



УДК 534.86:621.395.619

© *В. М. Колыхалин, В. В. Давыдов, 2011*

## **ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ОБЪЕМА НЕФТЕПРОДУКТОВ В АВТОМОБИЛЬНЫХ КОНТЕЙНЕРАХ**

*Колыхалин В. М.* – канд. техн. наук, нач. смены, тел. (812) 751-35-55 (ЗАО «Петербургский нефтяной терминал»); *Давыдов В. В.* – канд. техн. наук, проф. кафедры «Акустика», тел. (812) 751-35-55, e-mail: cap-007@mail.ru (СПбГУКиТ)

В процессе загрузки и/или разгрузки нефтепродуктов особое значение приобретает экспресс-регистрация номинальных (допустимых) уровней наполнения или слива передвижных средств автотранспорта с открытыми грузовыми люками и, особенно, в темное время суток. Разработаны технические средства на основе относительных акустических измерений объема (массы) нефтепродуктов по «свободному» воздушному объему путем определения уровня звукового давления с меньшей точностью, чем радарные (линейные), но с нивелированием влияния переменных внешних и внутренних технологических условий. Контролируется относительный уровень звукового давления (по давлению в «пустой» автоцистерне) при разных объемах нефтепродукта.

In oil products loading and unloading express record of filling-up of moto transport tanks is of special value particularly at night. Hardware has been developed with relative acoustic measurements of oil products mass with consideration for “free” air volume by sound pressure measurement with compensation for influence of variable external and internal technological conditions. The relative level of sound pressure is controlled at various oil products volumes.

*Ключевые слова:* звуковое давление, конденсаторный микрофон, объем нефтепродукта, канал выравнивания звукового давления.

С увеличением в последние годы объема перевозки нефтепродуктов через морские и речные порты Российской Федерации увеличилось количество перевалочных нефтяных терминалов, ориентированных на выгрузку и погрузку нефтепродуктов в различные средства транспорта, включая автомобильный [1]. Существующая практика определения состояния наполнения и слива нефтепродуктов базируется на абсолютных методах линейных измерений плоских уровней при типовом агрегатном (жидком) состоянии для горизонтального положения резервуаров цилиндрической формы.

Более того, в процессе загрузки и/или разгрузки нефтепродуктов особое значение приобретает временной фактор – экспресс-регистрация номинальных (допустимых) уровней наполнения или слива передвижных средств автотранспорта с открытыми смотровыми люками, особенно в темное время суток. Практическое отсутствие в нефтяной индустрии методов и средств дистанционного контроля массы остатка нефтепродуктов вызывает необходимость решения наиболее сложной задачи – оценки объема остатка мазута в автоцистерне. Обычный визуальный контроль объема нефтепродуктов (с помощью рулетки и калибровочных таблиц) приводит к значительным затратам времени и не обеспечивает необходимой точности.

В последнее время разработаны технические средства регистрации объема (массы) нефтепродуктов в резервуарах на основе относительных акустических измерений «свободного» воздушного объема путем определения, например, уровня звукового давления, и нашли свое применение в разгрузке железнодорожных цистерн [2]. Такой же метод определения объема нефтепродуктов возможно применить и при погрузке автомобильных контейнеров на нефтебазах и выгрузке, например, на танкеры типа «река-море», танкеры-бункеровщики. Так при экспресс-регистрации объема нефтепродукта в автоконтейнере объемом  $25 \text{ м}^3$  измерительная аппаратура располагается в кабине автомобиля, а низкочастотный микрофон устанавливается внутри резервуара через грузовой люк (см. рис. 1 а).

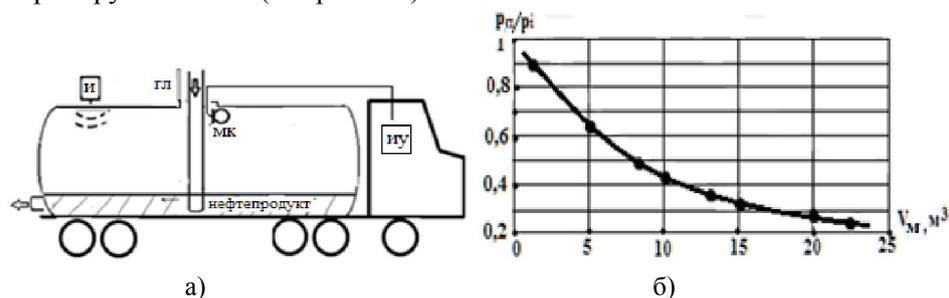


Рис. 1. Измерительная установка (а); ИУ – измерительный усилитель; МК – микрофон; И – источник звуковых колебаний; ГЛ – грузовой люк;  $p_n/p_i$  – заданное относительное звуковое давление; зависимость относительного звукового давления от объема нефтепродукта в автоконтейнере (б)

