

# ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ “КОЛЬЦЕВОЙ СТРУИ С ПРЕГРАДОЙ”.

Иванов О.Н. Сабуров С.И. Швец А.И.

Экспериментально исследуются случайные стационарные колебания давления при взаимодействии кольцевой струи с преградой в виде жесткого экрана, установленного по нормали к струе. Измеряются суммарный уровень и спектральная плотность пульсаций давления, а также уровень и частота дискретной составляющей.

## Содержание работы.

	стр.
Введение.	2
1. Газодинамическая схема взаимодействия.	3
2. Элементы физической акустики.	4
2.1 Случайные стационарные процессы.	4
2.2 Статистические характеристики пульсаций давления.	5
2.3 Корреляционные функции.	6
3.0 Экспериментальные исследования.	7
3.1 Методика проведения измерений.	8
3.2 Тарировка измерительной системы по уровню и спектру.	9
3.3 Краткие сведения об электронной аппаратуре, приборах и устройствах.	11
4. Последовательность проведения работы	14
Список использованных источников.	18

## Введение.

Исследования старта ракет, вертикального взлета и посадки летательных аппаратов вызвали интерес к газодинамике взаимодействия струи двигателя с поверхностью. Опубликован ряд работ, в которых представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия для осесимметричных сплошных струй.

Были выполнены численные исследования взаимодействия сверхзвуковой струи с плоской преградой. При наличии тройной точки пересечения отошедшей от преграды ударной волны с висячим и отраженным косыми скачками уплотнения [1]. Теоретически и экспериментально исследовано поле течения в окрестности точки пересечения трех скачков уплотнения, образующихся при взаимодействии перерасширенной струи с пластиной [2]. В работе [3] показано, что в случае взаимодействия недорасширенной струи с нормальной к оси струи преградой может возникать центральная отрывная зона вязкого течения, аналогичная отрывной зоне перед уступом. Экспериментально определены интервалы устойчивого и неустойчивого взаимодействия струи с преградой и величины отхода центрального скачка уплотнения и тройной точки от преграды [4]. Для взаимодействия с преградой, установленной нормально под углом к оси струи, найдены эмпирические соотношения, позволяющие определить размеры характерных областей течения [5].

Характерная особенность взаимодействия - появление неустойчивого вихревого течения с колебаниями и волновой структуры, которые сопровождаются мощными пульсациями давления на преграде и генерацией интенсивных звуковых волн в окружающем пространстве. Результаты экспериментального исследования акустического ближнего поля сверхзвуковой струи, натекающей на препятствие, содержатся в работе [6]. Для недорасширенной струи, натекающей на преграду, построена полуэмпирическая теория генерации дискретных тонов [7].

Для сверхзвуковых кольцевых струй, истекающих в затопленное пространство и в спутный, поток экспериментально изучены режимы течения с открытой и закрытой отрывной зоной и соответствующие системы скачков уплотнения [8]. Получены данные по уровням пульсаций, спектральной плотности и дискретной составляющей, вызываемой акустической обратной связью.

## 1. Газодинамическая схема взаимодействия.

Рассмотренные работы по взаимодействию относятся к задачам газодинамики и акустики для осесимметричной сплошной струи, натекающей на преграду. В то же время представляют интерес исследование взаимодействия кольцевой струи. В настоящее время мощные ракеты-носители используют кольцевые компоновки сопел, истекающая суммарная струя приближается к структуре кольцевой струи. Кроме того, в некоторых перспективных летательных аппаратах предполагается использовать и кольцевые сопла, имеющие ряд преимуществ перед обычными осесимметричными соплами, например - меньшие потери тяги при перерасширенной струи ( $n < 1$ ). Как известно, величина  $n = P_s / P_\infty$  - степень нерасчетности струи - отношение давления на выходной кромке сопла  $P_s$  к давлению в окружающем пространстве  $P_\infty = P_{\text{атм}}$ .

В данной работе изучаются случайные стационарные процессы при взаимодействии сверхзвуковой кольцевой струи с нормально установленной пластиной. Эта задача является новой и для нее еще не построены точные схемы взаимодействия. Первые опыты показали, что существуют некоторые общие элементы схемы, например, так же как и у осесимметричной сплошной струи реализуется прямой скачок уплотнения и тройная конфигурация. Однако имеются и различия, в центральной части кольцевой струи образуется область отрывного течения. Так же, как и у осесимметричной струи, при изменении расстояния от среза сопла до пластинки  $h$  появляются режим неустойчивого течения.

Рассмотрим общую картину взаимодействия сверхзвуковой осесимметричной сплошной струи с нормально установленной пластиной (рис.1).

Течение взаимодействия образует, центральный скачок уплотнения перед преградой. Пересечение центрального скачка 1 с висячим скачком 2 приводит к возникновению отраженного скачка 3 и поверхности тангенциального разрыва 4, т.е. к образованию тройной конфигурации в точке А. Поверхность тангенциального разрыва отделяет дозвуковое течение за центральным скачком уплотнения от сверхзвукового течения за отраженным скачком.

С изменением расстояния между соплом и преградой структура ударных волн изменяется следующим образом:

При малых расстояниях  $h$ , (Рис.2) примерно соответствующих расстоянию от среза сопла до точки пересечения первой характеристики, идущей от кромки сопла, с осью струи, центральный скачок обращен выпуклостью в сторону сопла; при увеличении  $h$  центральный скачок обращается выпуклостью в сторону преграды и приводит к появлению неустойчивого течения с колебанием волновой структуры;

по мере дальнейшего увеличения  $h$  неустойчивость уменьшается и на некотором расстоянии от преграды скачки становятся стационарными;

для некоторых режимов истечения струи наблюдается период второго неустойчивого течения;

за слабой неустойчивостью следует скачкообразный переход к устойчивому режиму, при этом перед преградой возникает второй центральный скачок уплотнения.

## 2. Элементы физической акустики.

### 2.1 Случайные стационарные процессы.

Пульсации давления, реализующиеся при взаимодействии струи с преградой, характеризуются широкополосным спектром, присущим спектру сплошного шума и являются случайным стационарным процессом. Случайной называют функцию, значение которой при каждом данном значении аргумента есть случайная величина [9]. Случайную функцию называют случайным процессом. При одном наблюдении случайного процесса получают определенную зависимость - реализацию. Случайная величина  $x(t)$ , которая является значением случайного процесса  $x(t)$  в момент времени  $t=t_1$ , полностью характеризуется одномерной плотностью вероятности  $\omega(x, t)$ . Первый аргумент  $x$  обозначает возможные значения случайного процесса  $x(t)$  при  $t=t_1$ .

Случайный процесс называется стационарным, если все статистические характеристики не зависят от начала отсчета времени.

$$\omega(x_1; t_1; x_2; t_2; \dots; x_n; t_n) = \omega(x_1; t_1 + \tau; x_2; t_2 + \tau; \dots; x_n; t_n + \tau)$$

Для  $n$  значений случайного процесса -  $n$ -мерная плотность вероятности.

Элементарное представление о суммарной интенсивности любого случайного процесса дает среднее значение квадрата, которое представляет собой среднее из всех значений квадрата процесса в пределах данной реализации. Среднее значение квадрата данной реализации  $\overline{p_x^2}$

$$\overline{p_x^2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt$$

где  $T$  - время осреднения.

Абсолютная величина корня квадратного из среднего значения квадрата называется среднеквадратичным значением.

$$\left(\overline{p_x^2}\right)^{0,5}$$

Удобно рассматривать физический процесс в виде суммы статической, т.е. независимой от времени, составляющей и динамической, или флуктуационной составляющей. Статическую составляющую можно получить, вычисляя среднее значение, которое представляет собой просто среднее из всех значений процесса. Среднее значение

$$\mu_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$

Динамическая составляющая определяется дисперсией процесса – величиной, равной среднему квадрату отклонений его координат от среднего значения. Дисперсия процесса:

$$\sigma_x^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \mu_x]^2 dt$$

Положительное значение корня квадратного из дисперсии называется среднеквадратичным отклонением. Среднее значение квадрата

$$\overline{P_x^2} = \mu_{\delta}^2 + \sigma_{\delta}^2$$

Методы определения характеристик случайных процессов можно разделить на две группы: методы определения общих характеристик процесса по наблюдениям некоторой совокупности реализаций и методы определения статистической характеристики по одной реализации. В наших испытаниях применяется второй метод.

## 2.2 Статистические характеристики пульсаций давления.

Пульсации давления, изучаемые при обтекании тел и в большинстве задач акустического излучения сверхзвуковых струй, представляют собой слабые возмущения среды. Эти возмущения свойственны также акустическим процессам. В случае сильных возмущений, например, ударные волны в газах, имеет место малый перенос вещества, вследствие нелинейных колебаний частиц среды.

Акустическими волнами называются распространяющиеся в упругой среде слабые возмущения - механические колебания с малой амплитудой. При малых амплитудах (линейное приближение) распространение волн не связано с переносом вещества.

