МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

Институт высокоточных систем им. В.П. Грязева

Кафедра «Ракетное вооружение»

Утверждено на заседании кафедры
«Ракетное вооружение»
«_10_»___01___2023 г., протокол № 5

И.о. зав. кафедрой

_____ А.В. Смирнов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению лабораторных работ
по дисциплине (модулю)

«Основы физического эксперимента»

основной профессиональной образовательной программы
высшего образования – программы специалитета

по специальности
24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей

со специализацией
Проектирование ракетных двигателей твердого топлива

Форма обучения: очная

Идентификационный номер образовательной программы: 240502-01-23

Тула 2023 год

Разработчик методических указаний

Разработчик:

Стреляев С.И., профессор, д.т.н., доцент

(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание) *(подпись)*

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1.....4
Лабораторная работа №2.....9
Лабораторная работа №3.....16
Лабораторная работа №4.....23
Список литературы.....31

Лабораторная работа №1

Определение критериев подобия процессов конвективного теплообмена

1. Цель и задачи выполнения лабораторной работы

Выполнение лабораторной работы призвано сыграть важную роль в развитии самостоятельной работы студентов и углубить знание данной дисциплины (модуля). Работа позволяет путем решения конкретных задач приобщить студентов к практической деятельности, привить им элементы научно-исследовательского творчества. кроме того, лабораторная работа должна научить студентов пользоваться справочной литературой, таблицами.

2. Основы теории

При физическом моделировании теплообмена часто используется аналогия Рейнольдса, согласно которой безразмерный коэффициент теплообмена пропорционален коэффициенту трения

$$St = \frac{c_f}{2}, \qquad (1)$$

где

$St = \frac{Nu}{\mathrm{Re}\cdot \mathrm{Pr}} = \frac{\alpha}{\rho \cdot c_p V}$ - критерий Стантона; $Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}$ - критерий Нуссельта; α - коэффициент теплообмена; λ - коэффициент теплопроводности текучей среды; l – характерный размер поверхности теплообмена; ρ - плотность текучей среды; c_p – теплоемкость текучей среды v – средняя скорость текучей среды.

Коэффициент трения характеризует касательное напряжение на стенке и по определению он равен

$$c_f = \frac{2s}{\rho V^2}. \qquad (2)$$

При безотрывном течении в трубе, когда гидравлическое сопротивление определяется силами трения, касательное напряжение на стенке s можно определить, зная коэффициент гидравлического сопротивления ξ для стабилизированного течения.

Действительно, разность давлений в двух поперечных сечениях трубы 1 и 2 $\Delta p = p_1 - p_2$ при стабилизированном течении идет на преодаление трения на стенках (в начальном участке еще на дополнительно на перестройку потока). тогда

$$\Delta p \cdot f = s \cdot F, \qquad (3)$$

где f – площадь поперечного сечения трубы; f – поверхность трубы между сечениями 1 и2.

Согласно закону Дарси

$$\Delta p = \xi \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho V^2}{2}. \qquad (4)$$

тогда

$$s = \Delta p \frac{f}{F} = \xi \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho V}{2} \cdot \frac{f}{F}.$$

для круглой трубы

$$\frac{L}{d} \cdot \frac{f}{F} = \frac{1}{4}.$$

отсюда

$$s = \frac{\xi}{8} \rho V^2. \qquad (5)$$

подставляя последнее соотношение в уравнение (2), а затем в зависимость (1), получаем:

$$St = \frac{1}{8} \xi. \qquad (6)$$

При физическом моделировании теплообмена опытному определению подлежит коэффициент гидравлического сопротивления ξ.

Учитывая, что коэффициент гидравлического сопротивления является функцией числа Рейнольдса, зависимость между этими величинами обычно представляют в виде степенных функций, например:

$$\xi = k \frac{1}{\mathrm{Re}^n}, \qquad (7)$$

где k и n являются постоянными безразмерными числами.

Такого рода зависимости являются чисто эмпирическими. они применимы лишь в тех пределах изменения аргумента, в которых подтверждены опытом. экстраполяция этих зависимостей на большие или меньшие значения определяющих параметров, строго говоря, недопустима.

Логарифмируя выражение (7), получим

$$\ln \xi = \ln k - n \ln \mathrm{Re}.$$

обозначая lnξ через y, ln re через x и lnk через a, можно написать

$$Y = A - nX$$

последнее уравнение является уравнением прямой линии. показатель степени n представляет собой тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс. следовательно, значение n можно определить с помощью графического представления опытных данных в координатах lnξ = f (ln re). показатель степени n равен:

$$n = tg\varphi = \frac{a}{b}.$$

Постоянная k определяется из уравнения $k = \xi \cdot \mathrm{Re}^n$, которому удовлетворяет любая точка прямой.

Подставив (7) в выражение (6), получим критериальную зависимость для коэффициента теплообмена

$$St = \frac{k}{8} \cdot \frac{1}{\mathrm{Re}^n} \qquad (8)$$

3. Основное содержание работы

Работа выполняется на модуле №1, который представляет собой круглую трубу оборудованную входным измерительным соплом, по длине которой имеются 6 отверстий со штуцерами для отбора давлений.

Входное сопло снабжено приемником воздушного давления, с помощью которого определяется скорость воздуха

$$V = \sqrt{2 \cdot B \cdot k \frac{l_i \gamma_B}{\rho_H}}\ , \qquad (9)$$

где b – скоростной коэффициент приемника воздушного давления (определяется посредством тарировки пвд); l_i – показания микроманометра ммн-7; $\gamma_в = \rho_в g$ – удельный вес воды; $\rho_н$ – плотность воздуха. на шкале микроманометра ммн-7 указаны не углы наклона трубки микроманометра α, а величины

$$k = \sin\alpha \frac{\rho_C}{\rho_B}\ ,$$

где ρ_c и $\rho_в$ плотность спирта и воды соответственно.

Штуцеры соединяются с опросной панелью, в гнезда которой вставляется штуцер спиртового микроманометра.

В процессе работы экспериментально определяется коэффициент гидравлического сопротивления трения в основной формуле потерь напора по длине

$$h_{gi} = \xi \frac{L \cdot V^2}{d 2g}\ , \qquad (10)$$

где l и d – длина участка трубы и ее диаметр, h_{gi} – потери напора по длине на участке l.

По результатам экспериментов должны быть построены графики зависимости коэффициента ξ от числа re для участков испытуемой трубы. после обработки графиков определяются значения числа нуссельта, соответствующие этим участкам трубы.

4. Порядок измерений и обработка результатов

Запустив стенд, устанавливают последовательно несколько (не менее 5) открытий дросселя, регулирующего расход воздуха. после каждого изменения положения дросселя выдерживают паузу 2-3 мин. для достижения

установившегося режима. после этого приступают к измерениям: в первую очередь по показаниям спиртового микроманометра, подключенного к сопловой трубке, используя ее калибровочную кривую или формулу, определяют скорость воздуха; затем микроманометром через опросную панель определяют вакуумеческие давления в точках отбора. Результаты измерений заносят в таблицу1, примерная форма которой может быть следующей:

Таблица1

№ п/п	показания приемника воздушного давления	скорость v, м / с	показания микроманометра для точек отбора давлений в мм вод. ст.					
			l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1								
2								
3								
4								
5								
6								

По результатам измерений вычисляются параметры течения, необходимые для построения графика $\xi = \xi$ (re)

- средняя скорость потока воздуха в трубе v м/с;
- вакуумеческие давления в точках отбора по длине трубы, выраженные в мм водяного столба $h_{вi} = k\, l_i$;
- потери напора на исследуемом участке трубы $h_{gi} = h_{вi} - h_{вi+1}$.

Результаты вычислений следует занести в таблицу 2.

Используя результаты вычислений из таблицы 2, необходимо рассчитать значения коэффициента гидравлического сопротивления по зависимости

$$\xi = \frac{2gh_{gi}d}{LV^2}10^{-3}$$

и построить график $\xi = \xi$ (re).

