наприклад, дослідження флатера крил літаків).
6. Фізичні дослідження, пов'язані з рухом повітря в різних умовах (дослідження пограничного шару, просторових течій і т.п.).
7. Методичні дослідження, пов'язані зі створенням аеродинамічних труб, як фізичних установок і з розробкою методів випробувань в трубах і обробки отриманих результатів.

Розімкнена аеродинамічна труба складається із вхідного колектора, вирівнювальної решітки (хонейкомба), детурбулізуючої сітки, сопла,

стабілізуючої і робочої ділянок, заспокійливої ділянки, розтруба або дифузора і вентиляторів.

Хонейкомб є сотоподібними ґратами, які можуть бути набрані з тонких металевих трубок або виконані у вигляді великої кількості коротких каналів шестигранної форми. Його призначення - вирівнювати скоси потоку і руйнувати великі вихори.

Детурбулізуючі сітки сприяють вирівнюванню поля швидкостей і зменшенню початкової турбулентності потоку в робочій частині труби.

Сопло служить для розгону потоку повітря від мінімальної до розрахункової швидкості на виході в робочу частину.

Поперечний переріз сопла може бути круглим, еліптичним, прямокутним, квадратні і восьмигранним. Форма поперечного перерізу робочої частини залежить від виду моделей, які передбачається дослідити. Наприклад, аеродинамічні труби, призначені для випробувань моделей літаків, часто мають еліптичний переріз. У цей переріз добре вписується проекція літака. Крила розташовуються уздовж великої півосі еліпса. Для дослідження вітрогенераторів може використовуватись круглий або прямокутний переріз сопла.

Багато аеродинамічних труб, призначених для випробувань автомобілів, макетів будинків, мають переріз робочої частини у формі прямокутника або багатокутника, наприклад, восьмикутника.

У аеродинамічній трубі може бути більше однієї робочої частини. Додаткова робоча частина має інший поперечний переріз і інші характеристики потоку. Робоча ділянка - це простір між стабілізуючою і заспокійливою ділянками каналів. Тут встановлюються моделі для випробування, тут же розташовуються аеродинамічні ваги. Газовий потік в робочій частині труби повинен мати рівномірне поле швидкостей і тисків.

Відкрита робоча частина забезпечує вільний доступ до моделі і зручність спостережень. Але для таких труб необхідна додаткова потужність на

заповнення втрат, викликаних взаємодією вільної струменя з навколишнім повітрям. У трубах замкнутого типу зі швидкостями до 100-150 м / с зазвичай застосовують відкриту робочу частину.

З метою зменшення потрібної потужності приводу для труб з великими швидкостями застосовують закриту робочу частину. Аеродинамічні характеристики потоку в трубі із закритою робочою частиною вище, ніж в трубі з відкритою робочою частиною.

Уже в перших аеродинамічних трубах стало зрозуміло, що для отримання однорідного повітряного потоку необхідно застосовувати спеціальні пристрої. Основним пристроєм для отримання рівномірного потоку є сопло. Сопло розташовується перед робочою частиною і являє собою (для дозвукових аеродинамічних труб) канал, що звужується. Синонімами слова «сопло» для дозвукової аеродинамічної труби є слова «конфузор» і «колектор». Крім створення однорідного потоку у сопла є ще одна функція. Сопло служить переходом від найширшої частини труби з малими швидкостями до найвужчої частини з високою швидкістю.

Часто в якості прикладу теоретичної формули для контуру сопла приводять формулу Вітошинського, отриману з використанням моделі ідеальної рідини для сопла, що має форму поперечного перерізу у вигляді кола.

З умов зворотності руху в аеродинамічних трубах слідує, що повітряний потік в тій частині труби, де встановлюються зразки, що досліджуються, тобто у робочій її частині, повинен мати рівномірні поля швидкостей і тисків. Для забезпечення таких умов необхідно проектувати аеродинамічний контур труби і пристроїв, що розташовані у трубі, таким чином, щоб вони не створювали умов для виникнення у потоці повітря збурень (відриву пограничного шару і утворення вихорів, скосів потоку і т.п.). Поява збурень у будь-якій частині труби, буде спотворювати потік, порушувати його рівномірність далеко вниз за течією, в тому числі і у робочій ділянці. Побудові і вдосконаленню

аеродинамічних труб присвячена значна кількість робіт [1-5] проте кожна труба являється оригінальною і потребує обов'язкового попереднього вивчення її характеристик до початку виконання досліджень з дослідними зразками [6].

