

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

1. Цель работы

Ознакомление студентов с косвенными способами измерения плотности биологических жидкостей.

2. Краткие теоретические сведения

Методы измерения плотности

Одной из основных физических величин, характеризующих свойства вещества, является плотность. Различные вещества, имеющие при одинаковой температуре равные объемы, обладают разной массой, и наоборот. Отношение массы вещества к его объему является физической величиной, которая характеризует свойства вещества и называется *плотностью*.

Расчет плотности вещества можно производить по тривиальной формуле, которая имеет вид:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad [\text{кг/м}^3], \quad (3.1)$$

где: ρ – плотность однородного вещества или средняя плотность неоднородного вещества; m , v – масса и объем вещества соответственно.

Плотномер – прибор, измеряющий плотность газов, жидкостей и твердых тел, а также плотность сыпучих веществ.

Все методы измерения плотности можно разделить на прямые и косвенные.

К *прямым* относят методы, основанные на законах механики жидкостей, т.к. плотность в этом случае определяют по результату действия массовых сил жидкости. Сюда относится метод измерения массы определенного объема жидкости, а также методы, использующие законы гидростатики и гидродинамики. Приведем примеры плотномеров:

- а. Гидростатический плотномер – статический весовой плотномер жидкостей, в котором плотность жидкости определяется по гидростатическому давлению столба жидкости заданной высоты;
- б. Двухпоплавковый плотномер содержит два поплавка одинакового объема и одинаковой массы, погружаемые в исследуемую и образцовую жидкости. Разность плотностей жидкостей определяется по разности выталкивающих сил, действующих на поплавки;
- в. Маятниковый вибрационный плотномер с крутильным маятником для измерения многофазных веществ. Плотность определяется по изменению периода колебаний маятника, вызываемого изменением плотности смеси;

г. Турбинный плотномер – проточный плотномер жидкости. Плотность определяется по моменту на валу турбины, вращающейся с постоянной частотой.

Плотномеры прямого метода в большинстве случаев громоздки и не удобны в эксплуатации, и в некоторых случаях требуются стационарные условия измерения. При этом время, затрачиваемое на измерение, достаточно велико.

К *косвенным* относятся методы, которые основаны на зависимостях между плотностью и различными физическими свойствами вещества, например, способностью поглощать ультразвуковые волны, радионуклидные излучения и т.д.

Радионуклидные плотномеры предназначены для бесконтактного измерения плотности жидкостей и многофазных веществ. Плотность определяется по ослаблению ионизирующего излучения при прохождении его через вещество. При этом используется опасное для здоровья человека ионизирующее излучение.

Рассмотрим косвенные методы определения плотности с использованием УЗ на примере некоторых плотномеров:

а) *Импульсный плотномер* основан на измерении времени распространения УЗ волн в контролируемой среде в зависимости от изменения плотности. Зондирующие импульсы пропускают через среду с определенным периодом T и принимают эхо-импульсы (рис. 3.1). Импульсы запуска устанавливают в единицу измерительный триггер, который разрешает работу измерителя временных интервалов. Эхо-импульс после усиления и преобразования в цифровой вид сбрасывает в ноль измерительный триггер, в результате на его выходе формируется импульс длительностью t , пропорциональный плотности среды. Логический ноль на выходе измерительного триггера запрещает работу измерителя временных интервалов, в результате чего на его выходе получается цифровой код пропорциональный длительности импульса на выходе триггера. Полученный код поступает в блок обработки, где вычисляется плотность среды.