Акустические волны - это продольные волны, вызывающие объемную деформацию среды, в которой частицы совершают колебания в направлении распространения волн (поперечные волны распространяются только в твердых телах).

Терминология, используемая при изучении пульсаций давления аналогична в акустике. Ниже приведены некоторые определения, применяемые как в гидродинамических, так и в акустических задачах.

Звуковое давление - дополнительное переменное давление, возникающее при прохождении "звуковой" волны ( $\text{н/м}^2$ , в системе СИ и МГК или  $\text{дин/см}^2$ , в системе СГС). Для гармонических колебаний - эффективное звуковое давление обозначают  $P'$ , а амплитудное звуковое давление избыточное над равновесным давлением обозначают  $P_0$ .

Интенсивность звука (сила звука) - средний поток звуковой энергии, проходящей через единицу площади

$$J = P^2 / \rho * a \quad (\text{Вт/м}^2, \text{ эрг/сек см}^2)$$

где  $\rho$  - плотность,  $a$  - скорость звука.

Плотность звуковой энергии - количество звуковой энергии, приходящейся

на единицу объема упругой среды  $E=J/a=P^2/P_0^*$  (дж/м<sup>3</sup>, эрг/см<sup>3</sup>).

Звуковая мощность - количество звуковой энергии, проходящей через данную поверхность в единицу времени  $W=J*S$  Вт, эрг/сек, где  $S$  - площадь поверхности.

Интенсивность пульсаций, встречающихся на практике, меняется в очень широких пределах, поэтому применяется логарифмическая шкала и уровни, измеряемых величин используются в децибелах (дБ).

Уровень звукового давления  $L=20\lg P/P_0^*$  - характеристика звукового давления по отношению к условному порогу звукового давления  $P_0^*$ , где  $[L]$ дБ,  $P_0^* = 2 \cdot 10^{-5}$  Па. (Рис.3)

Физическая спектральная плотность пульсаций давления (средний квадрат пульсаций давления в полосе шириной 1 Гц) обозначается

$$\overline{P_x^2}(f)$$

Средний квадрат пульсаций давления определяется

$$\overline{P_x^2} = \int_0^{\infty} \overline{P_x^2}(f) df$$

и соответственно среднеквадратичное значение пульсаций записывается

$$\left(\overline{P_x^2}\right)^{0,5}$$

При построении спектрограмм в газовой динамике по оси абсцисс обычно откладывается безразмерная частота в виде числа Струхала  $Sh=fd/v$ , где  $d$  - характерный размер (диаметр среза сопла). При проведении спектрального анализа на приборах с полосой анализа  $\Delta f$  равной 1Гц, уровни приводятся к спектральной плотности с помощью следующего выражения:

$$L_{\Delta f=1\text{Гц}} = 20 \lg \frac{\left(\overline{P^2}\right)^{0,5}}{P_H} - 10 \lg \Delta f$$

### 2.3 Корреляционные функции.

Автокорреляционная функция случайного процесса характеризует общую зависимость значений процесса в некоторый данный момент времени от значений в другой момент. Оценку величины автокорреляционной функции можно получить, вычисляя произведение координат  $x(t)$  в момент времени  $t$  и  $(t + \tau)$ . Усредняя величину произведения в пределах времени наблюдения  $T$ , величина  $R_x(\tau)$  всегда действительная четная функция с максимумом в точке  $\tau = 0$ ; она может быть как положительной, так и отрицательной.

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T x(t) x(t \pm \tau) dt$$

Среднее значение функции  $x(t)$  равно положительному значению корня квадратного из автокорреляционной функции, взятой при очень большом сдвиге  $\mu_\infty = \sqrt{R_{x_\infty}}$ . Среднее значение квадрата функции равно значению автокорреляционной функции при нулевом сдвиге  $\overline{P_x} = R_{x(0)}$ . Взаимная корреляционная функция двух случайных процессов характеризует общую зависимость значений одного процесса от значений другого. Оценку величины взаимной корреляционной функции, связывающей процесс  $x(t)$  в момент времени  $t$  и значение процесса  $y(t)$  в момент  $t + \tau$ , можно найти, вычислив среднее значение произведения их за время наблюдения  $T$ .

$$\pm R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) y(t \pm \tau) dt$$

Величина  $R_{xy}(\tau)$  может быть положительной и отрицательной и не обязательно четной.

### 3.0 Экспериментальные исследования.

При обтекании тел или истечении воздушной струи, как правило, возникают отрывные зоны и срыв потока или пограничного слоя, образование вихрей и возвратно циркуляционных течений и их взаимодействия между собой. Это приводит к тому, что линии тока искривляются, изменяются направления, скорость, давление в зонах и локальных точках течения.

Все эти особенности относятся к области нестационарных процессов в аэродинамике, где при различных скоростях потока на уровне возмущений от трения частиц газа и вихреобразования приводит к появлению звукового колебания давления в локальной точке, которое характеризуется амплитудой и частотой.

В ряду с классических и фундаментальных методов экспериментальных исследований, измерение и изучение пульсаций давления является дополнительным способом получения информации для научных результатов, который основан на использовании законов и формул на стыке двух наук аэродинамики и акустики.

Характерным примером задачи по исследованию пульсаций давления следует отнести фундаментальное исследование струи воздуха в окружающее воздушное пространство (рис.4).

Для модели струи с преградой имеет место различные схемы течения и характер распределения давления по поверхности пластины (рис.1,2,4). Наряду с стационарной картиной при постоянных параметрах, следует отметить нестационарные явления в локальной точке (например на срезе сопла) обусловленные

течениями в районе возвратно циркуляционной зоны или на поверхности преграды при растекании струи. В данном случае имеет место нестационарные величины звукового давления, имеющие знакопеременные значения, которые характеризуются амплитудой и частотой относительно постоянного давления в точке.

### 3.1 Методика проведения измерений.

В данном газодинамическом эксперименте информация поступает в виде электрического сигнала, преобразованного из неэлектрического сигнала (давление, скорость и т.д.). При помощи различного вида датчиков электрические сигналы соответствующим образом обрабатывается с помощью электронных приборов. Ниже дано краткое описание используемой аппаратуры, функциональной связи в виде расширенной и обобщенной блок-схеме (Рис.5), а также некоторой необходимой терминологии.

Измерительный комплекс состоит из классических элементов и электронных приборов, где аналоговый электрический сигнал от датчиков с помощью аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) преобразуется в цифровой вид сигнала. С появлением датчиков разработанных по новым технологиям, современных электронных приборов и компьютерных технологий с программным обеспечением измерительный комплекс постоянно совершенствуется.

Объект исследования в данной методической работе является кольцевое сопло, представляющее собой обечайку с центральным телом рис. 6 из которого кольцевая воздушная “затопленная” струя истекает на плоский экран, (“затопленная” струя – это когда в окружающее пространство вдувается однородный газы, в данном случае воздух вдувается в окружающее воздушное пространство).

Скорость истечения соответствует числу Маха  $M \leq 1$ , диаметр сопла  $d = 30$ мм (выходное отверстие). Расстояние от среза сопла до экрана и режимы истечения выбираются экспериментатором.

Для получения зависимости  $P_s = f(P_0 / P_{атм})$ , дающей представление о перестройках структуры струи в зоне среза сопла измеряется давление в форкамере сопла  $P_0$  и на торце сопла  $P_{ср}$  с помощью пары потенциометрических датчика. Электрические сигналы от датчиков подведены ко входам X и Y через АЦП (аналого цифровой преобразователь) фиксируются и обрабатываются на ПК (персональный компьютер).

Непосредственно в центральной точке оси сопла проводится измерение давления на срезе  $P_s$  (Рис.4,6). В плоскости среза сопла (выходного отверстия) ( $r=0$ ) на (центральном теле) установлен индуктивный датчик (МПДИ), измеряющий пульсации давления, вернее, преобразующий пульсации давления в локальной точке на срезе сопла при взаимодействии воздушной струи с экраном в эквивалентные пульсации электрического сигнала.



Индуктивный датчик подключен к входу тензоусилителя УТС-12-35, с выхода которого усиленный сигнал, поступает на шумомер типа ИШВ-1, измеряющий уровень шума. Выходной сигнал прибора шумомера проградуирован в дБ. Запись показаний этого прибора при изменении условий в зоне взаимодействия струи с преградой дает характеристику изменения  $L_{\Sigma}$  - суммарного уровня шума пульсаций в зависимости от  $P_0$  - давления в форкамере сопла.

Зависимость  $L_{\Sigma} = f(P_0 / P_{\text{атм.}})$ , дает возможность оценить физическую связь аэродинамики истекающей струи с ее акустическими свойствами в локальной точке с последующими выводами о не стационарных процессах в струе и их значении для научных и прикладных задач. Отдельной задачей можно рассматривать акустический фон струи, как источник шума и воздействие звукового давления на окружающее пространство.

