Работа 1.13Д
ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА

Е.Г. Апушкинский, В.А. Кожевников,
Л.П. Круковская, Т.А. Тихонова.

Цель работы

Исследование эффекта Доплера и определение скорости ультразвуковых волн в воздухе.

Объект исследования

Ультразвуковые волны в воздухе при нормальном давлении.

Задачи

1. Измерить частоту неподвижного источника ультразвуковых волн и доплеровские частоты движущегося приемника по направлению от неподвижного источника этих волн и к нему. На основании этих данных рассчитать скорость ультразвука в воздухе.

2. Рассчитать скорость ультразвука в воздухе для модели идеального газа.

3. Сравнить значение, измеренной с помощью эффекта Доплера, скорости ультразвука в воздухе со скоростью, рассчитанной по модели идеального газа.

Введение

Эффект Доплера, характерный для любых волновых процессов, заключается в изменении частоты колебаний, воспринимаемой приемником, при движении приемника и источника волн друг относительно друга. В данной работе эффект Доплера изучается на примере акустических волн.

Пусть движущийся источник испускает звуковые колебания с частотой f_0. Эти колебания распространяются в неподвижном воздухе (ветра нет) и достигают приемника колебаний. Тогда частота колебаний f, воспринимаемая приемником, будет отличаться от f_0 и зависеть от скорости движения источника и приемника относительно друг друга. Это явление называется эффектом Доплера, частота f - доплеровской частотой, а разность частот $\Delta f_0 = f - f_0$ - доплеровским сдвигом частоты.

Рассмотрим возникновение эффекта Доплера, когда источник или

приемник двигаются вдоль соединяющей их прямой. Возможно несколько вариантов такого движения, приводящие к разным проявлениям рассматриваемого эффекта. Остановимся на каждом из них.

1. Источник (И) и приемник (П) неподвижны (рис.1а)

Источник совершает колебания с частотой f_0. Эти колебания в виде звуковой волны (упругой, продольной) распространяются в воздухе с фазовой скоростью - скоростью звука $v_{зв} \approx 330$ м/с.

Длина испускаемой волны равна $\lambda_0 = v_{зв} / f_0$. Если умножить числитель и знаменатель этой дроби на одинаковый множитель - односекундный интервал времени $\tau = 1$ сек, то отношение, естественно, не изменится. Тогда длина волны λ_0 определится как отношение $v_{зв}\tau$ - расстояния, на которое распространяется волна за время τ (длина волны оказывается расстоянием, проходимым волной за период колебаний), к $f_0\tau$ - количеству колебаний, испущенных за это время, т.е. как расстояние, занимаемое одним колебанием (см. рис 1а). Частота колебаний *f,* воспринимаемых приемником, всегда численно равна количеству колебаний, достигших приемника за время $\tau = 1$ сек, т.е. $f\tau$. При неподвижном приемнике, такое количество равно числу колебаний, содержащихся на длине $v_{зв}\tau$, т.е. $f\tau = v_{зв}\tau / \lambda_0$ или $f = v_{зв} / \lambda_0$. Отсюда после подстановки λ_0 получим $f = f_0$. Следовательно, при неподвижном источнике и приемнике частоты испущенных и принятых колебаний одинаковы, эффект Доплера отсутствует.

2. Приемник неподвижен, а источник движется со скоростью $v_{ист}$ (рис.1б)

Скорость источника будем считать положительной, если она направлена к приемнику и отрицательной, если источник движется от приемника. За одну секунду источник, как и ранее, совершит $f_0\tau$ колебаний и пройдет путь $v_{ист}\tau$. В момент окончания первой секунды, когда источник будет завершать последнее из ($f_0\tau$) колебаний, гребень, порожденный первым колебанием, будет находиться от источника на расстоянии ($v_{зв}\tau - v_{ист}\tau$), т.е. волна сожмется так, что ее длина

$$\lambda = (v_{зв}\tau - v_{ист}\tau)/ f_0\tau = (v_{зв} - v_{ист})/ f_0 \quad . \qquad (1)$$

Неподвижный приемник зафиксирует частоту $f = v_{зв}/\lambda$, тогда после подстановки (1):

$$f = f_0 v_{зв}/(v_{зв} - v_{ист}) \qquad (2)$$

Формулы (1) и (2) справедливы, если $v_{ист}$ меньше $v_{зв}$. Из формулы (2) видно, что при сближении источника с приемником ($v_{ист} > 0$) доплеровская частота f больше частоты f_0, а при удалении источника ($v_{ист} < 0$) – наоборот $f < f_0$.