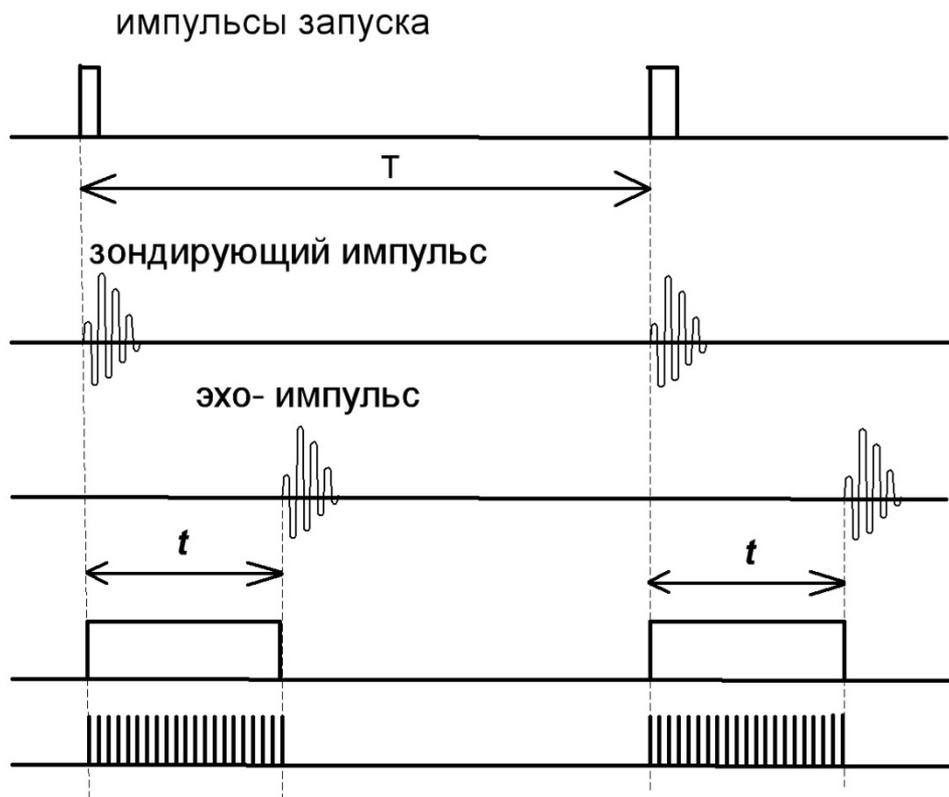


Рис. 3.1. Диаграммы работы импульсного ультразвукового плотномера

б) В автоциркуляционном плотномере (рис. 3.2) определяют величину обратного времени распространения УЗ волн в среде. Этой величиной является частота f в электронной замкнутой системе, состоящей из УЗ излучателя 1, контролируемой среды 2, УЗ приемника 3, усилителя 4, детектора 5, каскада запуска 6, блокинг-генератора 7, усилителя мощности 8. Плотность определяется по разности частот $\Delta f = f_0 - f$, где f_0 – частота источника опорных импульсов 10, f – частота автоциркуляции.

в) Принцип действия *фазного плотномера* основан на измерении фазы УЗ волн, прошедших через среду.

г) *Интерферометрический плотномер* построен на измерении длины волны по акустическому резонансу столба исследуемой среды заданной высоты, когда в нем укладывается четное число полуволн. Индикация резонанса осуществляется по реакции генератора возбуждающего напряжения, поступающего на излучатель, или по напряжению принятого сигнала.

д) В *плотномере с акустическим фильтром* использован эффект изменения спектра УЗ импульса при распространении его в контролируемой среде через размещенный в ней твердый слой (рис. 3.3).