Используя графический метод, можно определить константы n и k в выражении (7). результаты заносятся в таблицу 3.

Таблица 2.

№ п/п	число $\mathrm{Re} = \frac{Vd}{\nu}$	давления в точках отбора в мм вод. ст.						потери напора на участке трубы в мм вод. ст.				
		$h_{в1}$	$h_{в2}$	$h_{в3}$	$h_{в4}$	$h_{в5}$	$h_{в6}$	h_{g1}	h_{g2}	h_{g3}	h_{g4}	h_{g5}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1												
2												
3												

4												
5												
6												

Таблица 3.

№ п/п	$\xi = \frac{2gdh_{gi}}{LV^2}10^{-3}$					$\xi = \frac{k}{\mathrm{Re}^n}$									
						1		2		3		4		5	
	ξ_1	ξ_2	ξ_3	ξ_4	ξ_5	n	k	n	k	n	k	n	k	n	k
1															
2															
3															
4															
5															
6															

В заключении отчета по работе после получения критериальной зависимости (8) следует сделать вывод о характере теплообмена для испытанных режимов течения воздуха в трубе.

Лабораторная работа №2

Тарировка дифференциального жидкостного манометра (микроманометра)

1.Цель и задачи работы.

При проведении работы студенты приобретают навыки в обращении с основными приборами, применяемыми во всех последующих работах, и знакомятся с их конструкцией.

Студентам необходимо оценить ошибки измерений, а также изучить способы обработки экспериментального материала (правильной и рациональной организации вычисления и методов построения диаграмм). результат работы представляется в виде диаграммы, определяющей коэффициент тарируемого манометра.

2.Основы теории

Одним из основных измерений в экспериментальной аэродинамике является изменение избыточного давления в потоке воздуха, то есть разница между статическим давлением в потоке и атмосферном давлением. важнейшим измерением является разность между полным напором (давлением) и статическим давлением потока. кроме этих измерений на практике приходится постоянно проводить определение и других разностей давлений. все эти измерения производятся при помощи дифференциальных манометров и микроманометров.

Микроманометр и манометр являются очень распространенными приборами. в настоящее время существуют большое количество разновидностей этих приборов, что объясняется различием задач: измерение больших и малых перепадов давления, малых давлений, переменных давлений с очень большой частотой колебаний и т.п. основными типами манометров являются жидкостные, пружинные (пластичные и трубчатые), датчики давления, преобразующие в электросигналы (индукционные, емкостные, тензометрические). «классическим» наиболее распространенным прибором в аэродинамике является жидкостный дифференциальный манометр, или микроманометр. используемая в манометре жидкость должна иметь малую вязкость и малую величину капиллярной постоянной, малую испаряемость и малую склонность к загрязнению, быть химически стойкой и не поглощать влагу из окружающей среды. плотности жидкостей, применяемых в манометрах, колеблются от 0,7 до 4,0 г/см^3, исключение составляет ртуть с плотностью 13,6 г/см^3. конструктивное оформление микроманометров и манометров жидкостного типа довольно разнообразно; это разнообразие вызвано в основном необходимостью повышения точности измерений.

Необходимость большого быстродействия привала к использованию пружинных манометров и различного типа датчиков давления. хотя все они обладают меньшей точностью, тем не менее, в настоящее время они приобрели значительное распространение. наиболее распространены мембранные и сильфонные приборы, а также датчики всех перечисленных ранее типов.

Для создания ясного представления о принципах и точности измерений давления манометром в наибольшей степени полезна работа с проведением тарировки манометра.

Дифференциальный жидкостный манометр, или как его еще называют микроманометр, представляет собой двухколенную трубку, заполненную жидкостью. к обоим коленам прибора при помощи шлангов из резины или другого материала подводятся давления, разность которых необходимо измерить. во многих случаях одно из колен микрометра (бачок) делается со значительно большим поперечным сечением, чем другое (стеклянная трубка). (рис.1).

Повышенное давление подводится к бачку манометра, пониженное к стеклянной трубке. при этом уровень жидкости в бачке понижается, а в стеклянной трубке – повышается.

Обозначив повышенное давление через p_1, а пониженное – через p_2 (при равновесии), получим (см. рис. .1)

$$P_1 + \gamma H' = P_2 + \gamma h' \sin\varphi \qquad (1)$$

или

$$\frac{P_1}{\gamma} + H' = \frac{P_2}{\gamma} + h' \sin\varphi \qquad (2)$$

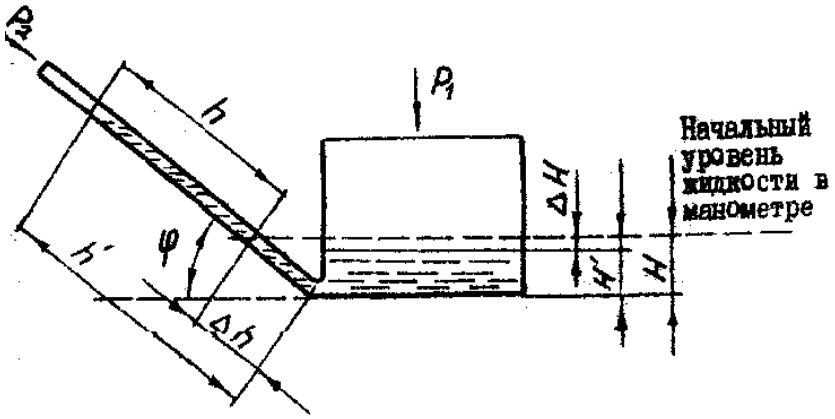

Рис. 1 Схема микроманометра

Вычтем из левой и правой частей соотношения (2) значение начального (до измерения перепада давлений) уровня жидкости в манометре:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \Delta H = \frac{P_2}{\gamma} + h \sin\varphi, \qquad (3)$$

где γ - плотность жидкости в манометре.

Следовательно, разность давлений

$$P_1 - P_2 = (h + \frac{\Delta H}{\sin\varphi})\sin\varphi. \qquad (4)$$

Разность давлений определяется изменением положения мениска жидкости в стеклянной трубке h. при данной разности давлений p_1-p_2 это изменение будет тем больше, чем меньше угол наклона трубки манометра φ. таким образом, уменьшение угла φ приводит непосредственно к увеличению отсчитываемой величины, то есть к повышению точности отсчета, а значит, и точности измерения. однако это верно только до определенного предела; при $\sin\varphi = 1/25$ и меньше начинают появляться ошибки, обусловленные капиллярными законами жидкости, налитой в микроманометр.

Кроме того, повышение точности отсчета в прецизионных манометрах специальных типов достигается применением оптических приспособлений.

Если площадь зеркала жидкости, налитой в бачок микроманометра, обозначим f, а площадь поперечного сечения стеклянной трубки – f, то простой подсчет объема жидкости, вытесненной из широкого колена и вошедшей в узкое колено, приводит к равенству:

$$\Delta H = \frac{f}{F} h.$$

Так, например, когда ось бачка расположена вертикально, а диаметр его d=100 мм, то при диаметре трубочки d=7 мм, Δh составляет 0,5 % от h.

Для измеряемой разности давлений после подстановки в формулу (4) величины Δh получаем следующее соотношение:

$$P_1 - P_2 = h\sin\varphi\gamma(1 + \frac{f}{F\sin\varphi}),$$

из которого видно, что величина Δhучитывается введением поправки $K = 1 + \frac{f}{F\sin\varphi}$, называемой коэффициентом микроманометра. введение коэффициента к позволяет ограничиться только одним отсчетом, а именно – отсчетом величины h. при этом ошибка отсчета уменьшается вдвое.