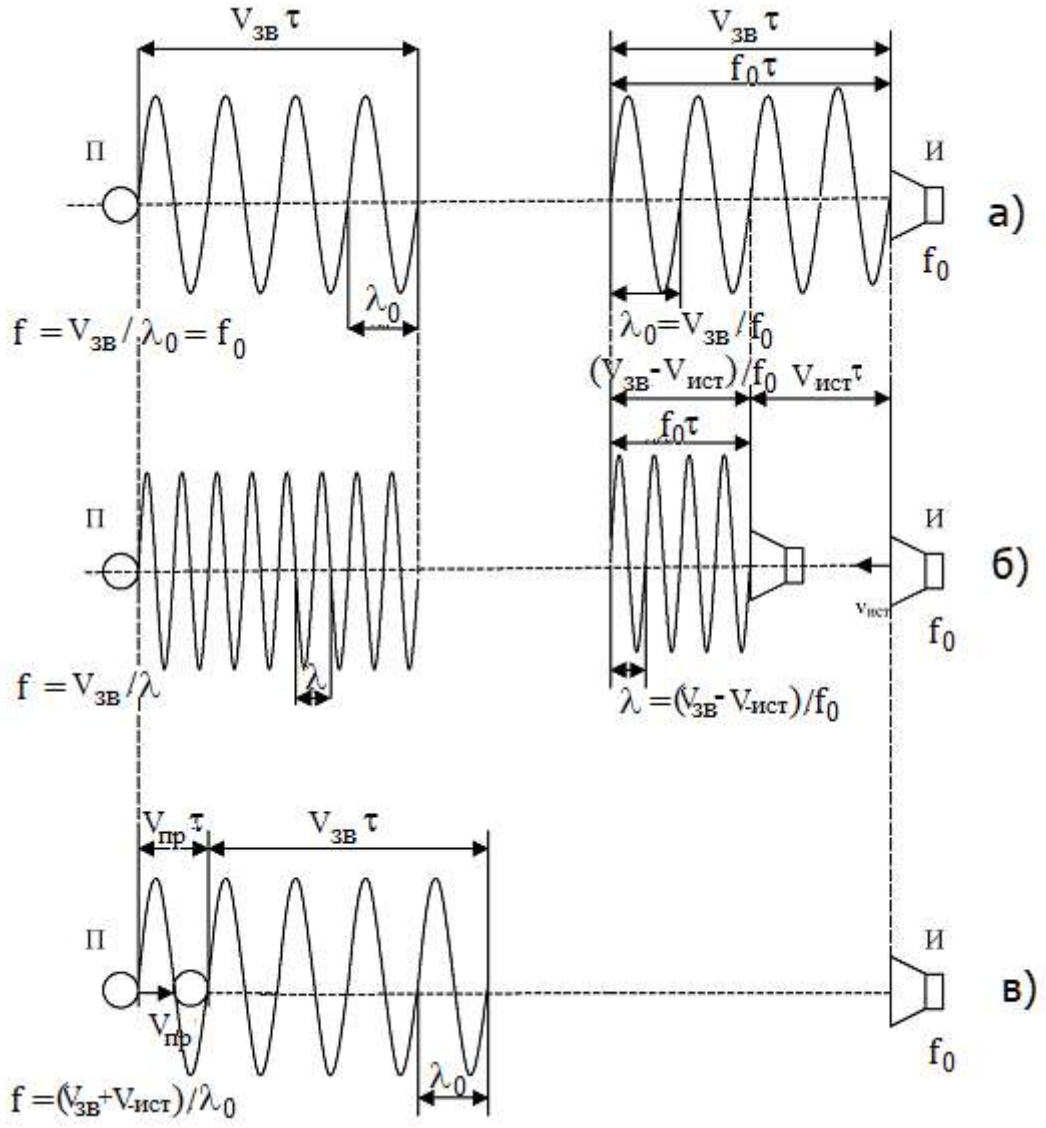


Рис.1. *Излучение и прием звуковых колебаний,* τ *=1с.*

а) Колебания, испускаемые неподвижным излучателем и принимаемые неподвижным приемником, $f = f_0$.

б) Колебания, испускаемые движущимся излучателем и принимаемые неподвижным приемником, $f = f_0 \cdot \frac{\mathrm{v}_{зв}}{\mathrm{v}_{зв} - \mathrm{v}_{ист}}$.

в) Колебания, испускаемые неподвижны излучателем и принимаемые движущимся приемником, $f = f_0 \cdot \frac{\mathrm{v}_{зв} + \mathrm{v}_{пр}}{\mathrm{v}_{зв}}$.

3. Источник неподвижен, приемник двигается со скоростью $\mathrm{v}_{пр}$.

(рис.1в)

Скорость приемника будем считать положительной при сближении с источником и отрицательной при удалении от него. Как было отмечено ранее, неподвижный источник испускает волну длиной λ_0, а неподвижный приемник принимает за $\tau = 1$сек колебания, укладывающееся на длине $\mathrm{v}_{зв}\tau$. Если приемник двигается со скоростью $\mathrm{v}_{пр}\tau$ к источнику, то за одну секунду он зарегистрирует большее количество колебаний, чем неподвижный приемник. За время τ приемник пройдет путь $\mathrm{v}_{пр}\tau$ и в него попадут колебания, укладывающиеся на длине $(\mathrm{v}_{зв} + \mathrm{v}_{пр})\tau$. Число таких колебаний $f\tau = (\mathrm{v}_{зв} + \mathrm{v}_{пр})\tau / \lambda_0$, а частота будет равна:

$$f = (\mathrm{v}_{зв} + \mathrm{v}_{пр})/\lambda_0 = f_0(\mathrm{v}_{зв} + \mathrm{v}_{пр})/\mathrm{v}_{зв} \qquad (3)$$

При сближении приемника с источником ($\mathrm{v}_{пр} > 0$) доплеровская частота f больше частоты f_0, при удалении ($\mathrm{v}_{пр} < 0$) - наоборот $f < f_0$.

4. Одновременное движение источника и приемника

При тех же условиях, что в пунктах 2 и 3, движущийся источник испускает волну с длиной волны *(*1), а движущейся приемник регистрирует частоту f (3). Подставив в формулу (3), вместо λ_0 выражение (1) получим окончательное самое полное выражение для доплеровской частоты

$$f = f_0(\mathrm{v}_{зв} + \mathrm{v}_{пр})/(\mathrm{v}_{зв} - \mathrm{v}_{ист}) \qquad (4)$$

Из формулы (4) следуют те же выводы, что и отмеченные в пунктах 1,2 и 3, но, кроме того, еще один. При движении источника и приемника с одинаковой скоростью в одном направлении (при отсутствии движения относительно друг друга) $f = f_0$ и эффект Доплера отсутствует.

Эффект Доплера назван в честь австрийского физика К. Доплера (Ch. Doppler), который впервые теоретически обосновал этот эффект в акустике и оптике в 1842 году. Французский физик А.Физо в 1848 г. ввел понятие доплеровского смещения спектральных линий, которое вскоре было обнаружено в спектрах некоторых звезд.