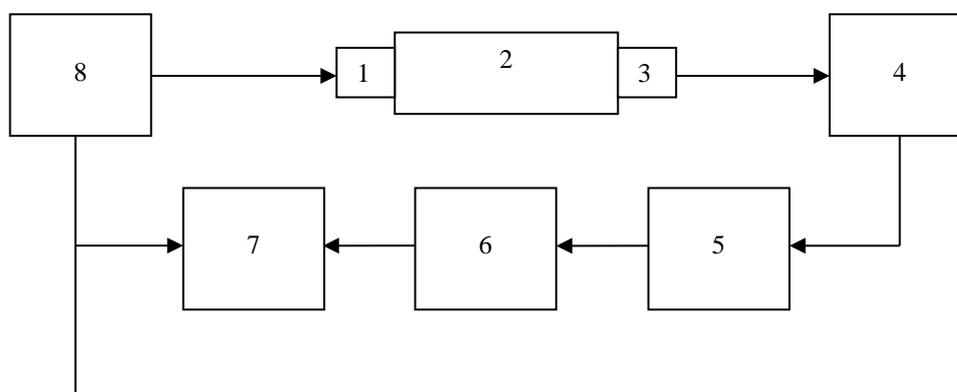


Рис. 3.2. Структурная схема автоциркуляционного плотномера

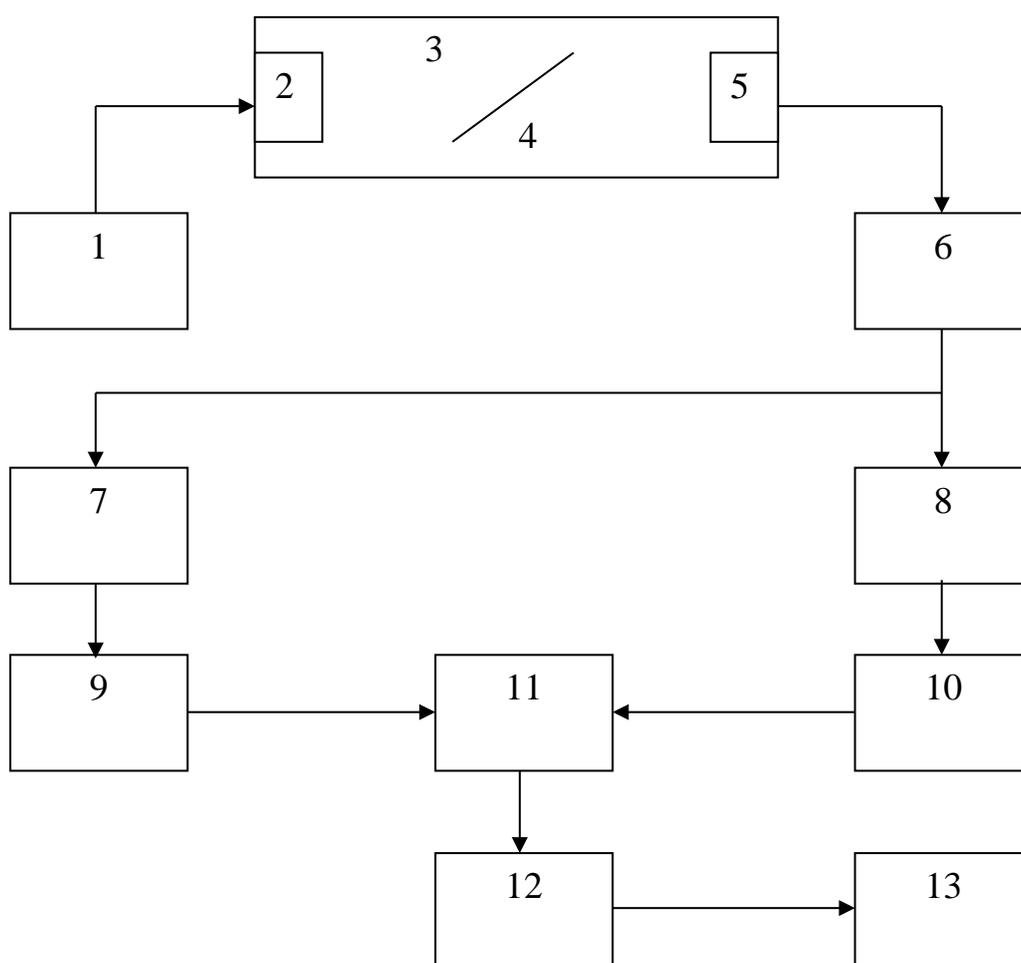


Рис. 3.3. Структурная схема плотномера с акустическим фильтром

Генератор 1 электрическими видеопульсами возбуждает пьезоэлектрический преобразователь 2, посылая короткие импульсы быстро затухающего УЗ колебания в жидкость. Для расширения спектра излучения пьезоэлемент излучателя жестко демпфирован (акустически). Излученный импульс, распространяясь в среде 3, достигает размещенной в ней наклонной пластины (фильтра) 4, и, проходя через нее, изменяет длительность фронта в зависимости от плотности. УЗ импульс после прохождения через акустический приемник 5 усиливается усилителем 6 и поступает на ключевые каскады 7 и 8,

соединенные с соответствующими формирователями импульсов 9 и 10 запуска триггера 11.

Благодаря тому, что ключевые каскады выполнены с неодинаковыми временными отсечками, срабатывание формирователей происходит с запаздыванием друг относительно друга на период фронтальных колебаний принятого УЗ импульса. В результате триггер вырабатывает прямоугольные электрические импульсы длительностью, зависящей от плотности среды. Импульсы на выходе триггера поступают в интегрирующий блок 12, где преобразуется в постоянное напряжение, амплитуда которого пропорциональна плотности и измеряется регистрирующим блоком 13. Период УЗ колебаний фронтальной части принятого УЗ импульса не зависит от протяженности пути импульса, что обеспечивает контроль независимо от акустической базы, а следовательно и диаметра сосуда.