Наличие автономного источника звуковых колебаний (удар) позволяет применить более точный объективный контроль объема, в том числе и дистанционный. Контролируется  $p_n/p_i$  – относительный (по давлению, например, в «пустой» автоцистерне  $p_n$ ) уровень звукового давления при разных объемах  $V_M$  нефтепродукта посредством микрофона с измерительным усилителем. По полученным значениям отношения  $p_n/p_i$ , соответствующим различным объемам  $V_M$ , строится калибровочный график  $p_n/p_i(V_M)$  (см. рис. 1 б). Так при экспресс-регистрации объема нефтепродукта в автоконтейнере достаточно фиксировать



сировать  $p_n/p_i$  (или отношения напряжений  $U_o/U_i$ , если использовать показания вольтметра), и по калибровочному графику  $p_n/p_i$  ( $V_m$ ) находить объем  $V_m$ .

Однако при достаточно значительных скоростях загрузки или разгрузки нефтепродуктов в заданные промежутки времени в контейнерах заметно повышается (понижается) внутреннее – условно динамическое давление  $p_d$  колебаний низких и инфразвуковых частот больших уровней. Эта переменная часть может быть найдена из уравнения Бернулли, где полное давление в среде есть сумма статического и динамического давлений:

$$P_o + \rho W^2 / 2 = const, \quad (1)$$

где:  $W = W_{cp} + W_d$  – скорость потока воздуха через грузовой люк площадью  $S_l$  в виде суммы средней (атмосферной) скорости  $W_{cp}$  и скорости пульсации  $W_d$ , а  $\rho$  – плотность воздуха.

В свою очередь, например, при загрузке нефтепродукта, общее давление в воздушном объеме контейнера определяется суммой среднего  $p_o$  и пульсационного  $p_d$  давлений, т. е.:

$$P_o = P_{cp} + p_d. \quad (2)$$

При подстановке в (1) соотношений для  $p_o$  и  $W$  будем иметь:

$$P_{cp} + p_d + \rho W_{cp}^2 / 2 + \rho W_{cp} W_d + \rho W_d^2 / 2 = const. \quad (3)$$

Здесь, учитывая  $P_{cp} + \rho W_{cp}^2 / 2 = const$  и пренебрегая величиной  $\rho W_d^2 / 2$ , получим:

$$p_d \approx \rho W_{cp} W_d. \quad (4)$$

Приблизительная оценка величины избыточного давления  $p_d$  с учетом разности сечений  $S_l$  и загрузочного шланга при максимальной скорости загрузки  $u = 180 \text{ м}^3/\text{час}$  ( $5 \times 10^{-2}$ ) составляет более 160 дБ, что повышает верхний предел динамических диапазонов обычных микрофонов. Кроме формирования избыточного давления, скорость загрузки/разгрузки контейнеров определяет постоянную времени системы выравнивания давлений в измерительных конденсаторных микрофонах и, соответственно, их нижнюю границу частотного диапазона.

Система выравнивания давления в микрофоне представляет собой некоторый акустико-механический фильтр низких частот. Последний должен обеспечить беспрепятственное прохождение медленных (квазистатических) колебаний атмосферного давления, но одновременно задержать колебания тех частот, которые входят в рабочий диапазон микрофона. В микрофонах среднего диапазона эта противоречивость легко устраняется из-за значительной разницы частот, при которых происходят указанные явления. С расширением диапазона микрофонов в область низких частот эта задача усложняется тем, что, помимо известного канала выравнивания, в результате некачественной сборки могут получаться различные неплотности в обычных и разъемных соединениях деталей микрофона, через которые могут пройти низкочас-

тотные колебания с большой проникающей способностью и тем самым нарушить требуемые условия как работы, так и испытаний микрофона-приемника давления.

Рассмотрим это более подробно на примере упрощенной конструкции капсюля конденсаторного микрофона и схемы его электрического аналога (см. рис. 2 а, б, в).