Кроме суммарного уровня шума  $L_{\Sigma}$  имеют место пульсационные составляющие спектральные характеристики и дискретный тон. Для исследования этих явлений используется устройство "долговременной памяти" – цифровой магнитофон М-168 параллельно подключен к тем же выходным клеммам усилителя УТС-12-35, что и шумомер и осуществляет регистрацию пульсационного сигнала на "кольцевую ленту". Длительность реализации - 5 сек. Диапазон регистрируемых частот 100-20000 Гц.

На выходе магнитофона устанавливается аппаратура для проведения спектрального анализа сигнала, поступающего на измерительную систему. В данном случае применяется анализатор гармоник низких частот типа С5-3 или С4-48 или СК-4-20, осуществляющий разложение сигнала сложной формы на гармонические составляющие, используя гетеродинное преобразование и последовательный опрос по частотам в диапазоне 20 Гц- 20 кГц. Ширина полосы опроса  $\Delta f = 7$  Гц. Регистрация спектра - автоматическая при использовании самописца типа Н-100.

Целью спектрального анализа акустических процессов, кроме непосредственной информации (например, определения частот основных гармоник, выявление участков спектра с наибольшей интенсивностью), является сравнение между собой спектрального состава различных процессов. Сравнение материалов анализа может производиться только при соответствующей унификации способов изображения результатов анализа. Полученные с Н-110 спектрограммы представляют собой графики зависимости уровня гармонических составляющих от частоты, причем развертка по частоте осуществляется в линейном масштабе, а по уровню в логарифмическом.

Если в исследуемом процессе присутствуют дискретные составляющие, то они наблюдаются на спектре пульсаций в виде пико образных линий, выступающих над записью спектра. Детальное изучение этих составляющих, пред-

ставляющих собой уровни пульсаций, в полосе опроса  $\Delta f = 7$  Гц можно определить частоту  $f$  и положение дискретной составляющей. И, если цель исследования заключается в выявлении отдельных дискретных составляющих, то лучше всего применять узкополосный анализ с постоянной шириной полосы пропускания. Во время анализа частотные составляющие флуктуируют во времени как по частоте, так и по амплитуде. При излишне узкополосном анализе результаты опыта могут быть искажены. Поэтому в звуковом диапазоне частот применяется анализ с полосой пропускания  $\Delta f = 5 - 20$  Гц.

### 3.2 Тарировка измерительной системы по уровню и спектру.

Для тарировки потенциометрических сильфонных датчиков давления типа МДД при измерении давления  $P_0$  в форкамере сопла и давления  $P_s$  на срезе сопла используются образцовые манометры.

Для проведения тарировок по уровню (Рис.7) и спектру (Рис.8) применяется комплект эталонного шумомера ИШВ-1 с конденсаторным микрофоном. Источник акустических колебаний, с помощью которых производится тарировка, по уровню состоит из приспособленного для этой цели динамического громкоговорителя (ГД), усилителя мощности ГУ-100 и звукового генератора ГЗ-33.

Измерительная система от датчика до регистраторов проходит предварительную тарировку по уровню и спектру. Тарировка по уровню осуществляется от источника акустических возмущений (динамический громкоговоритель - усилитель ГУ-100 - генератор низких частот ГЗ-33).

В измерительную зону помещаются рядом тарируемый датчик и эталонный микрофон измерителя шума и вибраций ИШВ-1. При этом показания ИШВ-1 параллельно определяют уровень сигнала на Н-110 и ВК7-10А. Полученные в эксперименте уровни отсчитываются относительно тарировочного уровня:

$$(L_p - L_T) + L_{\Sigma} = L_{\Sigma}$$

Где:

$L_{\Sigma}$  – уровень, измеренный эталонным шумомером -1 (рис.7) через микрофон в зоне воздействия тарирующего сигнала,

$L_p$  – показания шумомера, измеряющего  $L_{\Sigma}$  в эксперименте,

$L_T$  – показания шумомера-2 при проведении тарировки

Спектральная тарировка производится сравнением частотной характеристики системы "датчик-запись-анализ" и эталонной характеристикой "микрофон-запись-анализ". В качестве источника шума, имеющего широкий частотный спектр, используется шум истекающей воздушной струи имеющей широкий частотный спектр (рис.8).

Оценка среднеквадратичной ошибки (систематические ошибки полагались распределенными по нормальному закону) при определении среднеквадратичного значения уровней спектра анализируемого процесса следующая:

погрешность датчика давления из-за нелинейности  $\pm 1\%$ ; тензостанции УТС-12-35 -  $+3.6\%$ ; магнитофона М-168 -  $+1.5\%$ ; анализатора С5-3 -  $\pm 10\%$ ; самописца Н-110 -  $+ 11\%$ , Относительная среднеквадратичная ошибка измерений амплитуд всего регистрационно-измерительного тракта при надежности 40% равна  $\sigma = + 15.4\%$ . Погрешность в определении частот складывается из погрешностей: анализатора -  $\pm 1\%$ , самописца -  $\pm 2\%$ , она равна 20%.

### 3.3 Краткие сведения об электронной аппаратуре, приборах и устройствах.

Индикаторы и регистрирующие приборы. Всякий тракт измерительного комплекса включает в себя индикатор, показывающий значения измеряемой величины или регистрирующий прибор, оставляющий запись проведенного измерения. Наиболее распространенными в практике индикаторами являются вольтметры. Для регистрации сигналов могут быть применены фото приставки к осциллографам, магнитофоны и быстродействующие самописцы уровней. Широко используется запись с помощью самописцев уровней. Динамический диапазон их может достигать 75 дБ.

В данной работе использовался индуктивный дифференциальный датчик давления (рис.9). Конструктивно датчик представляет собой цилиндр диаметром 6 мм, высотой 5 мм с двумя выступающими трубками. Внутри цилиндра помещены две катушки индуктивности  $L_1$  и  $L_2$ , между которыми находится чувствительная мембрана М. Деформация мембраны пропорциональна разности давлений  $\Delta P = P_1 - P_2$ , где  $P_1$  и  $P_2$  давления, подаваемые к трубкам. Максимальный перепад давления для используемого датчика составляет 0.25 ата. Сопротивление обмотки датчика  $Z = R + j \omega L$ , где  $R$  - активная составляющая сопротивления (величина, зависящая только от диаметра, длины и удельного сопротивления провода катушек);

$x_L = j \omega L$  - индуктивная составляющая сопротивления обмотки (величина, зависящая от частоты источника питания и индуктивности), при сближении мембраны и обмотки индуктивность последней возрастает. Обмотки датчика включены в мостовую схему “мостик” Уинстона, (рис.10), где  $K$  – коэффициент усиления тензометрического усилителя. Мост питается напряжением с частотой  $f=35$  кГц. Перед экспериментом мост балансируется. Условие баланса моста  $Z_1 * Z_2 = Z_3 * Z_4$ .

На (рис.11) показано крепление датчика пульсаций давления на пластине. Использование трассы “капилляр - демпфирующий объем – трубка” обеспечивает осредненное давление в одной из половин датчика. Датчик фиксирует толь-

ко пульсационную составляющую в диапазоне частот от десятков Гц до 4 - 5 кГц.

Приемники колебаний давления (в данном случае индуктивный дифференциальный датчик) характеризуются:

- способом преобразования пульсаций давления в электрический сигнал (электродинамические, пьезоэлектрические, электростатические и т.д.),
- величиной осевой чувствительности - отношением напряжения холостого хода, развиваемого датчиком к давлению гармонической волны, падающей в направлении этой оси волны,
- направленностью и распределением чувствительности датчика при падении волн возмущения под различными углами, отнесенной к его осевой чувствительности,
- уровнем собственных шумов датчика, определяемым относительно напряжению  $U_{ш}$ , возникающего под воздействием сигнала с давлением  $P$ , где  $U_{ш}$  напряжение шумов при отсутствии полезного сигнала,
- частотной характеристикой и зависимостью чувствительности от частоты,
- габаритным размером, немаловажным параметром в технике аэродинамического эксперимента,
- степенью чувствительности к изменению условий эксперимента,
- влияние вибрации, колебания температуры, влажности и т.д.

Совокупность перечисленных характеристик и определяет выбор того или иного датчика для проведения эксперимента.

Используемые в данной работе индикаторы типа шумомер ИШВ-1 предназначены для измерения интенсивностей шума при наличии собственного микрофона (М-101) до уровней порядка 130дБ. Фиксируемый частотный диапазон 20-10000 Гц при равномерности в этом диапазоне равной 0,5дБ. При замене микрофона датчиком шумомер нуждается в предварительной тарировке.

В работе кроме индуктивного датчика используются два потенциометрических сильфонных датчика давления типа МДД для измерения давления  $P_0$  в форкамере сопла и давления  $P_s$  на срезе сопла.

Регистратор уровня типа Н-110 предназначен для непрерывной записи сигнала меняющегося по интенсивности в логарифмическом масштабе уровня пульсаций давления при полосе опрашиваемого фильтра 7 Гц в диапазоне от 100 Гц до 200 кГц. Запись производится на специальной перфорированной ленте, имеющей графления по оси уровней через 5 дБ.