Эффект Доплера позволяет измерять скорость движения источников излучения и находит широкое применение в практике. Так в астрофизике измерение доплеровского смещения в спектрах излучения удаленных галактик (так называемое красное смещение) привело к выводу о расширяющейся Вселенной. В радио и гидролокации эффект Доплера используется для измерения скорости движущихся объектов. Эффект Доплера на ультразвуковых волнах применяется в медицине для определения скорости кровотока, для исследования движения грудной клетки эмбриона, для дистанционного контроля за сердцебиением.

В данной лабораторной работе эффект Доплера используется для определения скорости звука в воздухе при неподвижном источнике. Из (3) следует

$$v_{зв} = v_{пр} f_0 / (f - f_0) \qquad (5)$$

Скорость звука в воздухе в модели идеального газа может быть определена по известной из термодинамики формуле [1]:

$$v_{зв} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \qquad (6)$$

где $\gamma = 1{,}40$ – показатель адиабаты воздуха;

$M = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль - молярная масса воздуха;

$R = 8{,}314$ Дж/(К$\cdot$ *моль*) - универсальная газовая постоянная;

T (К) – температура воздуха.

Таким образом, измерив T, f *и* f_0 можно по формуле (5) определить скорость звука, а по формуле (6) рассчитать ее в модели идеального газа.

Скорость перемещения приемника звука указывается на блоке управления кареткой.

Описание установки

Скорость звука можно считать фактически не зависящей от частоты в широком диапазоне частот, а поэтому практически одинакова как для

инфразвуковых ($f < 20\ Гц$), звуковых ($20\ Гц < f < 20\ КГц$), так и для ультразвуковых ($f > 20\ КГц$) волн.

В данной работе исследуется эффект Доплера на ультразвуковых волнах**.** Ультразвук человеческое ухо не слышит и, в этом смысле, эксперимент достаточно комфортен. Другим важным преимуществом ультразвука является то, что доплеровский сдвиг частоты $\Delta f = f - f_0$ пропорционален частоте f_0 и, следовательно, эффект Доплера проявляется сильнее, чем на звуковых частотах.