в (эквивалентная схема электрического аналога капсюля при низких частотах)

Рис. 2. Конструкция и эквивалентные схемы (а, б, в) электрических аналогов капсюля конденсаторного микрофона

Здесь приняты следующие обозначения:  $M$  – мембрана и ее сосредоточенные механические параметры,  $m_i$  – масса,  $r_i$  – трение и гибкость. В зазоре между мембраной и неподвижным основным электродом (ОЭ) учитывается гибкость  $c_3$ , масса  $m_2$  и трение  $r_2$  и подмембранный объем воздуха, последние два элемента приводятся к площади мембраны посредством коэффициента трансформации  $n = S_m/S_o$ , где  $S_o$  – общая площадь отверстия в ОЭ. Одновременно в этих отверстиях неподвижного электрода учитываются приведенные величины массы  $m_3$  и трения  $r_3$  воздуха. В держателе неподвижного электрода сделан канал выравнивания атмосферного давления в виде трубки с приведенными параметрами массы  $m_4$  и трения  $r_4$ , которые вместе с гибкостью воздуха  $c_3$  в полости капсюля образуют фильтр низких частот. Под  $F_1$  и  $F_2$  обозначены силы, обусловленные избыточным давлением, действующим на наружную сторону мембраны и на воздух, находящийся в канале выравнивания, причем  $F_2$  также приводится к площади мембраны.

Поскольку частота интересующих нас колебаний избыточного давления заведомо ниже собственной частоты мембраны микрофона, то ее инерциальное сопротивление  $j\omega m_1$  пренебрежимо мало, а упругое сопротивление  $1/j\omega c_1$  и сопротивление гибкости  $1/j\omega c_2$  воздуха под мембраной достаточно велики по сравнению с упругим сопротивлением воздуха в полости неподвижного электрода  $1/j\omega c_3$  и трения в мембране  $r_1$ . Кроме того, количественно оценивая величины приведенных параметров  $m_2$ ,  $r_2$ ,  $m_3$  и  $r_3$  по сравнению с величинами  $m_4$  и  $r_4$ , можно заключить, что преобладающими здесь будут последние, так



как обычно длина канала выравнивания больше длины отверстий в неподвижном электроде, а площадь сечения его, в свою очередь, много меньше суммарной площади указанных отверстий. С учетом этих замечаний схема электрического аналога капсюля микрофона в области низких частот может быть значительно упрощена (см. рис. 2 в).

Здесь колебательная скорость мембраны определяется действием двух сил, одна из которых есть сила  $F_1$ , приложенная к наружной стороне мембраны под действием звукового давления, а другая может быть найдена методом эквивалентного генератора, присоединенного к точкам «а» и «б»:

$$F_{AB} = \frac{F_2'}{j\omega c_3(r_4' + j\omega m_4' + 1/j\omega c_3)} = \frac{F_2'}{1 + j\omega c_3 r_4' - \omega^2 m_4' c_3} \quad (5)$$

с внутренним эквивалентным сопротивлением:

$$z_3 = \frac{r_4' + j\omega m_4'}{1 + j\omega c_3 r_4' - \omega^2 m_4' c_3} \quad (6)$$

При  $F_1 = F_2$ , что справедливо для низких частот, выражение для модуля результирующей колебательной скорости мембраны будет:

$$\left| \dot{\xi}_1 \right| = \frac{\omega^2 c_1 c_3 F_1 \sqrt{(r_4')^2 + (\omega m_4')^2}}{\sqrt{[1 - \omega^2 m_4'(c_1 + c_3)]^2 [\omega r_4'(c_1 + c_3)]^2}} \quad (7)$$

Колебательная скорость и, соответственно, смещение мембраны, как видно, существенно зависит от частоты, что определяет частотную зависимость акустикоэлектрического преобразования при низких частотах.

Однако когда избыточное давление действует только на наружную сторону мембраны, схема электрического аналога конденсаторного микрофона выглядит несколько иначе (см. рис. 3).