Двух координатный самопишущий регистратор ПДС-021 М позволяют по-

лучать зависимости двух величин  $P_s = f(P_0)$ . Этот регистратор работает от любых датчиков и усилителей с сигналом на выходе по  $X$  – входу порядка 5 мВ - 250 В и 7 мВ - 350 В по  $Y$  - входу. Время прохождения каретки всего поля по оси  $X$  -1.5 сек, по оси  $Y$  - 1сек. Размер диаграммы 250x350 мм.

Следует отметить некоторые особенности регистрации сигналов с помощью измерительных магнитофонов. Магнитная запись представляет собой универсальную регистрацию исходных данных, т.к. при воспроизведении можно осуществить индикацию и регистрацию их любым из известных способов, Кроме того, воспроизведение может быть многократным, что позволяет осуществить практически любой анализ (амплитудный, спектральный, корреляционный), не повторяя эксперимент.

В условиях нашей задачи, когда время анализа значительно превышает время эксперимента, магнитная запись ставится обязательной. Измерительный магнитофон по сравнению с бытовым магнитофоном должен иметь некоторые отличия:

Он должен иметь устройство для ступенчатой регулировки уровня записи и воспроизведения. (Плавная регулировка, применяемая в бытовых магнитофонах, не позволяет получать точные количественные соотношения при воспроизведении); необходим точный прибор для индикации (желательно со шкалой, проградуированной в дБ);

должен быть предусмотрен калибратор, обеспечивающий контрольный уровень записи на ленте;

должна быть предусмотрена также возможность использования различной скорости движения ленты;

нелинейные искажения и детонация измерительных магнитофонов должны быть минимальными, а частотный диапазон по возможности более широкий.

Ниже приведены некоторые параметры используемого в эксперименте магнитофона типа М-168:

- количество каналов регистрации – 5
- диапазон измеряемых частот от 1 Гц до 20 кГц (два поддиапазона; I – от 1 до 1000 Гц, II – от 100 Гц до 20 кГц);
- допускается "кольцевая" запись;
- скорость движения ленты - 38.1 см/сек ,
- суммарный коэффициент детонации не хуже 0.25 %,
- номинальные уровни входного сигнала 0.4 - 5 В,
- номинальное выходное напряжение сигнала  $3 + 0.2$  В,

- входное сопротивление - 100 ком,
  - коэффициент нелинейных искажений 1.5 %
- вес аппарата 480 кг.

Анализатор спектра ( в данном случае СК -4-20) - аппаратура, позволяющая определить спектральный состав исследуемого сигнала. Различные анализаторы и спектрометры имеют свои характерные особенности в своем устройстве:

1.Набор фильтров со ступенчатым переключателем. Такая система осуществляет последовательный анализ. Фильтры выполняются с постоянной относительной шириной полосы пропускания (октавные, полу октавные и треть октавные). Для октавы верхняя частота в два раза больше нижней, а треть октавы вершины  $f_B/f_H = \sqrt[3]{2} = 1.25992$ .

Средние частоты интервала являются среднегеометрическими значениями граничных частот. Для октавы  $f_B/f_H = \sqrt[3]{2.8} = 1.41$ , а треть октавы  $f_B/f_H = \sqrt[3]{1.41} = 1.12$ .

2. Фильтровые спектрометры с автоматическим переключением, выполняемые путем последовательного или одновременного анализа с постоянной относительной полосой пропускания; в качестве индикатора выхода используется электронно-лучевая трубка или же производится запись на самописец уровня;
3. гетеродинные спектрометры, обеспечивающие последовательный анализ с постоянной полосой пропускания ( $\Delta f = 7$  Гц или 200 Гц).

Анализ записи нестационарного процесса с магнитной пленки выполняется многократным воспроизведением исследуемого участка ("кольцевал" запись) с последовательным анализом. Кольцо из магнитной пленки позволяет создать, так называемы квазистационарный сигнал, аналогичный периодической последовательности исследуемого шума. Необходимое для анализа время регистрации  $T$ , где  $f_H$  - нижняя частота исследуемого диапазона частот  $T \geq 10/f_H$ .

Визуализация картины течения. Для визуализации, истекающей из сопла струи в работе используется шпирен метод с помощью оптического прибора Теплера ИТ-14 и записью изображения при помощи видеокамеры, подключенной к компьютеру.

#### 4. Последовательность проведения работы.

Вариант 1

Содержание эксперимента: Измерение суммарного уровня пульсаций давления в центре торцевого сечения на срезе кольцевого сопла с постоянным расстоянием- $h$  от сопла до экрана при различных давлениях в форкамере  $P_0$  кольцевого сопла. Датчик пульсаций давления установлен в центре торцевого сечения.

1. Ознакомиться с газодинамической установкой, устройством модели коль-

цевого сопла, расположением датчиков, установленной аппаратурой и ее подключение согласно с блок-схемой измерений, Руководствоваться методическими указаниями к работе.

2. Ознакомиться с методикой тарировки по уровню и спектру.
3. Включить аппаратуру, прогреть ее в течение 15-20 минут.
4. Установить сопло перед преградой на расстоянии  $h = \text{Const}$ .
5. Плавно открывая воздушный вентиль, (менять избыточное давление в форкамере сопла  $P_{\phi}$  от 0 до 7 ати. с шагом 1 ати.) произвести с помощью самописца ПДС-021М запись зависимость давления на срезе сопла от давления в форкамере сопла. Пересчитать Величины измеренных стационарных давлений пересчитать в абсолютном значении по формуле

$$P_{\text{абс.}} = P_{\text{атм.}} \pm P_{\text{изм.}}$$

$$\text{В форкамере сопла } P_0 = P_{\text{атм.}} + P_{\phi}$$

$$\text{На срезе сопла } P_s = P_{\text{атм.}} - P_{\text{ср.}}$$

6. С помощью ИШВ-1 измерить суммарный уровень  $L_{\Sigma}$  для каждого значения  $P_s$  от  $P_0$ .
7. Записать полученные результаты в таблицу.
8. Записать на "кольцо" М-168 пульсационный сигнал от датчика при  $P_{\phi} = 1$  ати.
9. Закрыть воздушный вентиль.
10. Снять с кольцевой записи спектральное распределение с помощью анализатора СК-4-20 и регистратора Н-110.
11. Определить суммарный уровень  $L_{\Sigma}$  и распределение спектральной плотности по частоте  $f$  на спектрограмме.
12. Построить графики:

$$a.) P_0/p_{\text{атм.}} = f(n); \quad б.) L_{\Sigma} = f(n); \quad в.) \frac{(\bar{P}^2)^{0.5}}{q_{\infty}} \cdot 10^{-2} = f(M_{\infty})$$

$$г.) L_{\Delta F} = f(F)$$

Для расчетов использовать следующие формулы:

1.  $L_{\Sigma} = L + \Delta L$   $P_{\infty} = P_{\text{атм}} = 1 \text{ атм} = 1 \text{ мг/см}^2 = 10^5 \text{ Па}$
2.  $n = P_s / P_{\infty}$  Условный порог звукового давления:  
 $P_0^* = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$
3.  $M_{\infty} = \sqrt{5 \left[ \left( \frac{P_0}{P_{\infty}} \right)^{0,28} - 1 \right]}$
4.  $q_{\infty} = 0,7 P_{\infty} M_{\infty}^2$
5.  $L_{\Sigma} = 20 \cdot \lg \frac{(\bar{P}^2)^{0,5}}{P_0^*}, (\text{дБ}) \Rightarrow (\bar{P}^2)^{0,5} = P_0^* \cdot 10^{\frac{L_{\Sigma}}{20}} \text{ Па} = 2 \cdot 10^{-10} \cdot 10^{\frac{L_{\Sigma}}{20}} \text{ атм}$

### Вариант2

Содержание эксперимента: Измерение суммарного уровня пульсаций давления в центре плоской преграды с постоянным расстоянием-  $h$  от сопла до экрана при различных давлениях в форкамере  $P_0$  кольцевого сопла. Датчик пульсаций давления установлен в центре плоскости преграды.

1. Ознакомиться с газодинамической установкой, устройством модели кольцевого сопла, расположением датчиков, установленной аппаратурой и ее подключение согласно с блок-схемой измерений, Руководствоваться методическими указаниями к работе.
2. Ознакомиться с методикой тарировки по уровню и спектру.
3. Включить аппаратуру, прогреть ее в течение 15-20 минут.
4. Установить сопло перед преградой на расстоянии  $h = \text{Const}$ .
5. Плавно открывая воздушный вентиль, (менять избыточное давление в форкамере сопла  $P_{\phi}$  от 0 до 7 ати. с шагом 1 ати.) произвести с помощью самописца ПДС-021М запись зависимость давления на срезе сопла от давления в форкамере сопла. Пересчитать Величины измеренных стационарных давлений пересчитать в абсолютном значении по формуле

$$P_{\text{абс.}} = P_{\text{атм.}} \pm P_{\text{изм.}}$$

$$\text{В форкамере сопла } P_0 = P_{\text{атм.}} + P_{\phi},$$

$$\text{На срезе сопла } P_s = P_{\text{атм.}} - P_{\text{ср.}}$$

6. С помощью ИШВ-1 измерить суммарный уровень  $L_{\Sigma}$  для каждого значения  $P_s$  от  $P_0$ .
7. Записать полученные результаты в таблицу.
8. Записать на "кольцо" М-168 пульсационный сигнал от датчика при  $P_{\phi} = 1$  ати.