е) *Импедансным плотномером* измеряют плотность однородных твердых и газообразных веществ, бинарных растворов и смесей жидкостей. Применение этих плотномеров предполагает, что известна зависимость между импедансом и плотностью вещества и выражается в следующем виде:

$$z = \rho \cdot C, \quad (3.2)$$

где: C – скорость звука [м/с].

ж) *Вибрационный плотномер* измеряет плотность по параметрам упругих колебаний, сообщенных сосуду с исследуемым веществом.

Способы получения ультразвуковых колебаний

Электродинамический и электромагнитный вибраторы, как излучатели звука, применяются в слышимом диапазоне частот, и практически не используются в УЗ области, т.к. вследствие своей инерционности они не могут обеспечить работу на УЗ частотах. В связи с этим используют пьезоэлектрические и пьезомагнитные вибраторы. Для того чтобы возбудить излучатель, необходим генератор переменного напряжения высокой частоты.

Возникновение электрических зарядов на гранях кварцевой пластины при ее деформации называется *прямым пьезоэлектрическим эффектом*, и наоборот, если к кварцевой пластине приложить напряжение, то она изменит свои геометрические размеры (*обратный пьезоэлектрический эффект*).

Для получения УЗ колебаний возможно использование ударного возбуждения пьезопластины.

1) Ударное возбуждение можно получить с помощью генератора зондирующих импульсов, который содержит два основных элемента: колебательный контур, включающий в себя излучающий пьезопреобразователь, и электронную схему, обеспечивающую генерацию коротких импульсов заданной формы. В колебательном контуре параллельно или последовательно пьезоэлементу включены индуктивность и активное сопротивление. Можно также применять трансформаторную связь (рис. 3.4).

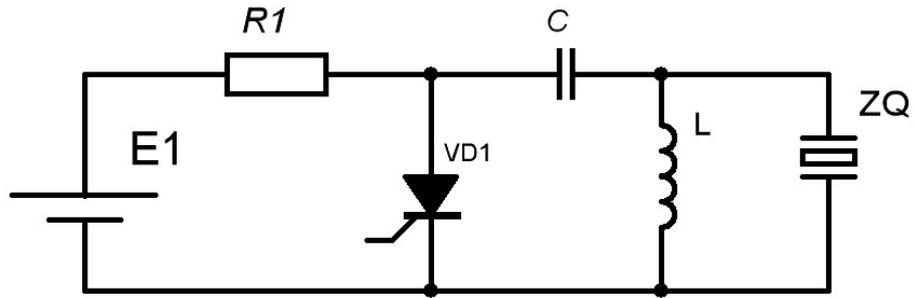


Рис. 3.4. Схема генератора ударного возбуждения

Конденсатор C заряжают до высокого напряжения. На управляющий электрод тиристора VD подается отпирающее напряжение, и через открытый тиристор происходит разряд конденсатора, следовательно, возбуждаются колебания в контуре. Фронт ударного импульса определяется временем заряда конденсатора. Ему соответствуют высокочастотные составляющие спектра импульса, выходящие за пределы пропускания пьезопреобразователя. В результате излучаемый в среду акустический импульс имеет форму, близкую к колоколообразной.

2) Возбуждение излучателя радиоимпульсами переменного напряжения с частотой, соответствующей собственной частоте пьезопластины, приводит к тому, что пьезопластина генерирует механические колебания с собственной частотой (явление резонанса). Возбужденная радиоимпульсом пластина будет свободно колебаться до тех пор, пока не растратит сообщенную ей энергию на внутреннее трение и передачу энергии в виде УЗ волн. Частота затухающих колебаний практически остается равной собственной частоте не затухающих колебаний, и только при большом коэффициенте затухания возникают изменения частоты.

В настоящее время существуют попытки возбуждения пьезоизлучателя с использованием лазера.