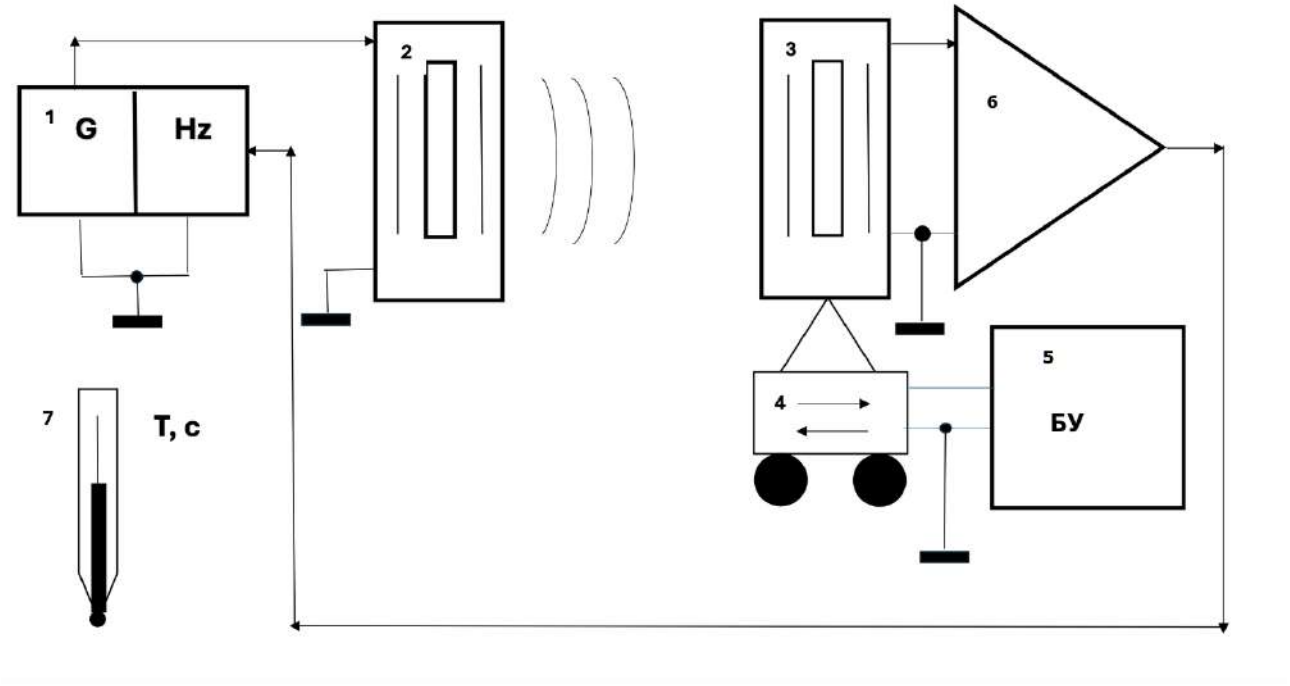


Рис.2. *Блок схема экспериментальной установки: 1- задающий цифровой генератор с функцией измерения частоты, 2 - неподвижный источник ультразвука, 3 - движущийся приемник ультразвука, 4 - подвижная каретка. 5 – блок управления движением каретки, 6- усилитель, 7 -термометр.*

Блок схема экспериментальной установки приведена на рис. 2, а фотография установки показана на рис.3. Установка содержит генератор с функцией измерения частоты и усилитель электрических колебаний ультразвукового диапазона. Генератор работает на фиксированной частоте $f_0 =$ 40 кГц. Выходное напряжение генератора, которое можно изменять, подается на неподвижный источник ультразвука 2. Источник ультразвука 2 преобразует электрические колебания в акустические.

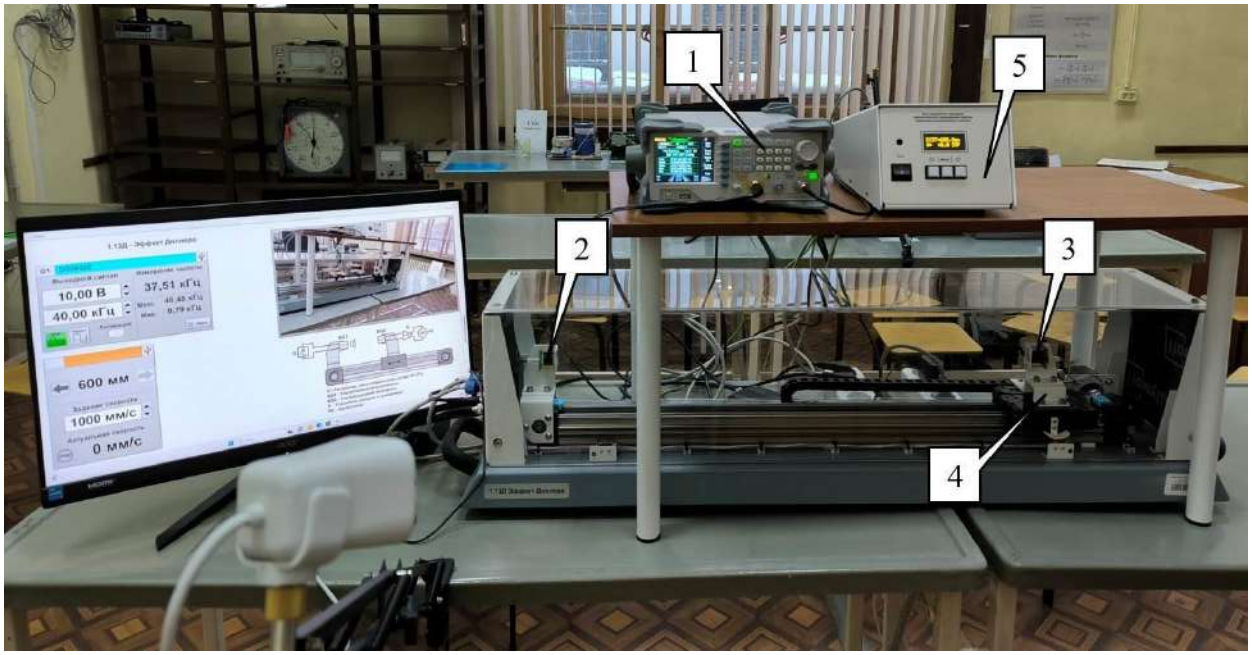


Рис.3. *Экспериментальная установка: 1- задающий цифровой генератор с функцией измерения частоты,*

2 - неподвижный источник ультразвука, 3 - движущийся приемник ультразвука, 4 - подвижная каретка.5 - блок управления движением каретки.