9. Закрывать воздушный вентиль.

10. Снять с кольцевой записи спектральное распределение с помощью анализатора СК-4-20 и регистратора Н-110.

11. Определить суммарный уровень  $L_{\Sigma}$  и распределение спектральной плотности по частоте  $f$  на спектрограмме.

12. Построить графики:

$$a.) P_0/p_{атм.} = f(n); \quad б.) L_{\Sigma} = f(n); \quad в.) \frac{(\bar{P}^2)^{0,5}}{q_{\infty}} \cdot 10^{-2} = f(M_{\infty})$$

$$г.) L_{\Delta F} = f(F)$$

Для расчетов использовать следующие формулы:

$$1. \quad L_{\Sigma} = L + \Delta L$$

$$P_{\infty} = P_{атм} = 1 \text{ атм} = 1 \text{ мг/см}^2 = 10^5 \text{ Па}$$

$$2. \quad n = P_s/P_{\infty}$$

Условный порог звукового давления:

$$P_0^* = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$$

$$3. \quad M_{\infty} = \sqrt{5 \left[ \left( \frac{P_0}{P_{\infty}} \right)^{0,28} - 1 \right]}$$

$$4. \quad q_{\infty} = 0,7 P_{\infty} M_{\infty}^2$$

$$5. \quad L_{\Sigma} = 20 \cdot \lg \frac{(\bar{P}^2)^{0,5}}{P_0^*}, \text{ (дБ)} \Rightarrow (\bar{P}^2)^{0,5} = P_0^* \cdot 10^{\frac{L_{\Sigma}}{20}} \text{ Па} = 2 \cdot 10^{-10} \cdot 10^{\frac{L_{\Sigma}}{20}} \text{ атм}$$

**Список использованных источников.**

1. Дублинская Н.В., Иванов М.Я. Численное исследование стационарных режимов взаимодействия сверхзвуковой недорасширенной струи со сплошной преградой, расположенной перпендикулярно к ее оси. Изв. АН СССР, МЖГ, 1976, № 5 .
2. Kaightgi G.T and Hunt B. L. The three-shock confluence problem for normally impinging overexpanded jets. Aeron. Quart, 1975, Y, 26, N2.
3. Губанова О.И., Лунев В.В., Пластилина Л.Н. О центральной срывной зоне при взаимодействии сверхзвуковой недорасширенной струи с преградой. Изв. АН СССР, МЖГ, 1971, № 2.
4. Семилетенко Б.Г., Усков В.Н. Экспериментальные зависимости, определяющие положение ударной волны в струе, натекающей на преграду, перпендикулярную ее оси. ШЖ, 1972, IX, 23, № 3.
5. Анцупов А.В. Взаимодействие сверхзвуковой нерасчетной струи с плоской преградой. М., Труды ЦАГИ, 1975, вып.1698.
6. Pan Y.S. , Preisser J.S. A method for studying near and far-field noise characteristics of impinging jets. AIAA Paper, N 74-569, 1974.
7. Глазнев В.Н., Демин В.С. Полуэмпирическая теория генерации дискретных тонов сверхзвуковой недорасширенной струей, натекающей на преграду. ИЗШ, СО АН СССР, Препринт № I, 1976,
8. Швец А.И., Швец И.Т. Газодинамика ближнего следа. Наукова думка, Киев, 1976 .

НИИ механики МГУ им. М.Ю.Ломоносова.

с.н.с. Иванов Олег Николаевич

т.8 903 664 45 44

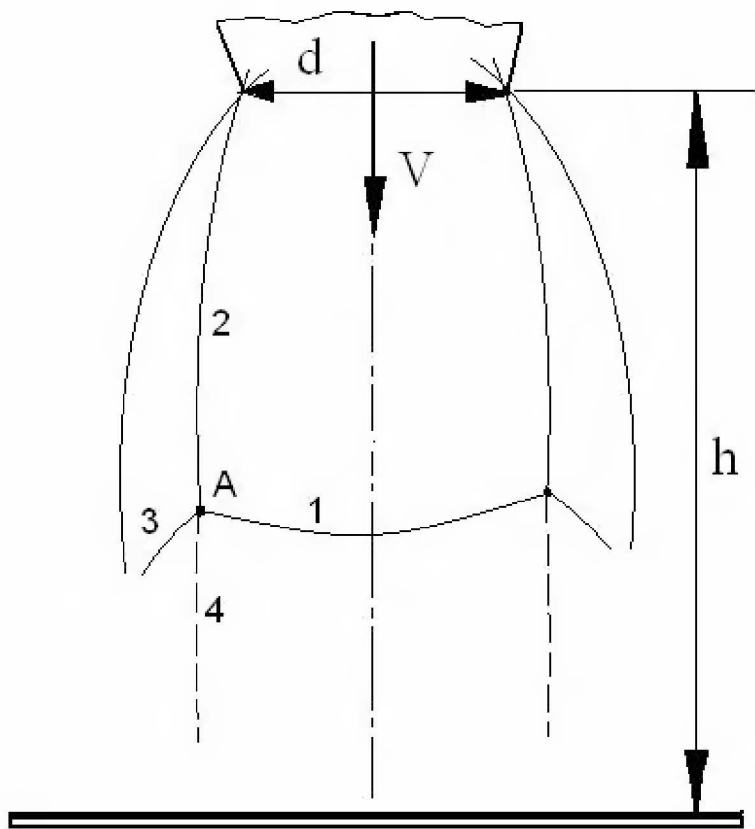


Рис.1 Картина взаимодействия сверхзвуковой струи с пластиной.

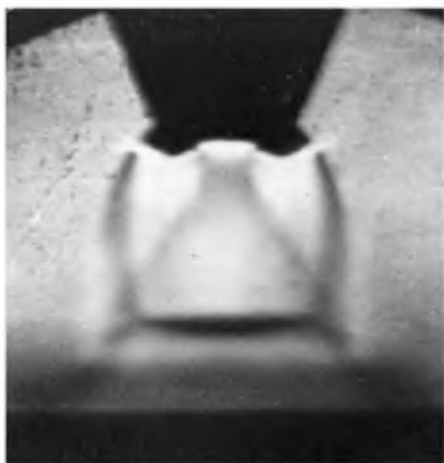


Рис.2 Структура ударных волн с изменением расстояния сопла от преграды.