3) Лазерное возбуждение заключается в следующем: при облучении энергией светового потока какого-либо участка тела другие участки этого тела приобретают повышенную температуру не сразу, а спустя некоторое время. Неравномерное распределение температуры приводит к неравномерному тепловому расширению тела, и как следствие, к термомеханическим напряжениям. Т.к. эти напряжения меняются во времени, то в результате возникают акустические волны, излучаемые слоем с изменяющейся температурой.

Амплитуда акустического импульса линейно зависит от энергии лазерного импульса. Из-за нерешенной проблемы приема сигналов и отсутствия твердотельных лазеров, отвечающих необходимым требованиям по частоте посылаемых импульсов и их надежности, лазерное возбуждение мало распространено. Однако, такой способ перспективен, учитывая большую амплитуду (в 50–100 раз больше, чем у пьезопреобразователей), малую

чувствительность к помехам, малую длительность (единицы нс) зондирующего импульса.

Выбор метода измерений

Быстрое распространение ультразвуковых методов связано с появлением новых средств излучения и приема акустических волн. Таким образом, обеспечивается возможность повышения мощности УЗ излучения и увеличение чувствительности при приеме слабых сигналов, а также расширение верхней границы диапазона излучаемых и принимаемых волн в область гиперзвуковых частот.

Для выбора метода измерения плотности сравним некоторые виды плотномеров, которые достаточно часто применяются в различных отраслях промышленности.

Как было сказано выше, в автоциркуляционном плотномере производится вычисление частоты Δf , как разности между частотой автоциркуляции и частотой опорных импульсов. В двухканальном исполнении такого плотномера увеличивается сложность исполнения, и как следствие снижается надежность, а также процесс измерения будет происходить с большим временем преобразования информативных величин.

Плотномер с акустическим фильтром сложен в реализации, как и интерферометрический, в котором использован эффект изменения спектра УЗ импульса при распространении его в контролируемой жидкости.

Если использовать импедансный плотномер, возникают трудности в определении зависимости импеданса и плотности вещества.

В связи с этим, наиболее приемлемым является использование косвенного метода, основанного на измерении времени распространения УЗ волн в контролируемой среде в зависимости от плотности среды. Этот метод прост в реализации, практически безинерционен, время распространения акустического сигнала мало, а также нет необходимости нарушения целостности сосудов с контролируемой жидкостью, что позволяет определять плотность жидкости практически в любом сосуде.

При измерении плотности биологических жидкостей применяется высокие частоты акустических колебаний (0,1–10 МГц). Для ввода акустических колебаний в сосуд и для приема их на выходе из сосуда необходим излучатель и приемник колебаний. С этой целью будем использовать раздельно-совмещенный преобразователь. Таким образом, часть сигнала, пройдя через контролируемую среду, будет отражаться от внутренней поверхности сосуда, и поступать на приемник. Этот способ позволит увеличить путь прохождения УЗ в среде в два раза и исключает необходимость точной юстировки пьезоэлементов.

При контроле чистых жидкостей (без твердых включений) целесообразно работать на высокой частоте и поэтому следует использовать тонкие пьезоэлектрические пластины.

Часто в УЗ устройствах применяют ударное возбуждение пьезоэлектрических преобразователей, которое вполне приемлемо для исследуемого устройства.

Исследование зависимости скорости звука от плотности исследуемой жидкости

В жидкостях звук распространяется в виде объемных волн разряжения-сжатия (продольные волны), причем процесс этот обычно адиабатический, т.е. изменение температуры в УЗ волне не успевает выравняться.

Скорость распространения УЗ волн в жидкостях выражается следующим уравнением:

$$C = \frac{1}{\beta_{ad} \cdot \rho},$$

где: β_{ad} – коэффициент адиабатической сжимаемости жидкости.

Следовательно, измеряя тем или иным способом скорость распространения УЗ волны в данной среде и считая коэффициент адиабатической сжимаемости постоянным, можно легко определить плотность среды. Однако коэффициент адиабатической сжимаемости достаточно сложно вычислить.

Уменьшение амплитуды и интенсивности УЗ волны по мере ее распространения в заданном направлении, т.е. затухание звука, обуславливается, расхождением фронта волны с удалением от источника, рассеянием и поглощением звука, которое характеризуется коэффициентом поглощения α .