Таким образом, рабочая формула микроманометра принимает вид

$$P_1 - P_2 = h\gamma\sin\varphi K \qquad (5)$$

обозначим через γ_0 плотность жидкости в микроманометре для некоторой определенной температуры t_0, которая заранее определяется при помощи ареометра. если опыт проводится при температуре t, то γ необходимо привести к температуре опыта. приведение осуществляется по формуле

$$\gamma = \frac{\gamma_0}{1 + \beta(t - t_0)}, \qquad (6)$$

где γ_0 – плотность жидкости при температуре t_0=15 ^{0}c; γ - то же при температуре опыта t; β - коэффициент объемного расширения жидкости.

Для спирта при средних температурах, близких к нормальной, β=0,0011, и поэтому для получения ошибки в величине γ в 1% $\Delta t = t - t_0$ должно быть не менее 10^0с. при меньшей разности температур Δt температурной поправкой на изменение плотности жидкости в манометре можно пренебрегать.

Наклон узкой стеклянной трубочки микроманометра, характеризуемый величиной sinφ, осуществляется или поворотом трубочки вместе с бачком, или поворотом только одной трубочки при неподвижном бачке.

Различают первичную и вторичную тарировки микроманометра. под первичной тарировкой понимают установление абсолютной цены деления прибора. первичную тарировку проводят обычно для эталонных приборов. обычный прием первичной тарировки – способ подлива. он состоит в последовательном доливании в резервуар микроманометра небольших, строго дозированных по объему и весу количеств жидкости. одновременно отсчитываются перемещения мениска жидкости по стеклянной трубке. если площадь поперечного сечения широкого колена микроманометра равна f, то количество жидкости q, наливаемое в его колено, повысит уровень жидкости на величину $\Delta H = \frac{Q}{\gamma F}$. это повышение эквивалентно дополнительному давлению в узком колене

$$\Delta P = \Delta H \gamma = \frac{Q}{F} h \sin\varphi \left(1 + \frac{f}{F \sin\varphi}\right)$$

В результате такой тарировки установим зависимость действительной высоты поднятия жидкости в трубке манометра $h_{ист}$ от разности давления Δp и найдем коэффициент $K = {h_{ИСТ}}/{h_{MAX}}$ в функции величины h_{max} (высота столба жидкости, отсчитываемая по шкале манометра).

Гораздо более распространена так называемая вторичная тарировка. она применяется постоянно в эксплуатационных условиях любых лабораторий, ведущих измерение давления. данная лабораторная работа и заключается в проведении подобной тарировки.

Вторичная тарировка состоит в сравнении показаний двух микроманометров, один из которых является эталонным, а второй тарируемым. в работе ставится задача определения коэффициента k для вычисления разности давления по формуле (5). Помимо того, что на показания микроманометра влияет капиллярность, учитываемая экспериментально, имеется еще одна причина, в силу которой коэффициент k, подсчитанный по формуле $K = 1 + \frac{f}{\sin\varphi}$, не может соответствовать действительному его значению. эта причина заключается в недостаточной точности калибрования трубки микроманометра (величина внутреннего диаметра d может изменятся по длине трубки), а также в дефектах изготовления бачка.

Величину k определяют опытным путем, сравнивая показания эталонного микроманометра с известным значением $k_э$ с показаниями тарируемого микроманометра. для определения k тарируемого манометра используются следующие рабочие формулы:

$$P_A - P_0 = h_э \sin\varphi_э \gamma_э K_э;$$

$$P_A - P_0 = h_т \sin\varphi_т \gamma_т K_т;$$

$$h_э \sin\varphi_э \gamma_э K_э = h_т \sin\varphi_т \gamma_т K_т;$$

$$K_т = {h_э}/{h_т}\ \mathrm{const} = \mathrm{tg}\theta \cdot \mathrm{const}.$$

В рабочих формулах все величины, относящиеся к эталону, имеют индекс «э», величины, относящиеся к тарируемому манометру, - индекс «т».

3. Объект и средства исследования

На рис. 2. приведена схема установки для тарировки микроманометра. она включает в себя два микроманометра, аспиратор и резиновые шланги для присоединения микроманометров к аспиратору.

Оба микроманометра соединяются, как это показано на рисунке, и им сообщается одинаковая разность давления. эта разность оказывается равной $P_a - P_0$, где p_a – атмосферное давление, p_0 – разряжение, создаваемое в измерительных коленах микроманометров специальным прибором – аспиратором. перед началом тарировки с помощью винта 2 и плунжера 5 сжимают резиновую грушу 3, закрывают кран 1, затем при помощи шлангов 7 соединяют кран с микроманометрами 6. открывая кран в аспираторе, создают некоторое давление, и после уравновешивания столбов жидкости с микроманометров снимаются показания. отсчеты по микроманометрам должны проводиться в один и тот же момент времени, если наблюдаются какие-либо колебания в положении менисков жидкости. при отсутствии аспиратора и необходимости получить пониженное давление в трубках отсосом, необходимы, металлический зажим и тройник.

4. Порядок проведения работы.

1. Ознакомиться со схемой и конструкцией микроманометра.
2. Установить эталонный и тарируемый микроманометры, присоединить их к аспиратору или шлангу с зажимом и проверить герметичность. отсоединить микроманометры от крана аспиратора.
3. С помощью винта и плунжера сжать резиновую грушу и закрыть кран аспиратора. соединить кран с микроманометрами.
4. Открывая кран в аспираторе, создать некоторое давление и после уравновешивания столбов жидкости с микроманометров снять показания $h_т$ и $h_э$.

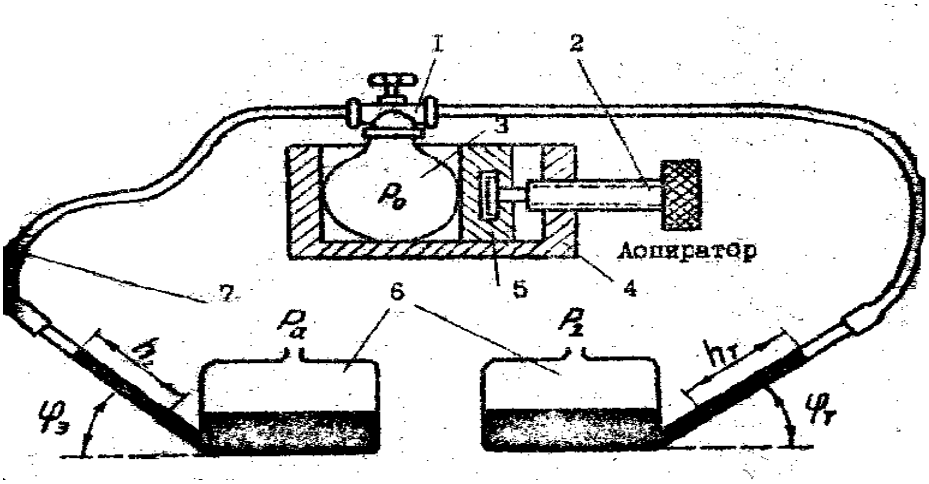

Рис. 2. Схема установки для тарировки микроманометра.
1 - кран, 2 - винт, 3 – резиновая груша, 4 – корпус, 5 – плунжер,
6 – микроманометры, 7 – шланги.

Так как каждый отсчет по микроманометру как по эталонному, так и тарируемому может иметь свои случайные ошибки, то при определении величины k необходимо взять несколько отсчетов.

5. Построить график зависимости $h_т$ от $h_э$.
6. Определить среднюю величину k_t при помощи графика, для чего полученную зависимость представляют в виде

$$\mathrm{tg}\theta = \frac{h_Э}{h_Т}.$$

Таким образом, коэффициент тарируемого манометра

$$K_Т = \mathrm{tg}\theta \cdot \mathrm{const} \qquad (7)$$

где

$$\mathrm{const} = \frac{\gamma_Э K_Э \sin\varphi_Э}{\gamma_Т \sin\varphi_Т}$$

Для определения $\mathrm{tg}\theta$ рекомендуется после проведения прямой линии через экспериментальные точки при небольшом их разбросе наметить на этой прямой две какие-либо далеко расположенные друг от друга точки с координатами x_1 y_1 и x_2 y_2 и затем определить $\mathrm{tg}\theta$ как отношение разности координат точек и разности их абсцисс.