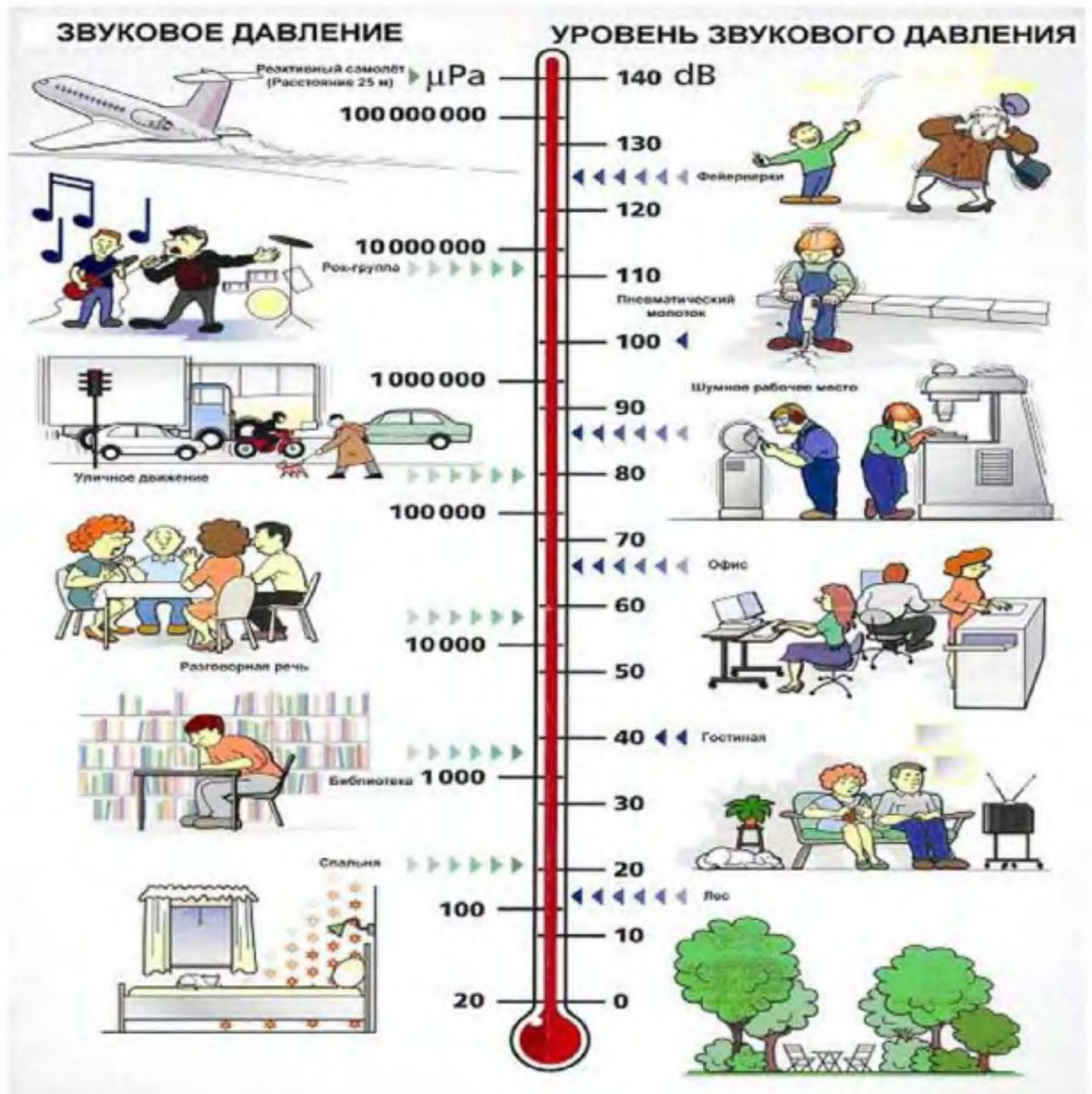


Рис.3

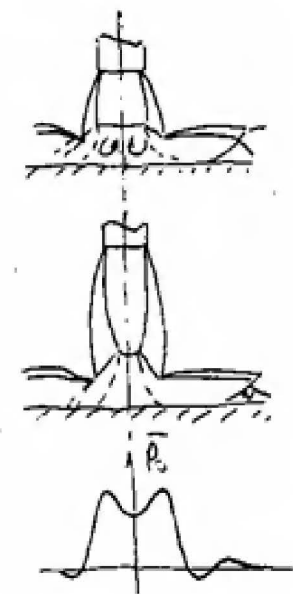
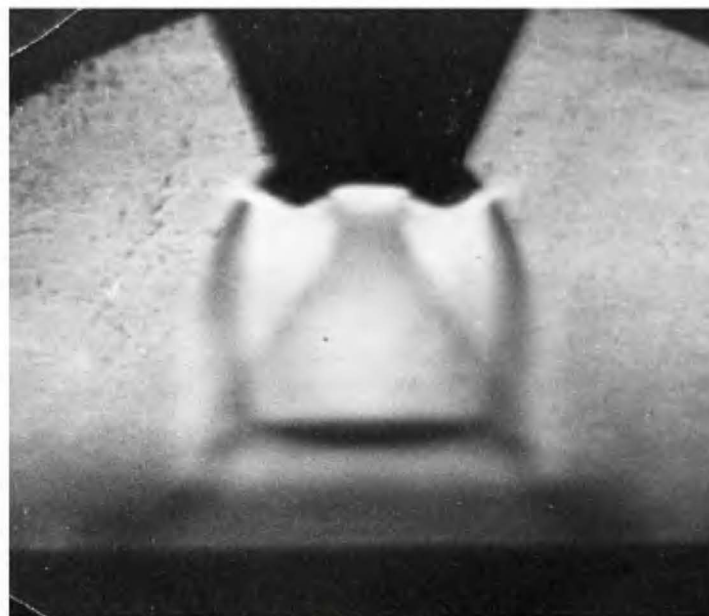
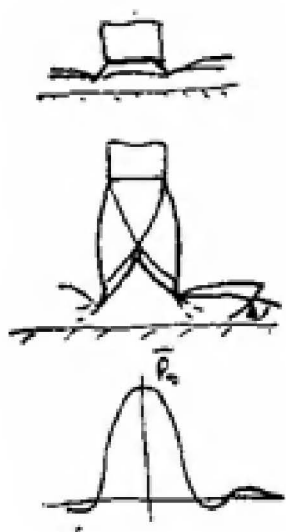
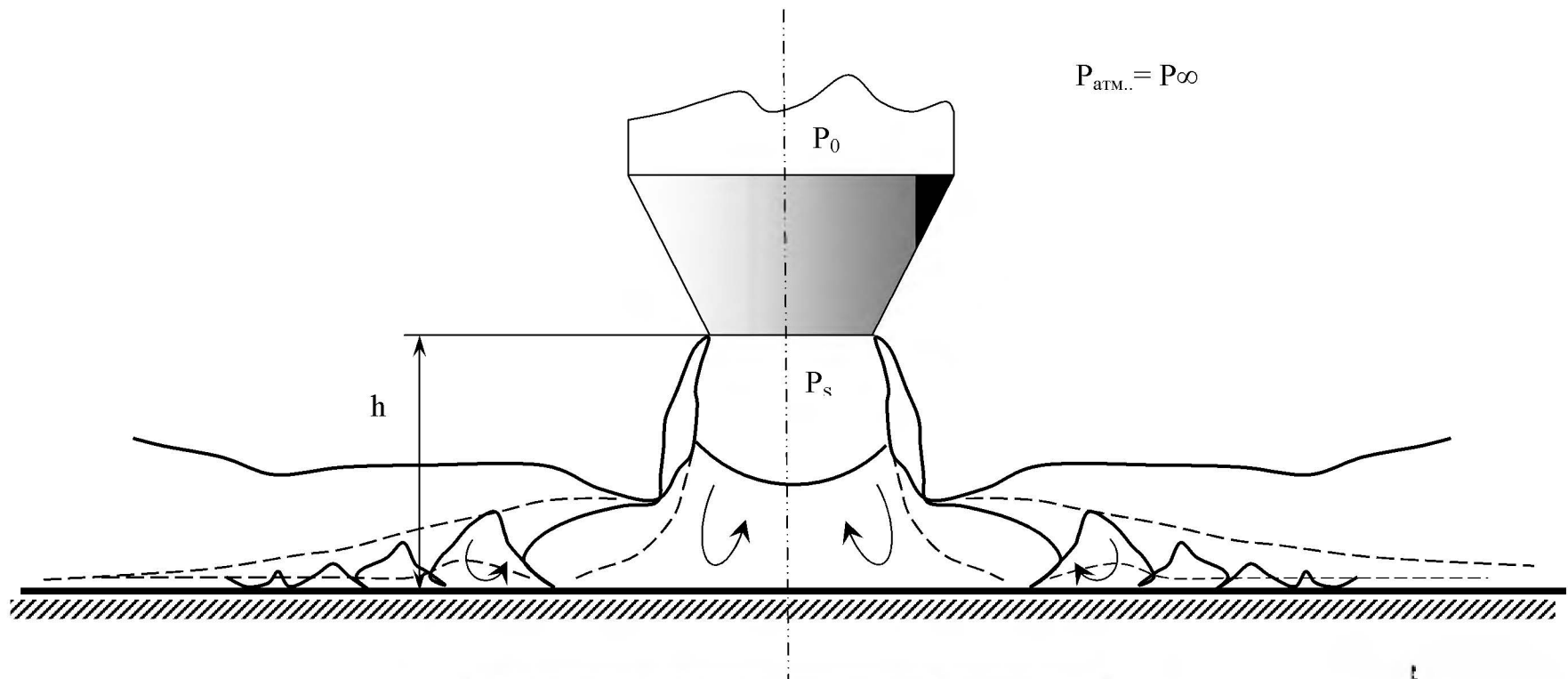