Интенсивность УЗ при прохождении расстояния L убывает по экспоненциальному закону и описывается формулой, которая имеет следующий вид:

$$I = I_0 \cdot \exp(-2 \cdot \alpha \cdot L),$$

где: I_0 – начальная интенсивность, Вт/м².

В жидкостях скорость звука, как правило, уменьшается с ростом температуры. Исключением из этого правила является вода, в которой скорость звука при увеличении температуры растет.

Имеется аналогия и в измерении плотности газообразных и твердых веществ. Плотность уменьшается с ростом температуры (вследствие температурного расширения и увеличивается с ростом давления). Исключение составляет вода – ее плотность имеет максимум при 4°C и уменьшается как с повышением, так и понижением температуры.

Время прохождения импульса определяется по следующим формулам:

$$\Delta t = T = 1/F_{\Gamma}, \quad (3.3)$$

где: $F_{\Gamma} = 40$ МГц – частота генератора.

$$t = N \cdot \Delta t \quad (3.4)$$

Общее время, которое понадобится УЗ импульсу для прохождения через сосуд, выражается следующей формулой:

$$t_{\text{общ}} = 2 \cdot (t_{\text{ж}} + t_{\text{мп}} + t_{\text{пр}}),$$

где: $t_{\text{ж}}$ – время, затрачиваемое на прохождение УЗ импульса через жидкость; $t_{\text{мп}}$ – время, затрачиваемое на прохождение УЗ импульса через стенку сосуда; $t_{\text{пр}}$ – время, затрачиваемое на прохождение УЗ импульса через протектор.

Скорость распространения ультразвука в исследуемой среде будет определяться из выражения:

$$C = \frac{2L}{t_{\text{э}}} = \frac{2L}{t_{\text{изм}} - 2t_{\text{од}} - 2t_{\text{ид}}},$$

где L – расстояние между стенками сосуда.

В лабораторной работе проводится определение плотности растворов состоящих из:

- воды и этилового спирта;
- воды и сахара;
- воды и поваренной соли.

3. Описание лабораторной установки

Прибор для измерения скорости распространения ультразвука в контролируемой среде состоит из микропроцессора, датчика температуры, блока индикации, генератора, пьезопреобразователя, усилителя, компаратора, источника опорного напряжения, измерительного триггера, блока преобразования временного интервала в цифровой код и емкости с исследуемой жидкостью (рис. 3.5).

Работа устройства заключается в следующем: управляющий сигнал с микропроцессора *CPU* подается на генератор и усилитель, запирая его на время работы генератора, а также на вход установки S триггера, триггер устанавливается в логическую единицу и разрешает работу преобразователя время/код. Генератор возбуждает ультразвуковой датчик, в результате генерируется УЗ импульс, который проходит через среду и, отразившись от противоположной стенки сосуда, возвращается к датчику. Принятый сигнал преобразуется в электрический и далее после усиления поступает на первый вход компаратора. На второй вход компаратора подается опорное напряжение с источника опорного напряжения. Как только выходное напряжение усилителя превысит порог компаратора на его выходе появится сигнал, сбрасывающий триггер в ноль, тем самым, запрещая

работу преобразователя время/код. Полученные данные с преобразователя поступают в микропроцессор. Для компенсации изменения скорости распространения ультразвука в контролируемой среде, вызванное изменением температуры, в схеме предусмотрен цифровой датчик температуры. Данные о температуре среды поступают в микропроцессор, который осуществляет расчет скорости, производит ее температурную коррекцию и по полученной скорости вычисляет плотность жидкости. Результат вычислений отображается на индикаторе. При отсутствии отраженного сигнала или при наличии неисправности в схеме микропроцессор перед началом нового цикла измерения производит сброс триггера по входу *R* и обнуление преобразователя время/код.