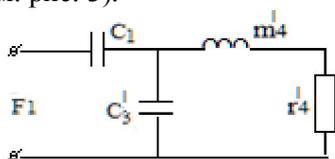


Рис. 3. Эквивалентная схема электрического аналога капсюля микрофона при действии силы  $F_1$  только на наружную сторону мембраны

Здесь сила  $F_2$  отсутствует, и колебательная скорость мембраны обусловлена лишь действием силы  $F_1$ :

$$\left| \dot{\xi}_1 \right| = \frac{\omega c_1 F_1 \sqrt{[1 - \omega^2 m_4' c_3]^2 + (\omega c_3 r_4')^2}}{\sqrt{[1 - \omega^2 m_4'(c_1 + c_3)]^2 [\omega r_4'(c_1 + c_3)]^2}} \quad (8)$$

Как и в первом случае, наблюдается определенная частотная зависимость, усугубляющаяся явными экстремальными точками при частотах:

$$\omega_{01} = \frac{1}{\sqrt{m'_4(c_1 + c_3)}} \quad \text{и} \quad \omega_{02} = \frac{1}{\sqrt{m'_4 c_3}}. \quad (9)$$

В то же время для закрытого капсюля, у которого отсутствует всякая утечка (нет элементов  $m_4$  и  $r_4$ ), смещение мембраны под действием неизменной по амплитуде силы не зависит от частоты. Последнее, как обычно, считается обязательным свойством конденсаторных микрофонов в области низких частот. То же самое наблюдается при выборе  $1/\omega c_1 > 1/\omega c_3$  и  $1/\omega c_1 > 1/\omega m_4$ .

Однако в общем случае элементы  $m_4$  и  $r_4$  существуют и влияют определенным образом на смещение мембраны. Для определения этой зависимости разделим выражение (7) на (8) и перейдем к смещению  $\eta_n$  в нормированном виде:

$$\eta_n = \frac{|\dot{\xi}_1|}{|\dot{\xi}'_1|} = \sqrt{\frac{q^4 + q^2 / D_0^2}{(1 - q^2)^2 + q^2 / D_0^2}}, \quad (10)$$

где:  $D_0 = 1/\omega_{02} c_3 r_4$  – добротность системы при частоте  $\omega_{02}$  второго экстремума,  $q = \omega/\omega_{02}$  – нормируемая частота.

Из (10) видно, что зависимость нормированного смещения при низких частотах в первую очередь определяется частотной зависимостью инерциального сопротивления канала выравнивания  $\omega m_4$  и упругого сопротивления  $1/\omega c_3$ , которые при определенной частоте образуют явление резонанса ( $\omega_{02}$ ).

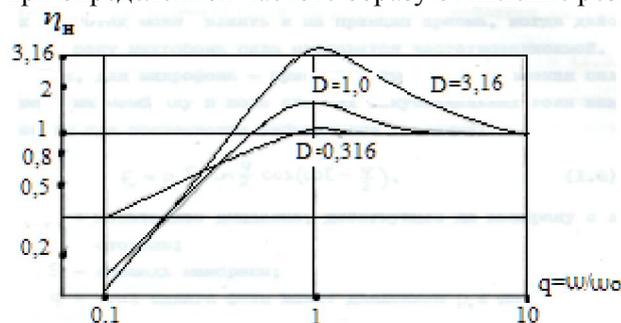


Рис. 4. График зависимости нормированного смещения мембраны микрофона от нормированной частоты при различной добротности схемы выравнивания давления

Из зависимости  $\eta_n = \varphi(q)$  (см. рис. 4) при различных значениях  $D_0$  следует, что наибольшая крутизна среза характеристики наблюдается при больших значениях  $D_0$ , но при этом диапазон рабочих частот сужается, и в характеристике наблюдается резонансный выброс. При низких значениях  $D_0$ , наоборот, частотная зависимость уменьшается, а диапазон расширяется. В пределе  $D_0 < 1$  нормированное смещение не зависит от частоты, что соответствует режиму работы капсюля микрофона при отсутствии всякого рода утечек и канала выравнивания. Это, как отмечалось, приводит к нестабильности работы микрофона.



Экспериментальная проверка влияния канала выравнивания давления на чувствительность конденсаторных микрофонов в области низких частот по нормативным методам испытаний практически не осуществима из-за значительной сложности реализации условий «свободного» поля в области низких звуковых и инфразвуковых частот с помощью звукомерных камер или труб. Однако косвенная оценка данного эффекта может быть получена модифицированным методом пистона на основе камеры малого объема [3], когда микрофон помещается внутри камеры КП (см. рис. 5).