Основною частиною будь-якої аеродинамічної труби являється її робоча ділянка, цінність якої для експериментальних досліджень визначається характеристиками її полів швидкості і тиску. Тому їх визначення являється необхідною і обов'язковою умовою з підготовки (тарування) труби перед виконанням подальших досліджень.

Мета дослідження – вимірювання та аналіз полів швидкості і тиску та визначення їх локальних і середніх значень у робочій ділянці досліджуваної аеродинамічної труби, виготовленої на кафедрі теплоенергетики Національного університету біоресурсів і природокористування України.

Матеріали і методи дослідження. Загальний вигляд аеродинамічної труби, виготовленої на кафедрі теплоенергетики НУБіП України, представлений на рис. 1.



а

б

в

Рис. 1. Аеродинамічна труба розімкнутого типу дозвукових швидкостей:

а – загальний вигляд; б – хонейкомб; в – робоча ділянка

Схема і основні розміри аеродинамічної розімкнутої труби дозвукових швидкостей наведені на рис. 2. Аеродинамічна труба складається з ділянок, що

утворюють проточну частину - колектора (1), хонейкомба (2), сопла Вітошинського (3), стабілізуючої ділянки (5), робочої ділянки (6), заспокійливої ділянки (8), розтруба (9) і одного осьового вентилятора (10) типу ВО-46-130-5,6-0,1 продуктивністю 11000 м³/год і напором до 370 Па.

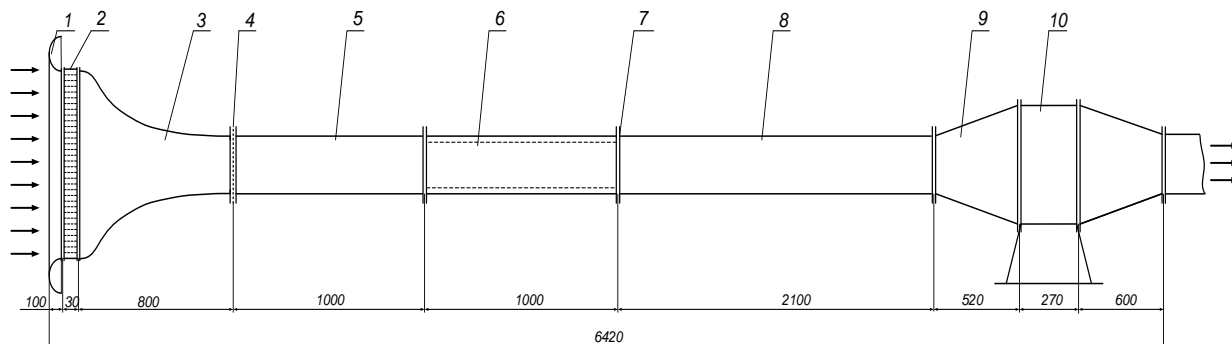


Рис. 2. Схема розіткненої аеродинамічної труби дозвукових швидкостей:

1 – колектор; 2 – хонейкомб; 3 – вхідне сопло Вітошинського; 4 – сітка;

5 - стабілізуюча ділянка; 6 – робоча ділянка; 7 – фланець; 8 – заспокійлива ділянка; 9 – розтруб; 10 – осьовий вентилятор

який приводиться у обертання трьохфазним асинхронним двигуном потужністю 2,2 кВт

Аеродинамічна труба працює за принципом всмоктування і представляє собою канал квадратного перерізу (300×300 мм). Стінки каналу (короба) виготовлені із оцинкованої жерсті, а робоча ділянка з органічного скла. Рівномірність розподілу швидкостей у вхідному перерізі труби досягається за рахунок профільованого за формулою Вітошинського вхідного сопла, при цьому з метою зменшення опору і нерівномірності потоку на вході у трубу встановлений плавний круговий колектор і хонейкомб, який вирівнює потік у напрямку руху, розбиваючи крупні вихори, а також зменшує нерівномірність розподілу повздовжніх швидкостей. За соплом Вітошинського знаходиться стабілізуюча ділянка призначена для вирівнювання полів швидкості і статичного

тиску перед робочою ділянкою, власне у якій і розміщується досліджуваний об'єкт.

Швидкість повітряного потоку регулюється за допомогою перетворювача частоти струму, який регулює частоту обертання ротора електродвигуна і відповідно частоту обертання робочого колеса вентилятора, змінюючи при цьому витрату повітря.