Приемник ультразвука - микрофон 3 - преобразует акустические ультразвуковые колебания, посланные источником 2, в электрические колебания той же частоты. Приемник установлен на каретке, перемещающейся по направляющей качения. Для надежной работы установки необходимо, чтобы источник и приемник находились на одинаковой высоте и были точно направлены навстречу друг другу. В начале и в конце направляющей установлены концевые выключатели, предназначенные для остановки каретки. Передатчик и приемник установлены вдоль одной оси, параллельной направляющей. Каретка с приемником перемещается по направляющей посредством шагового двигателя и зубчатой ременной передачи.

Расположенный внутри блока управления микроконтроллер осуществляет локальное и дистанционное управление шаговым двигателем.

Электрический сигнал с приемника 3, поступает на усилитель сигнала и далее на измерительный вход генератора 1. Когда источник и приемник неподвижны, тогда измеряемая частота равна частоте передатчика f_0. Если приемник движется относительно источника, то измеряемая доплеровская

частота f будет определяться формулой (4). Таким образом, один и тот же прибор может измерять f и f_0.

Усилитель 6 и термотр 7 на фотографии не видны. Усилитель скрыт за установкой, а термометр, один на несколько установок, расположен на стене комнаты.

Порядок проведения работы

Включите клавишу «сеть» на блоке розеток и «сеть» на частотомере.

Посредством термометра 7 измерьте температуру воздуха в помещении лаборатории и запишите ее значение (с приборной погрешностью).

Используя подробное руководство по работе с измерительными приборами, которое находится в лаборатории, проделайте измерения записывая результаты в таблицы 1и 2.

Выполните подготовительные операции.

Установите каретку с микрофоном 3 в крайнее положение, т.е. на минимальном расстоянии от источника ультразвука 2.

На генераторе 1:

а) включите прибор нажатием кнопки «power»;

б) включите канал генератора нажатием кнопки «channal1»;

в) выберете на генераторе режим гармонических колебаний и установите частоту генератора, амплитуду, начальную фазу и уровень смещения сигнала согласно инструкции на установке;

г) активизируйте работу измерителя частоты на генераторе 1 нажатием кнопки «counter»;

д) установите режим изменения частоты согласно инструкции на установке;

Измерение частоты

Внешние шумы могут влиять на показания частотомера, поэтому дальнейшие измерения необходимо проводить без лишнего шума (не разговаривать, не кашлять и т.д.).

1) Измерьте значение f_0 - частоты неподвижного источника, она должна совпадать с частотой генератора.

2) Измерение доплеровской частоты f приемника ультразвука, движущегося от источника. Это наиболее ответственные измерения, для которых необходимо соблюдать последовательность:

- выберете скорость движения каретки из диапазона 0,3–0,9 м/с (300 -900 мм/с);

- осуществите пуск каретки, т.е. нажимаем кнопку «→» на блоке управления кареткой;

- зарегистрируйте частоту на генераторе 1.

Таблица 1. Результаты измерений доплеровских частот.

	Скорость приемника $v_{пр} = 0$ м/с	Скорость приемника $v_{пр} = 0{,}3$ м/с Движение от источника	Скорость приемника $v'_{пр} = 0{,}3$ м/с Движение к источнику	… … …	Скорость приемника $v_{пр} = 0{,}9$ м/с Движение от источника	Скорость приемника $v'_{пр} = 0{,}9$ м/с Движение к источнику
$N_{изм}$	f_0, Гц	f, Гц	f', Гц	…	f, Гц	f', Гц
1				…		
2				…		
…….				…		
15				…		
Средн. значение	$<f_0>=$	$<f>=$	$<f'>=$	…	$<f>=$	$<f'>=$
Погрешность	Δf_0, =	Δf =	$\Delta f'$ =		Δf =	$\Delta f'$ =

Таблица 2. Результаты расчета скорости звука в воздухе.