7. Кроме приведенного, существуют и другие способы определения коэффициента манометра k_t. поскольку зависимость между $h_т$ и $h_э$ имеет линейный или близкий к нему характер, то для примера можно воспользоваться таким выражением:

$$K_Т = K_Э \frac{\gamma_Э \sin\varphi_Э \sum h_Э^2}{\gamma_Т \sin\varphi_Т \sum h_Э h_Т} \qquad (8)$$

8. Опытные данные и результаты расчетов k_t по формулам (7) и (8) занести в таблицу.
9. Сравнить получаемые значения k_t.

Отчет о работе включает:

1. название работы.
2. цель и задачи работы.
3. график зависимости $h_т$ от $h_э$.
4. таблицу опытных и расчетных данных.

5. Контрольные вопросы

1. Что измеряют манометры, микроманометры, датчики давления?
2. Какие требования предъявляются к жидкостям, используемым в жидкостных манометрах?
3. Что представляет собой дифференциальный жидкостный манометр – микроманометр?
4. С какой целью стеклянная трубка микроманометра делается наклонной?
5. Какое давление создает столб жидкости высотой h?
6. Влияет ли площадь зеркала жидкости на давление, создаваемое последней?
7. С какой целью одно из колен микроманометра делается со значительно большим поперечным сечением?
8. Чем вызвана необходимость тарировки микроманометров?
9. Какие бывают виды тарировки микроманометров?
10. Что включает в себя установка для тарировки манометров?
11. Можно ли определить абсолютные величины двух давлений, если известна их разность?

Лабораторная работа №3

Определение скорости сверхзвукового воздушного потока

Цель и задачи работы

В работе студенты знакомятся с методикой опытного определения средней скорости потока в аэродинамической установке по перепаду давлений.

Студентам необходимо экспериментально найти значения расходный характеристик устройств, используемых для измерения средней скорости потока.

1. Основы теории

В аэродинамических установках, в особенности в трубах замкнутого типа с открытой рабочей частью, скорость воздушного потока часто определяют по перепаду давлений. перепада давлений можно достичь, если при течении по трубе увеличить скорость потока путем уменьшения сечения этой трубы.

Уменьшение сечения можно получить либо в соплах с закругленным входом (рис.1), либо в диафрагмах, имеющих форму плоских шайб и отверстие с очень тонкой кромкой (рис .2). при закругленном входе поток формируется в цилиндрический луч с сечением, равным выходному отверстию. в случае отверстия с тонкой кромкой поток по выходе из отверстия продолжает стягиваться, как показано на рис.2, и достигает наименьшего сечения и наивысшей скорости лишь на некотором расстоянии от него. в нижней части рис.2. сплошной линией показано изменение давление на стенке трубы, а пунктирной – на оси потока. для уменьшения потери давления можно присоединить к соплам конические расширители (диффузоры), которые вновь превращают кинетическую энергию в энергию давления (сопла внутри).

При определении скорости потока по перепаду давления с помощью сопел выбирают две контрольные плоскости; обычно первая контрольная плоскость совпадает с входным сечением сопла, вторая – с выбранным сечением в рабочей части трубы (рис.1).

В выбранных сечениях 1 и 2 в стенках трубы делают несколько радиальных отверстий, которые во избежание случайных ошибок объединяют в самостоятельные коллекторы (для каждого сечения свой коллектор) или кольцевые канавки. отверстия в сечениях 1 и 2 соединяют с помощью резиновых шлангов с коленами дифференциального манометра нужно открыть прямо в атмосферу (рис.1 правая схема).

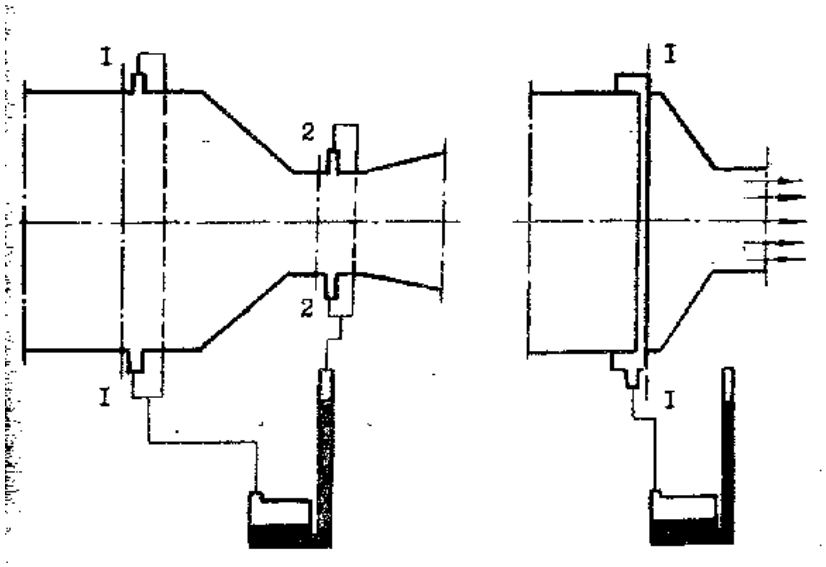

Рис. 1. Определение средней скорости потока в аэродинамической установке по перепаду давления с помощью сопел.

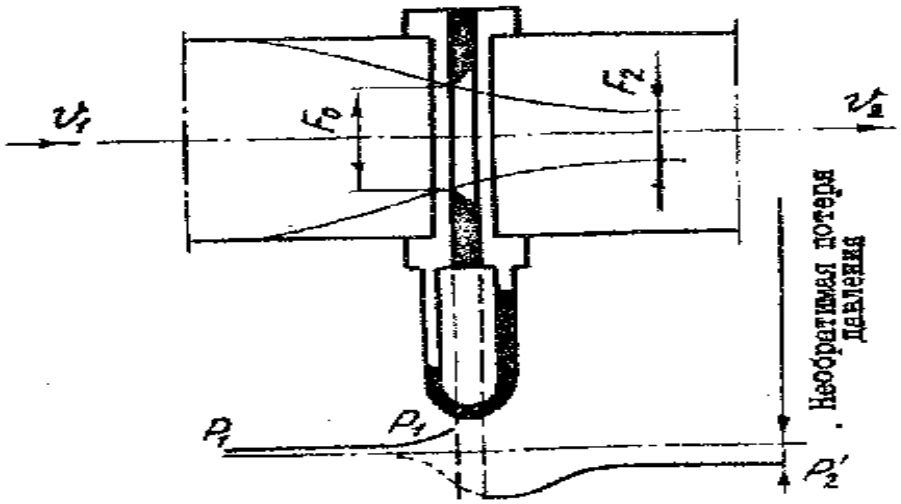

Рис. 2. Определение средней скорости потока по перепаду давления с помощью диафрагмы.

Запишем для двух этих сечениях уравнение Бернулли:

$$P_1 + \frac{\rho \upsilon_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho \upsilon_2^2}{2} + \xi \frac{\rho \upsilon_2^2}{2} \qquad (1)$$

и уравнение неразрывности:

$$\rho F_1 \upsilon_1 = \rho F_2 \upsilon_2 \qquad (2)$$

где ξ - коэффициент гидравлического потерь между рассматриваемыми сечениями; f_1 – площадь первого сечения; f_2 – площадь второго сечения.