Дослідження полів швидкості і тиску у робочій ділянці виконувалися за допомогою термоанемометра АМ-70 і трубки Піто-Прандтля. Щуп термоанемометра або трубка переміщались у площині поперечного перерізу робочої ділянки, по ширині (координата x) і по висоті (координата y). Переміщення щупа термоанемометра та трубки Піто-Прандтля в фіксованих точках потоку, записувались з показів термоанемометра АМ-70 і мікроманометра ММН ММН-2400(5) класом точності 1,0.

Рівномірність розподілу швидкостей у робочій ділянці труби характеризується величиною співвідношення,

$$\frac{\Delta v}{v_{cp}} = \frac{v - v_{cp}}{v_{cp}}, \quad (1)$$

де v – місцева швидкість у певній точці поперечного перерізу робочої ділянки аеродинамічної труби, м/с; v_{cp} – середня швидкість у поперечному перерізі робочої ділянки аеродинамічної труби, м/с.

Аналогічна характеристика використовується і для дослідження поля тисків.

Повна обробка результатів дослідження проводилась за допомогою програм Microsoft Excel і Matcad.

Результати досліджень та їх обговорення. Побудовані на основі результатів вимірювання поля швидкостей у поперечному перерізі робочої ділянки аеродинамічної труби без встановленого хонейкомба для трьох результатів вимірювання наведені на рис. 3. Як випливає з рис. 3, рівномірніший

розподіл спостерігається у центральній зоні перерізу. На зовнішній границі робочої ділянки внаслідок впливу стінок, швидкість падає до нуля і у цій області потік не являється рівномірним. Для зменшення нерівномірності швидкості на вході в сопло встановлено спрямляючі решітку – хонейкомб, яка представляє собою системи трубок діаметром 10 мм і довжиною 30 мм з тонкими стінками. Трубки заповнюють увесь переріз сопла.

На рис. 4 наведені поля швидкостей у поперечному перерізі робочої ділянки аеродинамічної труби зі встановленим хонейкомбом. Як випливає з рис. 3, зона рівномірного розподілу збільшилась причому є більш монотонною у порівнянні з полями швидкостей для труби без хонейкомбу. Середня швидкість потоку повітря у зоні рівномірного розподілу складає 17 м/с.

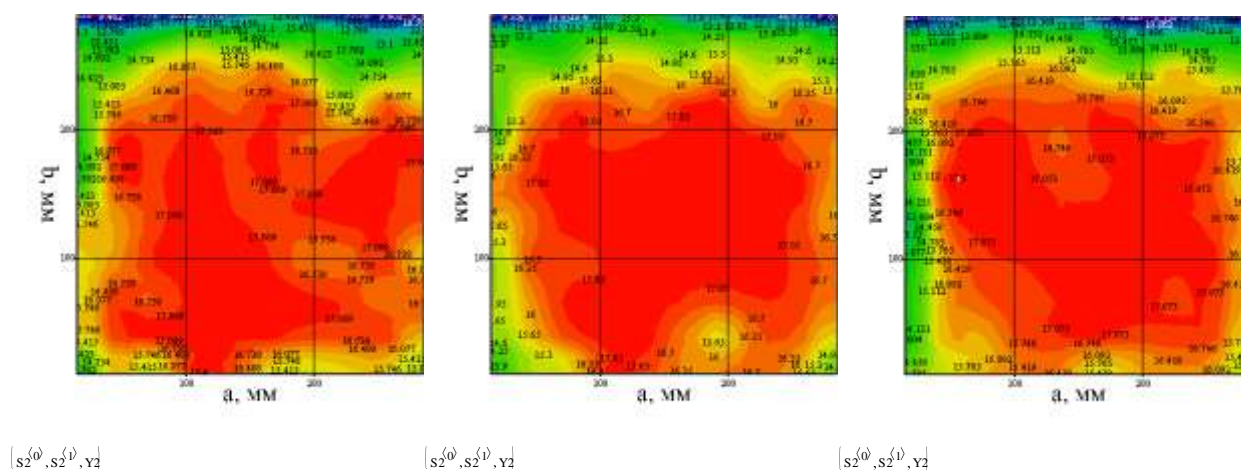


Рис. 3. Поля швидкостей у поперечному перерізі робочої ділянки аеродинамічної труби без хонейкомба

Значення тисків при встановленому хонейкомбі (рис. 5) у поперечному перерізі є змінними в невеликому діапазоні, співвідношення різниці місцевого і середнього тиску до величини середнього тиску не перевищує 1 %, що свідчить про достатньо рівномірний розподіл. Середній тиск у центральній частині перерізу складає 22 Па.