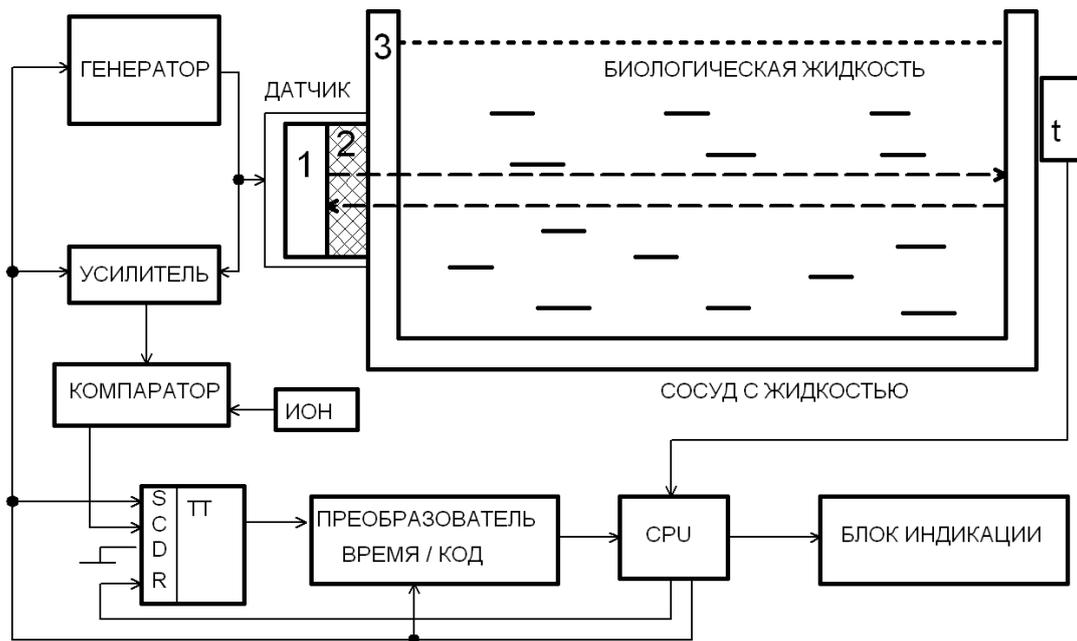


Рис. 3.5. Структурная схема лабораторного стенда для измерения плотности биологических жидкостей

4. Предварительное задание

1. Определить молекулярную массу этилового спирта, сахара и поваренной соли.
2. Используя формулу для скорости ультразвука в смеси двух веществ, полученную на основании правила смешения:

$$C^2 = \frac{RT}{xM + (1-x)M_1} \cdot \frac{x C_p + (1-x) C_{p1}}{x C_v + (1-x) C_{v1}}, \quad (3.5)$$

где: M – молекулярный вес первого вещества; M_1 – молекулярный вес второго вещества; C_p , C_v – удельная изобарная и удельная изохорная теплоемкость первого вещества; C_{p1} , C_{v1} – удельная изобарная и удельная

изохорная теплоемкость второго вещества; x – концентрация первого вещества, в долях,

рассчитать и построить зависимости скорости ультразвука в растворах:

- воды и этилового спирта, от концентрации спирта;
- воды и сахара, от концентрации сахара;
- воды и поваренной соли, от концентрации поваренной соли.

5. Программа работы

1. Изучить структурную схему прибора.
2. Снять зависимость величины временного интервала от концентрации растворов сахара, спирта и соли. Объем воды взять 100 мл. Концентрацию спирта изменять от 1 до 10 мл, концентрацию сахара и соли – (1 ÷ 15) г. Определение времени осуществляется по формуле:

$$T = 12,5 \cdot 10^{-9} \cdot N,$$

где N – количество импульсов в цуге.

3. По полученным экспериментальным данным построить зависимости скорости распространения УЗК от концентрации растворов спирта, сахара и соли.

6. Содержание отчета

1. Цель лабораторной работы.
2. Методы измерения плотности веществ.
3. Структурная схема прибора и описание по ней принципа работы прибора.
4. Расчетные и экспериментальные зависимости скорости распространения УЗК от концентрации растворов.
5. Получить аппроксимирующее уравнение для вычисления плотности или концентрации раствора по величине измеренной скорости УЗК.
6. Выводы по проделанной работе.
7. Ответы на контрольные вопросы.

7. Контрольные вопросы

1. Как зависит скорость ультразвука в воде от температуры?
2. Как зависит скорость ультразвука в воде от частоты?
3. Как зависит скорость ультразвука в воде от давления?
4. Какие вы знаете методы измерения скорости ультразвука?
5. Чем определяются предельно допустимые значения частоты ультразвука в биологических жидкостях?
6. Перечислите способы получения ультразвуковых колебаний.

7. Приведите примеры прямых и косвенных методов определения плотности вещества.
8. Назовите примеры использования полученных зависимостей.