Из уравнений (1) и (2) получаем величину перепада давлений

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{\rho \upsilon_2^2}{2}\left[1 + \xi - \left(\frac{F_2}{F_1}\right)^2\right] \quad (3)$$

из этого уравнения скорость υ_2 определяется в следующем виде:

$$\upsilon_2 = \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_1 - P_2)\frac{1}{\left[1 + \xi - (F_2/F_1)^2\right]}} = \varphi_C \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_1 - P_2)} \quad (4)$$

$$\upsilon_2 = \varphi_C \sqrt{\frac{2}{\rho} h_1 \gamma K \sin\varphi} \quad (4a)$$

где φ_c – коэффициент перепада,

$$\varphi_C = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi - \left(F_2/F_1\right)^2}} \quad (5)$$

этот коэффициент определяется тарировкой для данных конкретных условий и расположения отверстий, измеряющих перепад давления.

При определении скорости потока с помощью диафрагмы исходными уравнениями также являются уравнение Бернулли и уравнение неразрывности:

$$P_1' + \frac{\rho \upsilon_1'^2}{2} = P_2' + \frac{\rho \upsilon_2'^2}{2} + \xi \frac{\rho \upsilon_2'^2}{2}$$

$$\rho F_1 \upsilon_1' = \rho F_2 \upsilon_2' \quad (6)$$

здесь f_1 – поперечное сечение трубы перед сужением; υ_1' - средняя скорость там же; P_1'- соответствующее статическое давление; f_2 – наименьшее сечение выходящей струи (см. рис.2); υ_2' - средняя скорость потока в ней; P_2' - соответствующее давление.

Наименьшее сечение выходящего потока меньше, чем сечение отверстия f_0, из-за сужения струи. поэтому отношение

$$m = \frac{F_2}{F_0} \quad (7)$$

называют коэффициентом сужения. отсюда на основании уравнений (6) и (7) получим

$$\upsilon_2' = \varphi_Э \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_1' - P_2')} = \varphi_Э \sqrt{\frac{2}{\rho} h_2 \gamma K \sin\varphi} \quad (8)$$

где

$$\varphi_Э = \frac{1}{\sqrt{1 - \xi - \left(m F_0/F_1\right)^2}} \quad (9)$$

Вместо давлений P_1' и P_2' вводят более удобные для измерения давления p_1 и p_2, измеряемые в кольцевой канавке или в сверлениях стенки трубы непосредственно перед и после диафрагмы. возникающие при этом изменения учитывают, вводя эмпирический коэффициент ψ. действительную скорость υ_2 в наиболее узком сечении трубы рассчитывают тогда по уравнению

$$\upsilon_2 = \nu_\partial \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_1 - P_2)} = \nu_\partial \sqrt{\frac{2}{\rho} h_2 \gamma K \sin\varphi} \qquad (10)$$

где

$$\nu_\partial = \frac{\psi}{\sqrt{1 - \xi - (m F_0 / F_1)^2}} \qquad (11)$$

коэффициент ν_∂ также определяется тарировкой.

3. Объект и средства исследований

Работа проводится на испытательном стенде, схема которого показана на рис.3. он включает в себя аэродинамическую трубу, по которой воздух из компрессора подается в рабочее помещение. в аэродинамической трубе установлены диафрагма с отверстием диаметром 40 мм и дозвуковое сопло с диаметром выходного сечения 46 мм. при запуске аэродинамической трубы, на которой проводится исследование, пневмоклапаны других труб должны быть перекрыты.

В работе объектом исследования является дозвуковой , воздушный поток в аэродинамической установке. для измерения средней скорости потока используется диафрагма, дозвуковое сопло и приемник полного давления. применение приемника полного давления позволяет протарировать (определить расходные характеристики) диафрагму и дозвуковое сопло при измерении с помощью последних средней скорости потока.

Перед измерительными приборами (диафрагмой и соплом) предусмотрены прямолинейные участки трубы длиной более 20 d для того, чтобы исключить искажение профиля скоростей.

Расходные характеристики приборов, коэффициенты φ_C (для сопла) и ν_∂ (для диафрагмы) существенно зависят не только от формы сопла или диафрагмы, но и от отношений сечений F_2/F_1, F_0/F_1. В общем случае зависят эти параметры φ_C, ν_∂ и от числа Рейнольдса потока. такая зависимость заметна при $Re<2\cdot10^5$. при $Re>2\cdot10^5$ можно считать, что φ_C и ν_∂ не меняются при изменении числа Рейнольдса потока.

Избыточное полное давление на оси потока, воспринимаемое приемником давления, замеряется с помощью дифференциального манометра 1, одно колено которого соединено с приемником полного давления, а другое с окружающей средой.

Перепад давления на диафрагме измеряется манометром - п. повышенное давление перед диафрагмой подводится к бачку манометра (одному из колен манометра, поперечное сечение которого значительно больше, чем у другого колена – стеклянной трубки), а пониженное давление за диафрагмой - к стеклянной трубке.

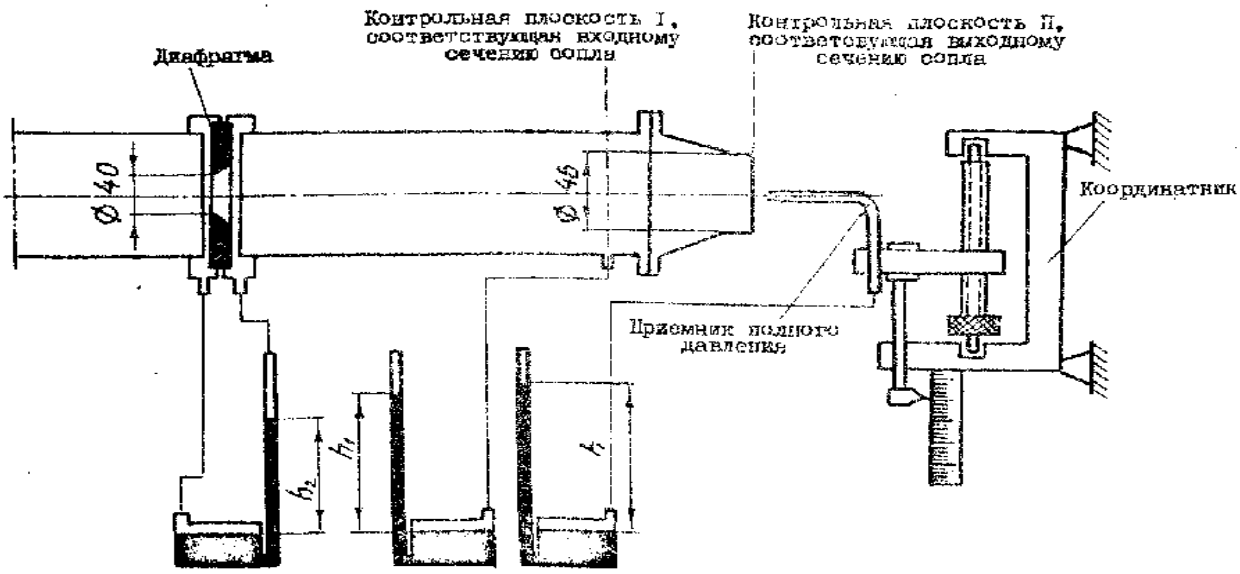

Рис 3. Схема испытательного стенда

Для изменения перепада давлений в сопле штуцер контрольной плоскости i, соответствующей входному сечению сопла, соединен с бачком дифференциального манометра iii. поскольку давление в выходном сечении сопла равно давлению окружающей среды, другое колено манометра (стеклянная трубка) открыто связано с окружающей средой.

При проведении опытов необходимо использовать барометр для измерения атмосферного давления и ртутный термометр для определения температуры воздушного потока.

4. Программа работы

1. Ознакомиться со схемами и конструкциями измерительных приборов: диафрагмой и соплом.
2. Установить приемник полного давления по оси выходного сечения сопла.
3. Перед началом и после проведения опыта определить по барометру давление в рабочем помещении (боксе).
4. Соединить приемник полного давления, диафрагму и контрольную плоскость i дозвукового сопла с дифференциальными манометрами i, ii, iii.
5. Запустить аэродинамическую установку.
6. Зафиксировать показания манометров h, h_1, h_2.
7. Измерить температуру потока с помощью ртутного термометра.
8. Рассчитать плотность потока (лабораторная работа 1, зависимость (3)).
9. Рассчитать скорость на оси выходного сечения сопла (лабораторная работа 2, зависимость (7)).