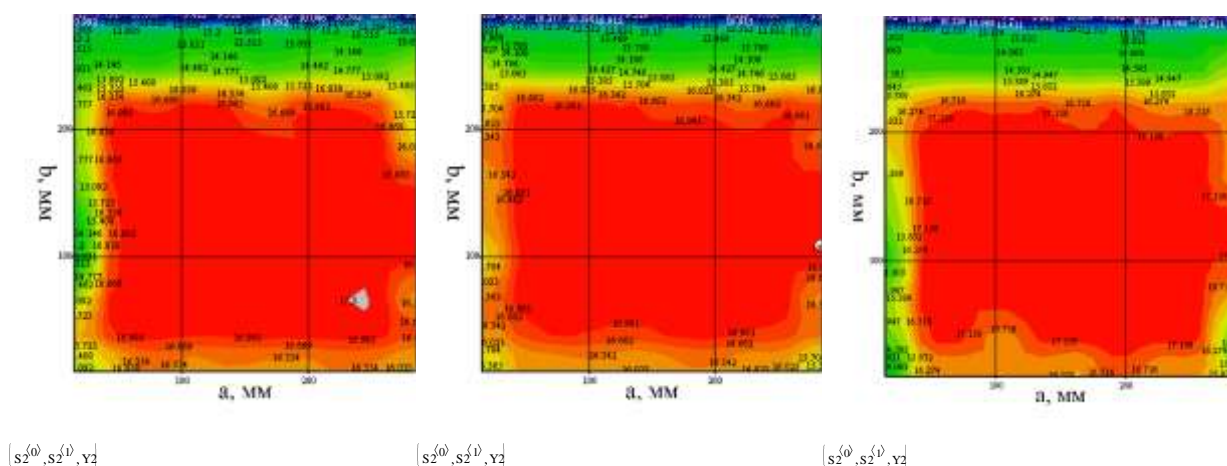


Рис. 4. Поля швидкостей у поперечному перерізі робочої ділянки аеродинамічної труби зі встановленим хонейкомбом

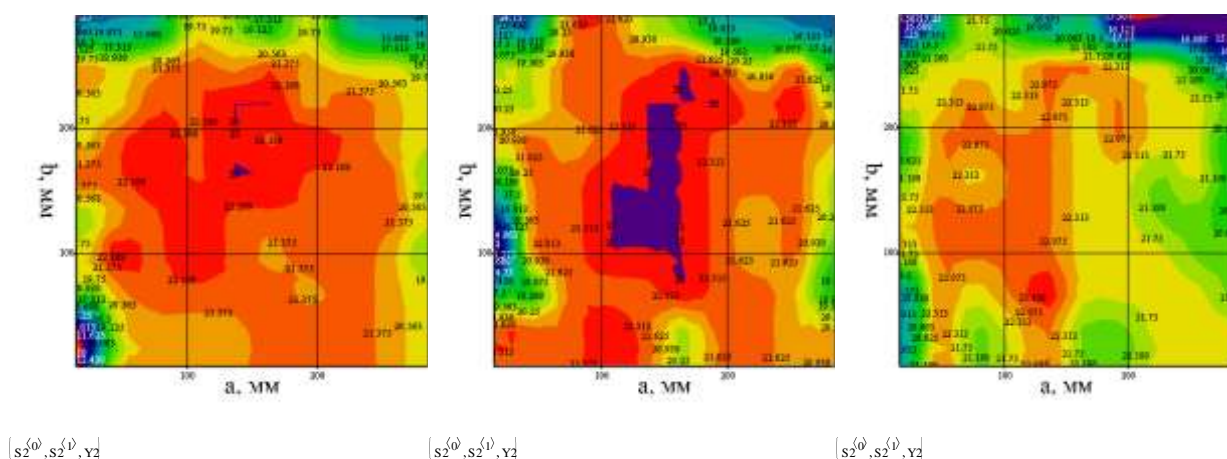


Рис. 5. Поля тисків у поперечному перерізі робочої ділянки аеродинамічної труби

Достовірність результатів вимірювання підтверджується повторюваністю виконання експерименту і точністю вимірювального обладнання.

Таким чином, на робочій ділянці аеродинамічної труби є рівномірний розподіл поля швидкостей і тисків за винятком невеликих ділянок поблизу стінок, що дає можливість проводити дослідження гідродинамічних і теплових характеристик повітряного потоку при обтіканні об'єктів різного призначення.

Висновки і перспективи. Досліджені основні гідродинамічні характеристики розімкненої аеродинамічної труби дозвукових швидкостей.