$v_{пр}$ ($v'_{пр}$) м/с	Скорость приемника $v_{пр} = 0{,}3$ м/с Движение от источника	Скорость приемника $v'_{пр} = 0{,}3$ м/с Движение к источнику	……..	Скорость приемника $v_{пр} = 0{,}9$ м/с Движение от источника	Скорость приемника $v'_{пр} = 0{,}9$ м/с Движение к источнику
$v_{зв}$			……..		

м/с					
$\Delta v_{зв}$ м/с			…….		

Когда каретка достигнет упора (сработает концевой выключатель), что остановит каретку.

3). Измерьте значение f' доплеровской частоты приемника, движущегося к источнику, т.е. в обратном направлении.

Установите каретку на наибольшем расстоянии от источника. Нажмите кнопку «←» на блоке управления кареткой, а потом регистрируйте частоту на генераторе как в пункте 2.

Повторите пункты 1)-3) 15 раз. Причем каждый раз «обнуляйте» измерения согласно инструкции на установке.

4). Повторите 5 раз пункты 2-3 с другими скоростями каретки.

Обработка результатов

Используя измеренное значение температуры воздуха, вычислите по формуле (6) скорость ультразвука и ее погрешность по формуле:

$$\Delta v_{зв} = \sqrt{\frac{\gamma R}{MT}} \cdot \frac{\Delta T}{2}$$

Вычислите погрешности Δf_0, Δf, $\Delta f'$, с учетом коэффициентов Стьюдента, случайной и приборной погрешности для каждой скорости приемника и занесите в таблицу 1.

Используя формулу (5) рассчитайте скорость звука для каждого из измеренных значений доплеровской частоты и занесите ее в таблицу 2. При расчетах используйте средние значения доплеровских частот.

Вычислите с учетом коэффициентов Стьюдента значения погрешности скорости звука для каждого значения скорости каретки и занесите их в таблицу 2.

Вычислите усредненное значение скорости звука в воздухе и ее погрешность с учетом коэффициентов Стьюдента.

Запишите окончательный результат в виде:

$V_{зв} = < v_{зв} > \pm \Delta v_{зв}$.

Запишите окончательный результат расчета скорости звука в модели идеального газа в аналогичном виде.

Сравните эти данные между собой.

Контрольные вопросы

1. Как изменяется длина волны, испускаемая приближающимся источником?

2. Какую частоту зафиксирует приемник, движущийся навстречу звуковой волне со скоростью $v_{\text{пр}}$?

3. Как будет меняться частота звука, воспринимаемого неподвижным приемником, от источника, пролетающего мимо приемника.

Литература

1. *И.Е.Иродов.* Волновые процессы. Основные законы. М.: БИНОМ. Лабораторные знания, 2007. - § 1.7.

2. *И.Е.Иродов.* Волновые процессы. Основные законы. М.: БИНОМ. Лабораторные знания, 2007. - § 1.3.

3. *Б.Д. Агапьев [и др.].* Обработка экспериментальных данных: учеб. Пособие. СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2002.

Работа 1.13Д при дистанционном доступе к лабораторной установке.

Введение

Данный вариант работы используется в случае невозможности очного проведения занятий. Для успешного выполнения необходимо присутствие преподавателя или лаборанта в зале лабораторных работ. Студентам понадобится персональный компьютер с установленным программным обеспечением, позволяющим удаленно управлять рабочим столом. Допуск к работе осуществляется через видеоконференцию в режиме управления удаленным рабочим столом. Для записи результатов измерений может использоваться как бумажный, так и электронный протокол, по решению преподавателя. Факт выполнения фиксируется видеозаписью собрания.