10. Используя график зависимости $\varepsilon_{МАКС} = \varepsilon_{МАКС}(\varepsilon_{МАКС}\upsilon_{СР})$ лабораторной работы 2 и учитывая, что $\varepsilon_{МАКС}\upsilon_{СР} = \upsilon_{r=0}$, определить среднюю скорость потока в выходном сечении сопла:

$$\upsilon_2 = \frac{\upsilon_{r=0}}{\varepsilon_{МАКС}}$$

11. Определить коэффициент перепада для сопла φ_C по формуле (4):

$$\upsilon_2 = \varphi_C \sqrt{\frac{2}{\rho} h_1 \gamma K \sin\varphi}$$

12. Определить секундный массовый расход в аэродинамической установке:

$$G = \rho \cdot \upsilon_2 \cdot F_C$$

где f_c – площадь выходного сечения сопла (d_c=46 мм).

13. Учитывая, что такая же масса газа протекает в единицу времени и через отверстие диафрагмы, определить среднюю скорость потока в диафрагме:

$$\upsilon_2 = \frac{G}{\rho F_\partial}$$

где F_∂ - площадь отверстия диафрагмы (D_∂=40 мм).

14. Определить расходную характеристику диафрагмы:

$$\upsilon_2 = \nu_\partial \sqrt{\frac{2}{\rho} h_2 \gamma K \sin\varphi}$$

15. Результаты опытного определения параметров газового потока и данные расчета занести в таблицу 1.

Отчет о работе включает:

- название работы;
- цель и задачи исследования;
- таблицу опытных и расчетных данных.

5. Контрольные вопросы

1. Чему равно статическое давление потока в выходном сечении дозвукового сопла?
2. Как определить среднюю скорость потока по перепаду давлений в сопле?
3. Как определить среднюю скорость потока по перепаду давлений в диафрагме?
4. Для чего в работе используется приемник полного давления?
5. Для чего в работе определяется секундный расход газа в аэродинамической установке?
6. Как подключаются дифференциальные манометры i, ii, iii к измерительным приборам (диафрагме, соплу, приемнику полного давления)? покажите схему подключения.
7. Как опытным путем определить коэффициенты φ_C и ν_∂? Что учитывают эти коэффициенты?

Таблица 1

№ п.п.	барометрическое давление p, па	температура потока t, k	плотность потока ρ, кг/м^3	показания манометра			скорость на оси выходного сечения сопла υ, м/с	средняя скорость в выходном сечении сопла $\upsilon_{ср}$, м/с	φ_C	секундный расход газа g, кг/с	средняя скорость в отверстии диафрагмы $\upsilon_{СР}$, м/с	ν_{∂}
				h	h_1	h_2						
1												
2												
3												

Лабораторная работа №4

Физическое моделирование процесса распыления жидкости центробежной форсунки

Введение

При выполнении работ преследуется цель углубить и закрепить знания, получаемые студентами при изучении соответствующих разделов теоретического курса. но практически лабораторные работы не всегда проводятся после соответствующих лекций, в связи с этим в каждой работе даются общие положения и теоретические предпосылки, необходимые для выполнения экспериментальной части работы.

При выполнении работ студенты приобретают навыки по производству замеров, обработке полученных опытных данных и представлению их в виде графиков, а также знакомится с типовыми методиками снятия характеристик.

Работа проводится студентами самостоятельно в присутствии преподавателя и лаборанта.

Неумелое обращение с органами управления установки, с ее оборудованием и приборами может привести к порче установки и к аварии. поэтому студенты, приходя в лабораторию для выполнения работы, должны быть заранее ознакомлены с методикой работы, ясно представлять объект исследования, программу эксперимента, способ управления установкой, принцип действия применяемых приборов и порядок обработки полученных опытных данных.

К работе допускаются только те студенты, которые в предварительной беседе с преподавателем показали удовлетворительное знание методики данной работы. предварительная беседа-опрос является одновременно и зачетом по данной лабораторной работе. работа считается выполненной после того, как преподаватель, проверив заполненные таблицы с опытными и расчетными данными, соответствующими графиками и схемами, ставит на них свою подпись.

При проведении лабораторных работ необходимо строго соблюдать правила техники безопасности, которые изложены в специальной инструкции. перед первым занятием в лаборатории студенты изучают правила техники безопасности и расписываются в журнале инструктажа лаборатории кафедры двигателей.

1. Цели и задачи работы.

В работе студенты знакомятся с экспериментальными методами физического моделирования процесса распыления жидкости центробежной форсунки.

2. Основы теории

Наиболее распространенным в настоящее время методом определения скорости в трубах является способ, связанный с применением насадка, называемого приемником воздушного давления.

Комбинированный приемник давления (насадок) представляет собой сочетание трубки полного давления и приемника статического давления

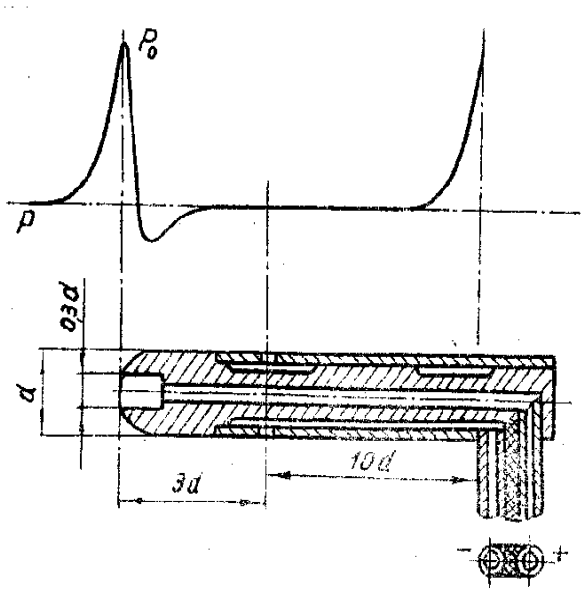

Рис. 1.Схема комбинированного приемника воздушного давления.

Этот прибор регистрирует разницу между полным напором, воспринимаемым отверстием трубки полного напора насадка, и статическим давлением, воспринимаемым статическими отверстиями насадка. величина статического давления потока p_0 связана с величиной скоростного напора $q = \frac{1}{2}\rho\upsilon^2$ для несжимаемой среды уравнением Бернулли:

$$P_0 = \frac{\rho\upsilon_1^2}{2} + P_1 = \frac{\rho\upsilon_2^2}{2} + P_2 = \text{const}$$

и, как видно, изменяется с изменением скорости υ.

Картину обтекания насадка можно представить себе следующим образом.

Струйки потока вблизи насадка искривляются, и сам поток разветвляется. в месте разветвления потока скорость сильно уменьшается и перед насадком образуется как бы застойная область с крайне медленным течением. Если взять достаточно тонкую по сравнению с размерами головки насадка струю, подходящую по оси насадка к месту разветвления потока, то можно приближенно принять, что жидкость струи в застойной зоне почти не движется, то есть υ=0, а давление быстро возрастает и в критической точке доходит до величины полного давления p_0. в точках, находящимися недалеко от критической, давление резко падает от величины p_0 до p и далее по

направлению потока тоже наблюдается понижения давления, а затем по мере дальнейшего удаления от передней кромки насадка оно опять повышается, асимптотически приближаясь к статическому. присутствие державки у приемника давление вызывает торможение потока (подпор) и тем самим повышает давление. нетрудно найти на поверхности трубки место, в котором давление будет равно статическому. Отверстия для приема статического давления на боковой поверхности удобно сделать именно в этом месте трубки.