Рис.4

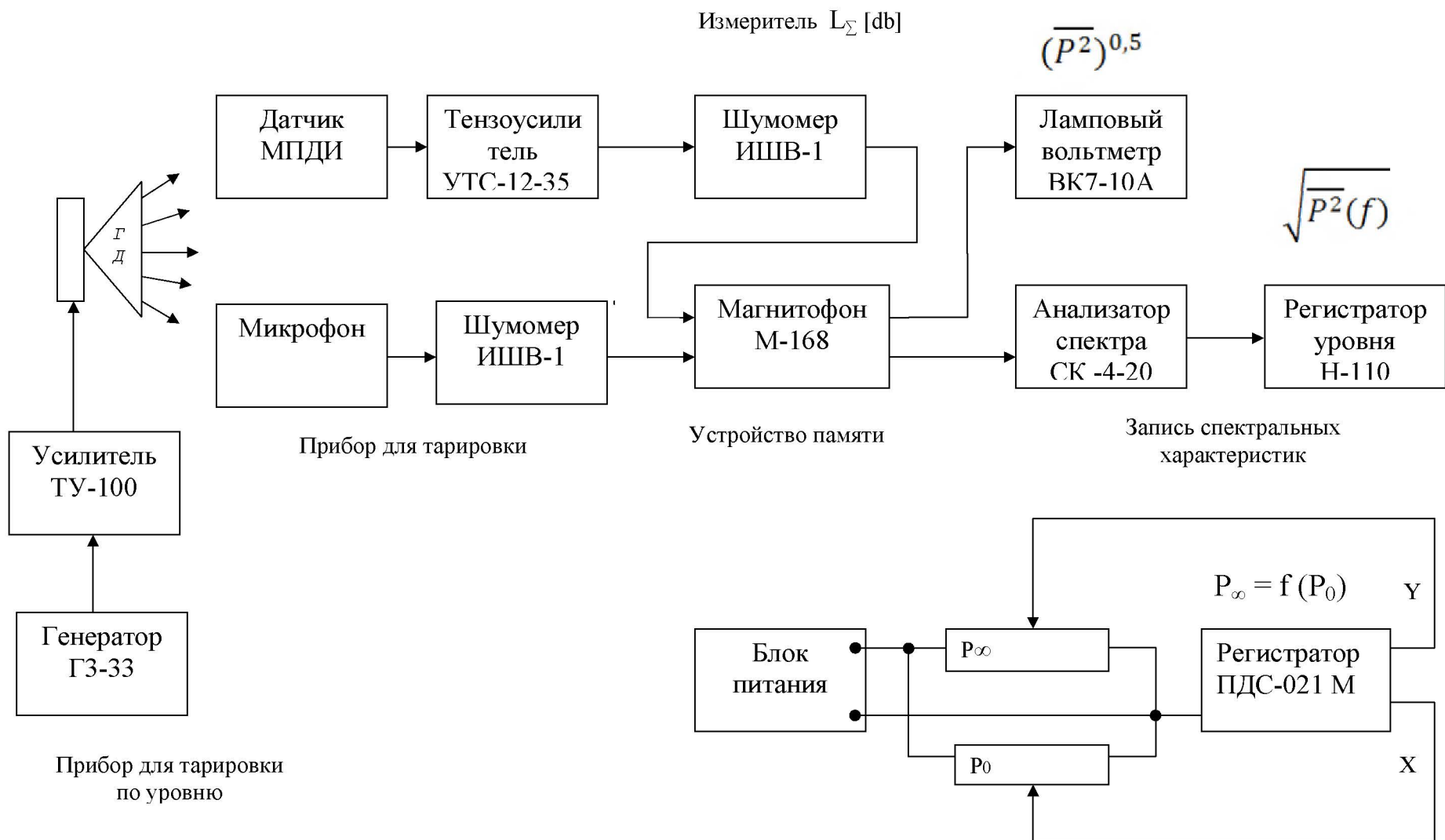


Рис.5 Блок-схема измерений пульсаций давления и тарировок.

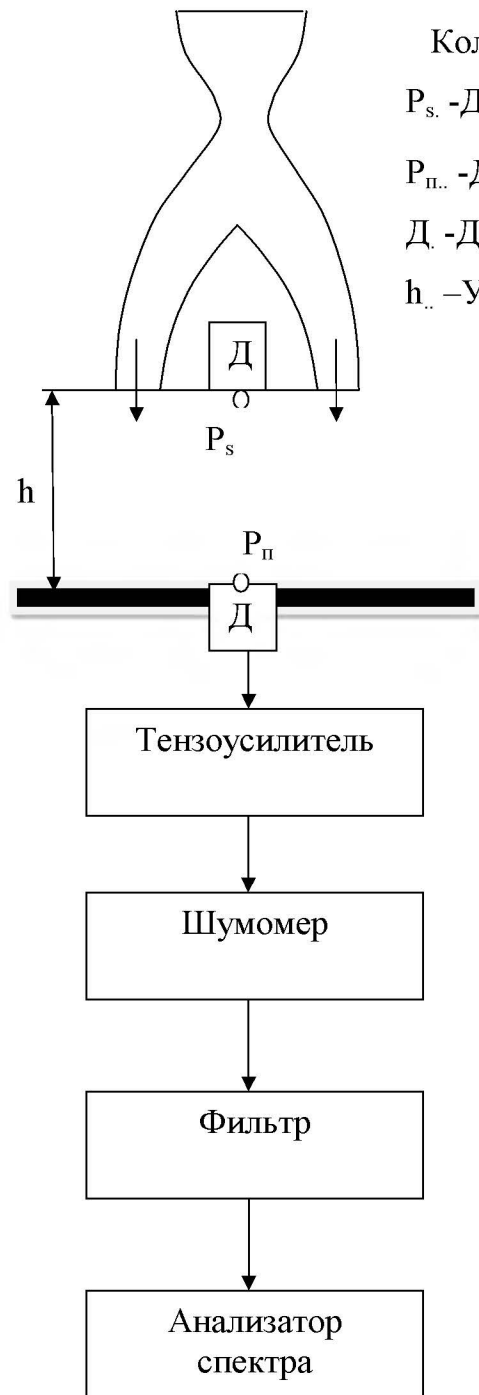
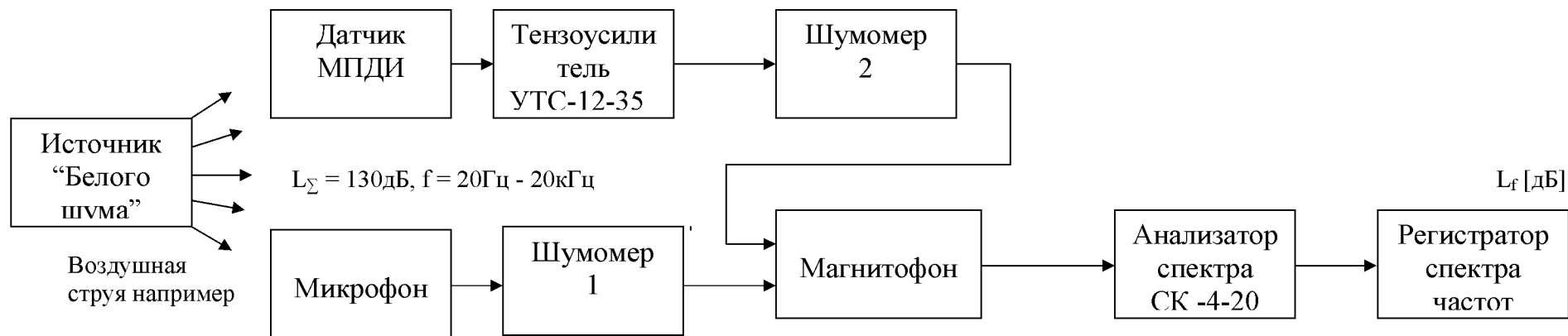


Рис.6 Блок-схема измерений.





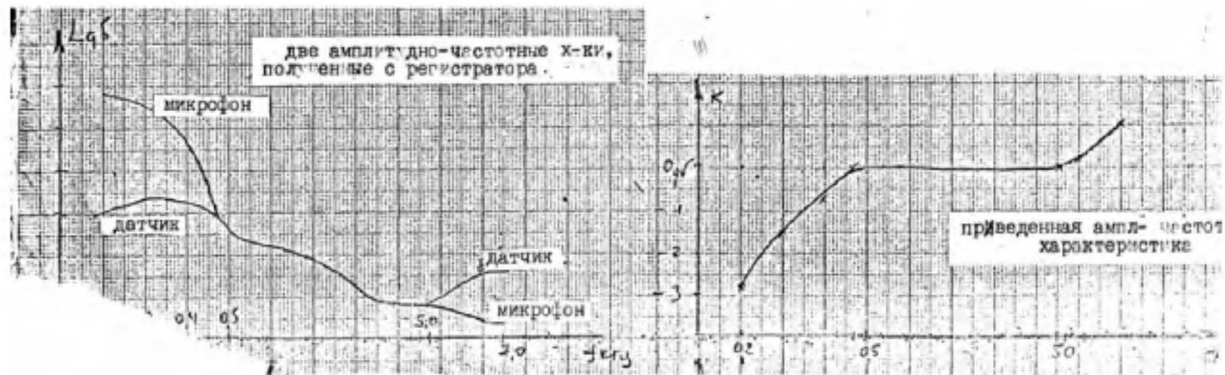
Рис.7 Блок-схема тарировка по уровню.