Проведено вимірювання полів швидкості і тиску у робочій ділянці аеродинамічної труби, отримано та проаналізовано експериментальні результати досліджень. Середні швидкість і тиск потоку повітря в зоні рівномірного розподілу на робочій ділянці досліджуваної аеродинамічної труби складають 17 м/с і 22 Па відповідно. При подальших дослідженнях дослідних зразків в аеродинамічній трубі вимірювання слід проводити у рівномірній зоні, що має умовні обмеження зліва і справа 25 мм, зверху і знизу відповідно 70 і 20 мм. Площа зони рівномірного розподілу потоку складає $250 \times 210 \text{ мм}^2$, що становить 58 % від загальної площі поперечного перерізу.

Список літератури

1. Повх И. Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении / И. Л. Повх – М: Машиностроение, 1965. – 480 с.
2. Идельчик И. А. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. А. Идельчик – Изд. 3-е. Москва: Машиностроение, 1992. – 672 с.
3. Харитонов А. М. Техника и методы аэрофизического эксперимента / А. М. Харитонов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 643 с.
4. Pankhurst R. C. Wind-tunnel Technique / R. C. Pankhurst, D. W. Holder. – London: Pitman, 1968. – 762 p.
5. Lerner J.C. Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research / J. C. Lerner. – InTech, 2011. – 709 p.
6. Специальный физический практикум по физической гидро- и аэродинамике / Исатаев С. И., Аскарлова А. С., Болегенова С. А. и др.– Алматы: Казак университеті, 2015. – 226 с.

References

1. Povkh, I. L. (1965). Aerodinamicheskiy eksperiment v mashinostroyenii [Aerodynamic experiment in mechanical engineering]. Moscow: Mashinostroyeniye, 480.
2. Idel'chik, I. A. (1992). Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam [Handbook of hydraulic resistances]. Moskva: Mashinostroyeniye, 672.
3. Kharitonov, A. M. (2016). Tekhnika i metody aerofizicheskogo eksperimenta [Technique and methods of aerophysical experiment]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 643.
4. Pankhurst, R. C., Holder, D. W. (1968). Wind-tunnel Technique. London: Pitman, 762.

5. Lerner J.C. (2011). Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research. InTech, 709.

6. Isatayev, S. I., Askarova, A. S., Bolegenova, S. A. et al. (2015). Spetsial'nyy fizicheskiy praktikum po fizicheskoy gidro- i aerodinamike [Special Physical Workshop on Physical Hydro and Aerodynamics]. Almaty: Kazak universiteti, 226.

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА НА РАБОЧЕМ УЧАСТКЕ РАЗОМКНУТОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЫ ДОЗВУКОВОЙ СКОРОСТИ

В. Г. Горобец, Ю. А. Богдан, В. И. Троханяк, Е. А. Антипов, Н. Ю. Масюк

Аннотация. Целью исследования было измерение и анализ полей скорости и давления и определения их локальных и средних значений на рабочем участке исследуемой аэродинамической трубы.

Проведено экспериментальное исследование гидродинамических характеристик разомкнутой аэродинамической трубы дозвуковых скоростей. Проведены измерения полей скорости и давления в рабочей области аэродинамической трубы. Определены средняя скорость и давление потока воздуха в рабочей области аэродинамической трубы. Определена область, в которой локальные распределения скоростей и давлений имеют равномерный характер. При дальнейших исследованиях опытных образцов в аэродинамической трубе измерения следует проводить в зоне равномерного распределения указанных величин,

Ключевые слова: *аэродинамическая труба, экспериментальное исследование, рабочий участок, поле скоростей, поле давлений*

STUDY OF THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE PIPE IN THE WORKING DIVISION OF THE EXISTING AERODYNAMIC PIPE SUPPLEMENTARY SPEEDS

V. Gorobets, Yu. Bogdan, V. Trokhanyak, I. Antipov, M. Masyuk

Abstract. *The purpose of the study was to measure and analyze the fields of velocity and pressure and to determine their local and average values in the working section of the studied aerodynamic tube.*

An experimental study of the hydrodynamic characteristics of an open aerodynamic tube of subsonic velocities has been carried out. Measurement of velocity and pressure fields in the aerodynamic pipe work area. The average speed and pressure of the air flow in the aerodynamic pipe work area are determined. The region in which the local distributions of velocities and pressures are of uniform character are determined. For further studies of experimental samples in an aerodynamic tube, measurements should be made in the zone of uniform distribution of these quantities,

Key words: *aerodynamic tube, experimental study, working area, velocity field, pressure field*