Если отверстие полного напора насадка соединить с одним коленом микроманометра, а отверстие статического давления – с другим, то микроманометр покажет непосредственно разность давлений:

$$P_0 - P = \frac{\rho \upsilon^2}{2} = q(\text{Па}) \qquad (1)$$

и, таким образом, динамическое давление, или скоростной напор, скажется при помощи системы насадок - микроманометр приближенно измеренным.

Скорость потока вычисляется по формуле (без учета влияния сжимаемости воздуха)

$$\upsilon = \sqrt{\frac{2}{\rho} q} \quad \left(\text{м}/\text{с}\right) \qquad (2)$$

При изменении скорости потока следует вести тщательный отсчет температуры и давления воздуха.

Атмосферное давление измеряется по барометру. плотность воздуха вычисляется по формуле

$$\rho = \rho_A \frac{PT_A}{P_A T}, \qquad (3)$$

p_a, ρ_a, t_a – значения давления, плотности и температуры по стандартной атмосфере: p_a=9,8 10^4 па; ρ_a=1,29 кг/м^3; t_a=273 к.

Если в формулу, определяющую скорость υ, подставим вместо скоростного напора измеренную разность полного и статического давлений p_0-p, то получим приближенную расчетную формулу

$$\upsilon = \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_0 - P)} \qquad (4)$$

В действительности мы передаем широкое колено микроманометра на полное давление p_0, которое имеется только в критической точке, а некоторое среднее давление потока, имеющее место на поверхности переднего отверстия насадка, так как это отверстие, как бы мало оно ни было, практически занимает всегда некоторую конечную площадь и не является точкой.

Кроме того, статическое давление мы измеряем при помощи насадка неточно и, как легко видеть, не в той точке, где измеряется полное давление. может оказаться, что даже в свободном потоке статическое давление в двух

точках, расстояние между которыми равно расстоянию между отверстиями насадка, неодинаково.

Следовательно, разность давлений p_0-p, которую мы фактически передаем на микроманометр, зависит от формы и размеров насадка и не равна разности между полным и статическим давлениеми потока в одной и той же точке. чтобы учесть поправку, в формулу (4) вводится коэффициент ξ, называемый коэффициентом насадка, после чего формула примет вид

$$\upsilon = \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_0 - P)\cdot\xi} \qquad (5)$$

по опытным данным ξ колеблется в пределах от 1,01 до 1,04.

Выразив разность давлений p_0-p через высоту вертикального столба микроманометра, будем иметь

$$P_0 - P = h_ж \gamma_ж \sin\varphi K = \frac{\rho\upsilon^2}{2} = \frac{\gamma_В \upsilon^2}{2g} \qquad (6)$$

где $\gamma_В$ - вес единицы объема воздуха при p_a=9,810^4 Па и t_a=15^{0}с, Н/м^3; $\gamma_ж$ - вес единицы объема жидкости при этих же условиях, Н/м^3.

Воспользовавшись зависимостью между p_0-p и h и приняв $\gamma_ж = \gamma$, ξ=1,02, получим следующее выражение для скорости потока:

$$\upsilon = \sqrt{\frac{2{,}04}{\rho} h\gamma \sin\varphi K} \text{ м/с} \qquad (7)$$

При наличии открытой части трубы приемник давления устанавливается так, чтобы его передний конец располагался в выходном сечении сопла установки (рис.2).

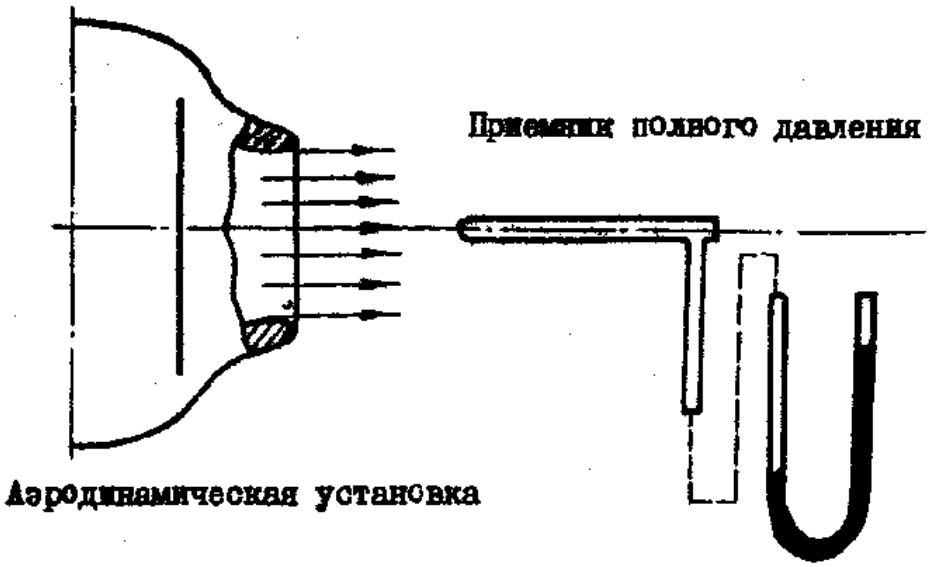

Рис. 2 Установка приемника полного давления в открытой части аэродинамической трубы

Насадок должен передвигаться вдоль выбранной прямой (для круглого сечения сопла эта прямая будет одним из его диаметров).

В случае расчетного режима работы сопла для определения поля скоростей достаточно измерить лишь полное давление в различных точках газового потока, так как статическое давление истекающего газа в этих точках будет одинаковым и равным атмосферному давлению экспериментального помещения.

В термодинамическом рассмотрении в общем случае не учитывают изменение скорости по сечению. оперируют средней скоростью

$$\upsilon_{CP} = \frac{1}{S}\int \upsilon dS$$

Для определения средней скорости потока сечение разделяется на ряд участков равной площади. затем с помощью приемника давление определяются скорости потока. в случае круглых сечений последние разбивается на четное число n концентрических колец окружностями, радиусы которых определяются из зависимостей

$$r_1 = R\sqrt{\frac{1}{n}},\ r_2 = R\sqrt{\frac{2}{n}},\ldots,\ r_{n-1} = R\sqrt{\frac{n-1}{n}} \qquad (8)$$

Затем в каждой точке, соответствующей радиусу с нечетным индексом $(r_1, r_2, ..., r_{n-1})$, находятся $\upsilon_1, \upsilon_2, ..., \upsilon_{n-1}$, эти скорости являются средними для каждой пары смежных равновеликих площадей. после этого средняя скорость потока вычисляется по формуле.

$$\upsilon_{CP} = \frac{\upsilon_1 + \upsilon_3 + \ldots + \upsilon_{n-1}}{0{,}5n} \qquad (9)$$

Мерой отклонения величин местных значений скорости, измеренных вдоль некоторой оси, перпендикулярной к потоку, от средней величины скорости, характеризующей равномерность поля скоростей, является коэффициент поля скоростей потока

$$\varepsilon = \frac{\upsilon_i}{\upsilon_{CP}} = \varepsilon(Re_D) \qquad (10)$$

Максимальное значение коэффициента поля будет соответствовать осевой скорости газового потока:

$$\varepsilon_{МАКС} = \frac{\upsilon_0}{\upsilon_{CP}} = \varepsilon_{МАКС}(Re_D) \qquad (11)$$

2. Объект и средства исследований

3.

Экспериментальная часть работы поводится на испытательном стенде, принципиальная схема которого показана на рис. 2.3. Он включает в себя аэродинамическую трубу, по которой воздух из компрессора подается в рабочее помещение (бокс). заканчивается труба суживающимся патрубком – дозвуковым соплом. Рабочей частью аэродинамической трубы является выходное сечение дозвукового сопла диаметром 46 мм. При запуске

аэродинамической трубы, на которой проводится исследование, пневмоклапаны других труб должны быть перекрыты.

В данной работе объектом исследования является дозвуковой воздушный поток в открытой рабочей части аэродинамической установки.