Описание установки, имеющей возможность дистанционного доступа

Установка, предназначенная для выполнения работы в дистанционном режиме, идентична установке для очного выполнения (рис. 2,3). В дополнение к основным элементам установки установка снабжается компьютером и видеокамерой, позволяющими управлять работой приборов и наблюдать за ними.

Порядок проведения работы

Подготовку стенда к работе осуществляет преподаватель или лаборант. Для работы в дистанционном режиме необходимо:

1. Включить компьютер, запустить видеоконференцию, закрепить на столе камеру (смотри инструкцию на стр. 75).
2. Начать собрание на лабораторном компьютере и пригласить туда студентов и, при необходимости, преподавателя.
3. После получения студентами допуска к работе необходимо включить стенд и измерительные приборы, а также запустить программу управления приборами.
4. Передать одному из студентов управление рабочим столом.

После передачи управления студенты самостоятельно выполняют работу. Порядок выполнения идентичен очному варианту работы.

5. Выключите программу.

По окончании выполнения работы, выключение приборов и компьютера осуществляется преподавателем.

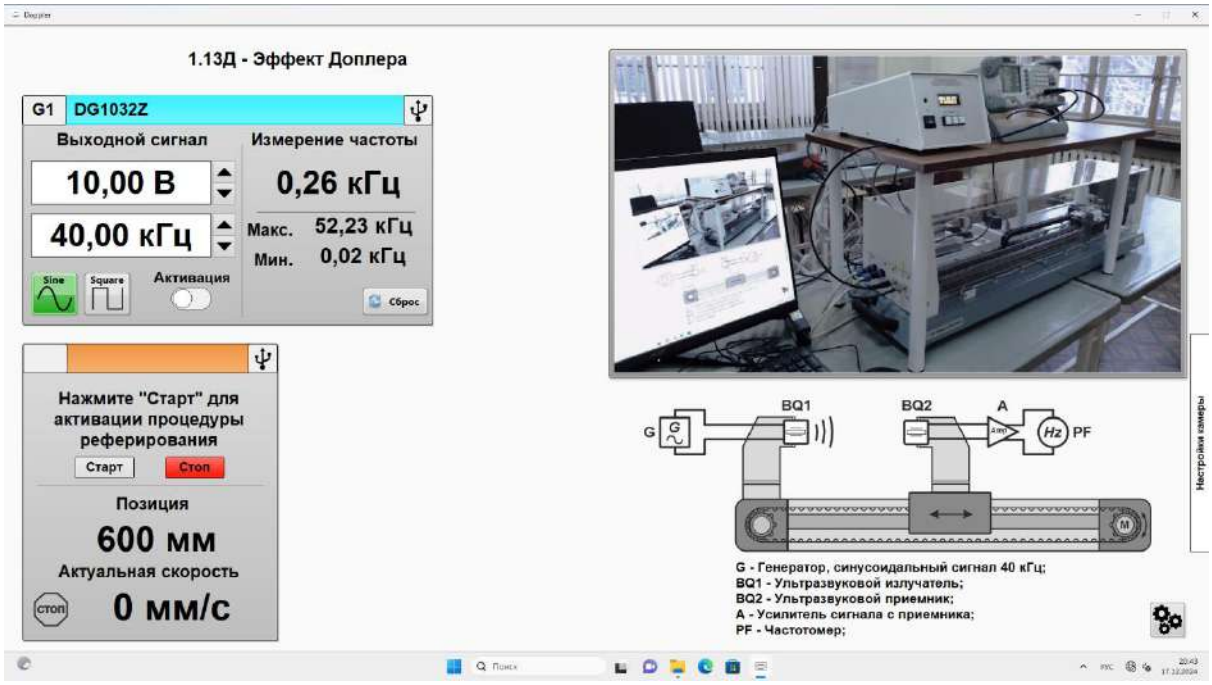


Рис.4. *Вид «рабочего стола» на экране удаленного компьютера.*