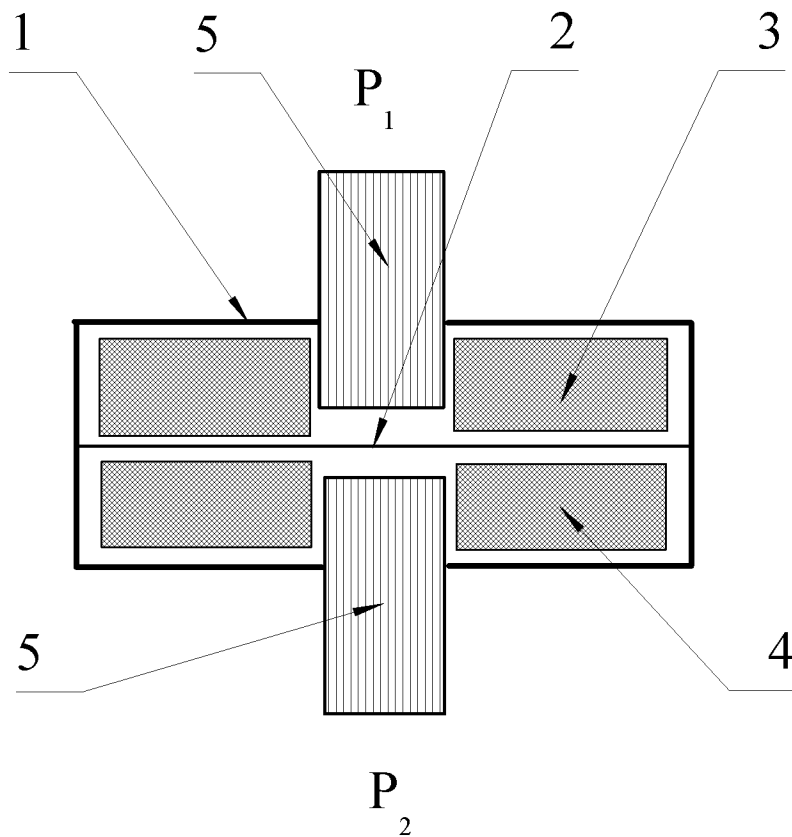


#### Последовательность операций.

1. Формируем воздушную струю с суммарным уровнем  $L_{\Sigma} = 130\text{дБ}$  и спектром сигнала одинаковой амплитуды в диапазоне частот  $f = 20\text{Гц} - 20\text{кГц}$ .
2. С помощью микрофона, шумомера -1 и анализатора спектра проводим измерения амплитудно частотной характеристики микрофона, сравнивая с его паспортными данными.
3. Помещаем датчик МПДИ в ту же точку и производим запись на магнитофон сигнала с шумомера-2 от тензоусилителя УТС-12-35.
4. Проанализировав спектр через СК-4-20, получим спектрограмму тарировки уровня сигнала датчика в диапазоне частот.
5. Отклонение показаний датчика от показаний микрофона называется приведенной амплитудно частотной характеристикой и является отсчетным уровнем при расшифровке рабочих спектров при эксперименте.

Рис. 8 Блок-схема спектральной тарировка измерительной системы.

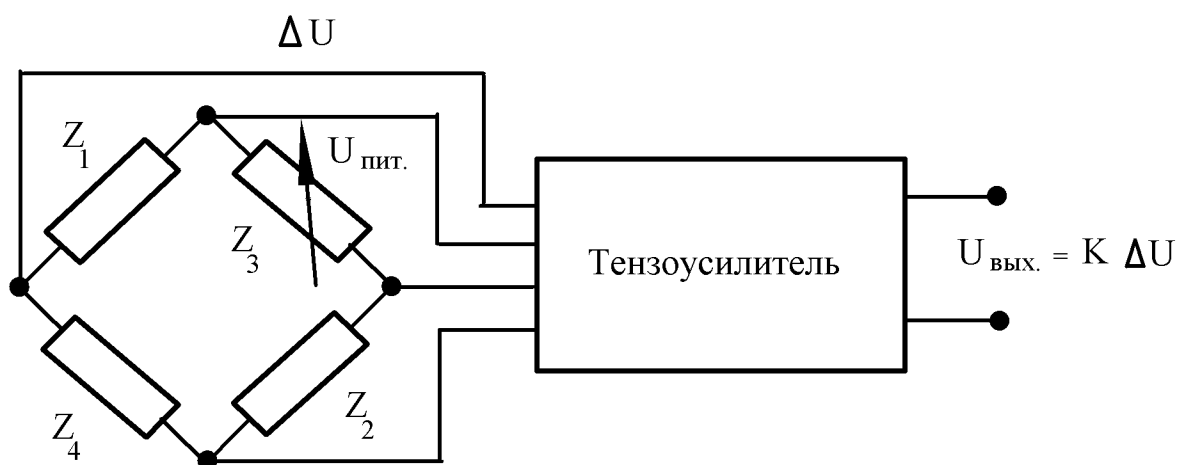




$$\Delta P = P_1 - P_2$$

- 1 – цилиндрический корпус,
- 2 – чувствительная мембрана,
- 3 – индуктивная катушка  $L_1$ ,
- 4 - индуктивная катушка  $L_2$ ,
- 5 – выступающая трубка.

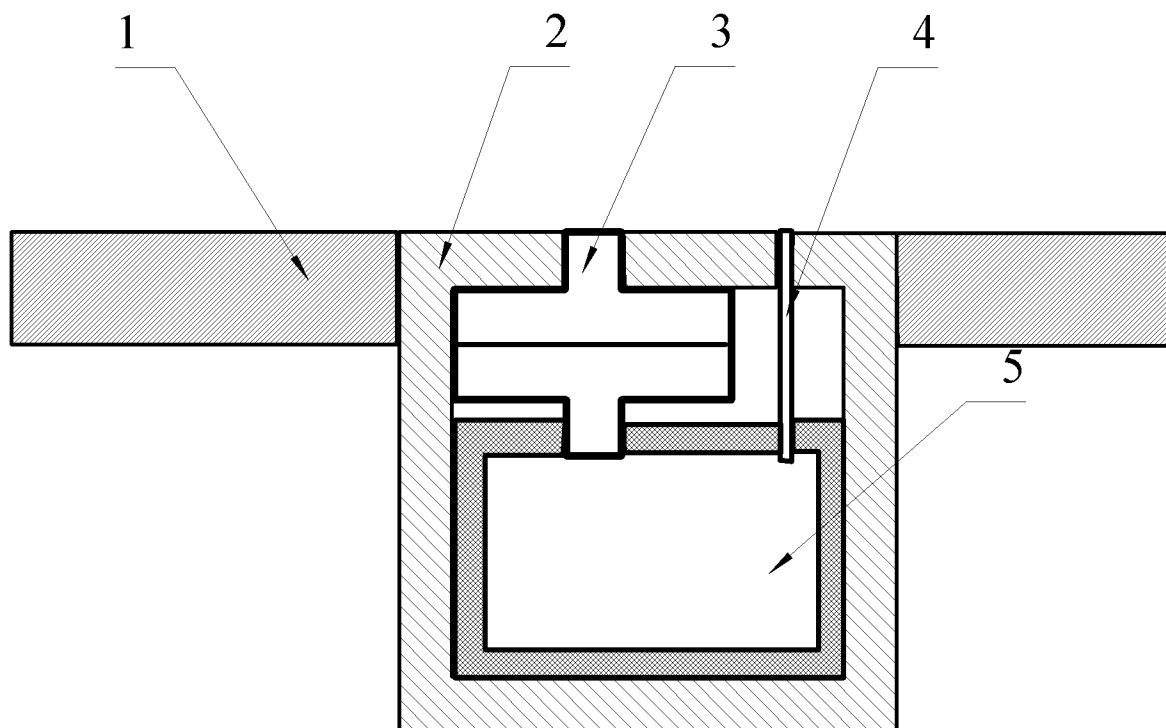
Рис.9 Индуктивный дифференциальный датчик давления.



$Z_3 = R + j \omega L$  Сопротивление обмотки датчика.

$Z_1 * Z_2 = Z_3 * Z_4$  Условие баланса моста.

Рис.10 Мостовая схема, "мостик" Уинстона.



- 1 - корпус модели,
- 2 - корпус датчика пульсаций давления,
- 3 - индуктивный дифференциальный датчик давления,
- 4 - капиллярная трубка,
- 5 - демпфирующий объем.

Рис.11 Устройство датчика пульсаций давления.

Таблица

L	L <sub>Σ</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>s</sub>	n	q <sub>∞</sub>	M <sub>∞</sub>	(P̄ <sup>2</sup> ) <sup>0,5</sup> · 10 <sup>-3</sup>	$\frac{(\bar{P}^2)^{0,5}}{q_\infty} \cdot 10^{-2}$
(дБ)	(дБ)	(атм.)	(атм.)		(атм.)	(атм.)	(атм.)	

1.  $L_\Sigma = L + \Delta L$

$P_\infty = P_{\text{атм}} = 1 \text{ атм} = 1 \text{ мг/см}^2 = 10^5 \text{ Па}$

2.  $n = P_s / P_\infty$

Условный порог звукового давления:

$P_0^* = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$

3.  $M_\infty = \sqrt{5 \left[ \left( \frac{P_0}{P_\infty} \right)^{0,28} - 1 \right]}$

4.  $q_\infty = 0,7 P_\infty M_\infty^2$

5.  $L_\Sigma = 20 \cdot \lg \frac{(\bar{P}^2)^{0,5}}{P_0^*}, \text{ (дБ)} \Rightarrow (\bar{P}^2)^{0,5} = P_0^* \cdot 10^{\frac{L_\Sigma}{20}} \text{ Па} = 2 \cdot 10^{-10} \cdot 10^{\frac{L_\Sigma}{20}} \text{ атм}$

Построить графики: а.)  $P_0 / p_{\text{атм.}} = f(n)$ ;

б.)  $L_\Sigma = f(n)$ ;

в.)  $\frac{(\bar{P}^2)^{0,5}}{q_\infty} \cdot 10^{-2} = f(M_\infty)$