Для измерения скорости потока в различных точках поперечного сечения рабочей части трубы используется приемник полного давления, установленный на ползунке координатника. С помощью ходового винта приемник полного давления имеет возможность перемещаться в горизонтальной плоскости. Величина перемещения измеряется с помощью указателей. в данном случае применение комбинированного приемника полного и статического давлений (см. рис.2.1) не целесообразно, так как в дозвуковом сопле происходит полное расширение газа и статическое давление потока всегда будет равно давлению окружающей среды.

Избыточное полное давление, воспринимаемое приемником полного давления, замеряется с помощью дифференциального жидкостного манометра, одно колено которого соединено с приемником давления, а другое с окружающей средой.

Используемая в манометре жидкость – вода.

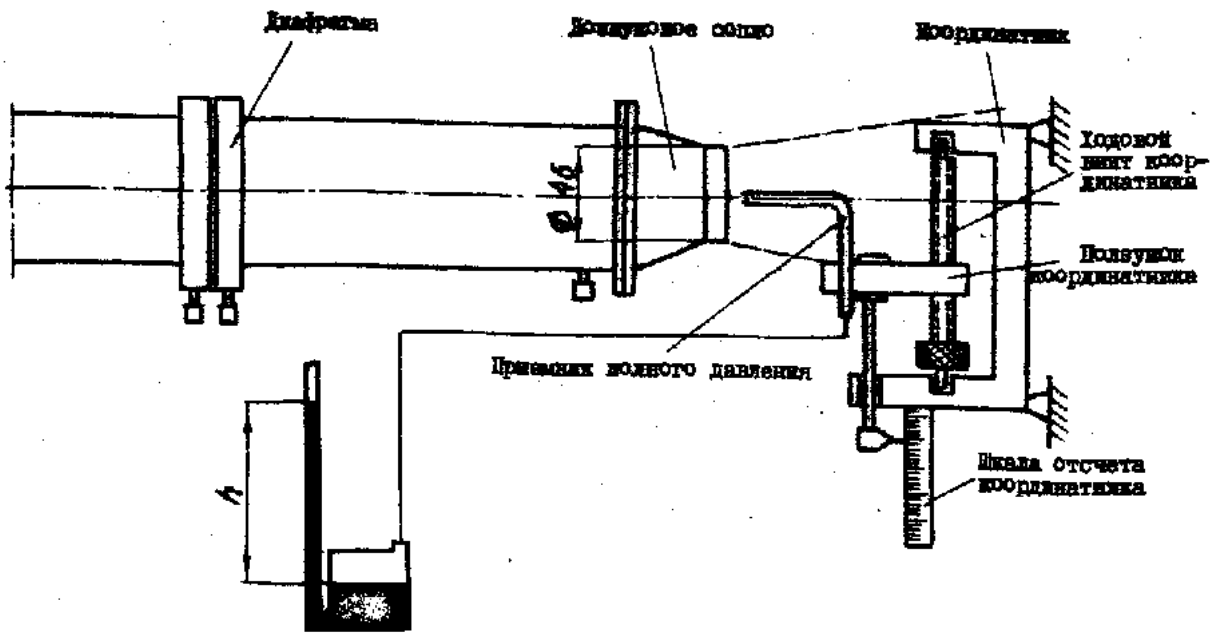

Рис. 3. Схема испытательного стенда.

Давление окружающей среды измеряется барометром, температура потока – ртутный термометром.

4. Программа работы

1. Ознакомиться со схемами и конструкциями приемника давления и испытательного стенда.
2. Условно разбить площадь выходного сечения дозвукового сопла аэродинамического трубы на 10 равновеликих концентрических колец n=10. определить значения радиусов с нечетным индексом $r_1, r_2, ..., r_{n-1}$ с помощью соотношений (8). Радиус выходного сечения сопла r равен 23 мм.
3. Перед началом и после проведения опыта определить с помощью барометра давления в рабочем помещении (боксе).
4. Установить приемник полного давления на координатнике и соединить его о жидкостным манометром.
5. Подвести приемник давления так, чтобы его передний конец располагался в выходном сечении сопла установки.
6. Запустить аэродинамическую установку.
7. Последовательно устанавливая приемник давления в точках, соответствующий радиусам 0 (осевое положение приемника), r_1, r_3, r_5, r_7, r_9 , зафиксировать показания манометра h.
8. Измерить температуру потока с помощью ртутного термометра.
9. Рассчитать плотность потока (зависимость (3)).
10. Рассчитать скорость в точках, соответствующих радиусам $0, r_1, r_3, r_5, r_7, r_9$, по зависимости (7).
11. Определить среднюю скорость потока из выражения (9).
12. Определить значения коэффициента поля скоростей потока:

$$\varepsilon = \frac{\upsilon}{\upsilon_{CP}}.$$

13. Определить число Рейнольдса потока:

$$Re_D = \frac{\upsilon_{CP}\rho D}{\mu}$$

в этом выражении d=4,610^{-2} м – диаметр выходного сечения сопла;

μ - коэффициент динамической вязкости воздуха, который в общем случае зависит от температуры воздуха. Для диапазона измерения температуры воздуха от 273 до 373 к значение μ может быть определено из выражения

$$\mu = [1{,}8 + 0{,}004(T - 273)]10^{5} \text{ (па·с).}$$

14. Результаты опытного определения параметров газового потока и данные расчета занести в таблицу 1.

Каждая подгруппа студентов проводит работу при своем значении средней скорости потока. результаты подгруппы обобщаются в виде графиков зависимости $\varepsilon_{МАКС}$ от числа рейнольдса и средней скорости потока.

Отчет о работе включает:

- название работы;
- цель и задачи исследования;
- таблицу опытных и расчетных данных;
- график зависимостей $\varepsilon_{МАКС} = \varepsilon_{МАКС}(Re_D)$;
- график зависимостей $\varepsilon_{МАКС} = \varepsilon_{МАКС}(\varepsilon_{МАКС}\upsilon_{СР})$.

5. Контрольные вопросы

1. Чем конструктивно отличается приемник полного давления от приемник статического давления?
2. Что регистрирует комбинированный приемник воздушного давления?
3. Что включает в себя полное давления потока?
4. Как связаны между собой величина статического давления потока и величина скоростного напора для несжимаемой среды?
5. Как с помощью приемника давления определить скорость в рассматриваемой точке потока?
6. Какие термодинамические параметры необходимо измерить при определении скорости потока внутри аэродинамической установки?
7. Какие термодинамические параметры необходимо измерить при определении скорости потока в открытой части аэродинамической установки при расчетном режиме работы сопла?
8. Какие регистрирующие приборы используются при определении скорости потока с помощью приемника давления?
9. Как определить среднюю скорость потока с помощью приемника воздушного давления?
10. Что такое коэффициент поля скоростей? что он характеризует?
11. Какие точки поперечного сечения потока соответствуют максимальному, минимальному значениям коэффициента поля скоростей?
12. Почему при ламинарном режиме течения максимальный коэффициент поля скоростей больше, чем при турбулентном режиме течения?

Литература

Основная литература

1. Методы и средства измерения экспериментальной баллистики / В.В.Ветров [и др.]; ТулГУ. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2005. – 320 с.

Дополнительная литература

1.Веников В.А. Теория подобия и моделирования. Применительно к задачам электроэнергетики: учебник для вузов. 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Наука. 1984. – 439 с.

2. Красовский Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов .— Минск : Изд-во БГУ им. В.И. Ленина, 1982 .— 302 с

3. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова Ю. В. Грановский .— 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Наука, 1976 .— 279 с.

4. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк ; пер. с англ. Е. Г. Коваленко ; под ред. Н. П. Бусленко .— М. : Мир, 1972 .— 381 с.

5. Ящерицын П.И. Планирование эксперимента в машиностроении / П. И. Ящерицын, Е. И. Махаринский.— Минск : Вышэйшшк., 1985 .— 286 с.