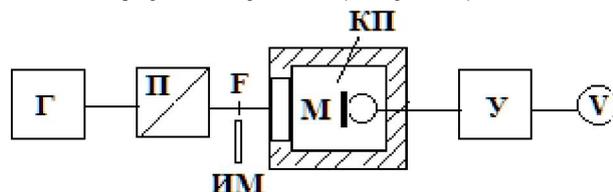


Рис. 5. Модифицированный вариант установки для испытания микрофонов (М) абсолютным (по фиксации измерительным микроскопом (ИМ) амплитуды смещения  $\xi$  поршня) методом пистона

Чтобы исключить погрешность в расчетах при определении избыточного давления  $p(\omega)$  в камере, ее объем был выбран примерно в 10 раз большим эквивалентного объема испытуемого микрофона, а результаты расчета выверены с помощью образцового микрофона, также предварительно размещенного внутри камеры. Здесь условия испытания оказались наиболее близкими к реальным условиям работы микрофона, поскольку и вход канала выравнивания был под воздействием испытательного акустического сигнала.

В качестве испытуемого микрофона был использован конденсаторный приемник звукового давления типа КИМ-9.01 с диаметром мембраны 1,5 дюйма и частотным диапазоном 0,5...1000 Гц. Условно замкнутый объем воздуха с гибкостью  $c_3$  (см. рис. 2 а) закрыт герметичной втулкой, в которой имеется возможность регулирования площади сечения канала выравнивания давления и, соответственно, величины элементов  $m_4, r_4$  посредством использования различных диаметров калиброванной проволоки, вставляемой в канал. Наружный вход канала свободно сообщался с вырезом в боковой стенке корпуса микрофона. Другие активные элементы конструкции микрофона выбраны так, что резонансные явления были демпфированы не только трением в канале, но и трением  $r_2, r_3$  в подмембранном слое воздуха и сквозных отверстиях в неподвижном электроде. Это приводит к выравниванию частотной характеристики микрофона как в области верхних, так и нижних частот, где влияние канала сказывается лишь на нижнюю граничную частоту, и в очень малой степени на среднюю чувствительность (см. рис. 6).

Из рис.6 видно, что в районе 20 Гц характеристики микрофона при разных диаметрах канала практически совпадают. В области более низких частот они расходятся, причем наибольшее влияние на нижнюю граничную частоту оказывает свободный канал диаметром 0,83 мм (кривая 4) и наименьшее –

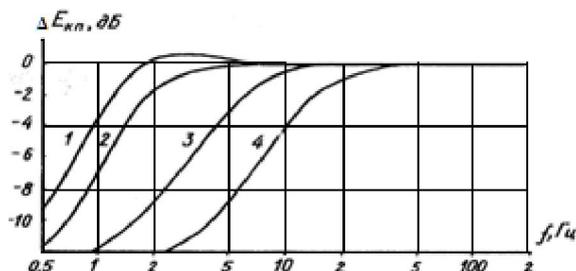


Рис. 6. Относительные частотные характеристики микрофона при различных сечениях канала выравнивания давления

при наибольшем диаметре (0,8 мм) вставленной проволоки (кривая 1). Промежуточные кривые 2 и 3 характеризуют спад частотной характеристики микрофона при соответствующих диаметрах проволоки в 0,6 и 0,3 мм.

Результаты проведенного анализа дают основание полагать, что, кроме своего положительного действия, система выравнивания давления ухудшает основные характеристики микрофона в области низких звуковых и инфразвуковых частот. И, что особенно важно, для получения указанных характеристик в чистом виде необходимо при испытаниях использовать принцип воздействия избыточного давления не только на наружную поверхность приемного элемента, но и на весь корпус микрофона.

Таким образом, разработанные технические средства регистрации объема нефтепродуктов в резервуарах на основе относительных акустических измерений «свободного» воздушного объема обеспечивают экспресс-регистрацию номинальных (допустимых) уровней наполнения или слива нефтепродуктов в автоконтейнере и необходимую точность при оценке объемов твердых остатков.

### Библиографические ссылки

1. Колыхалин В. М. Различные способы акустической диагностики твердого остатка нефтепродуктов в железнодорожных цистернах: Известия Самар. науч. центра РАН. Спец. вып. – ЕЛРПТ–2005 // Самар. науч. центр РАН. – Самара, 2005.
2. Колыхалин В. М., Давыдов В. В. Способ определения объема остатка твердого нефтепродукта в железнодорожном вагоне-цистерне. Патент на изобретение РФ № 2348015. – М. Федерал. служ. по интелект. собст., патен. и товар. знакам. – RU 2348015 С1. Заявл. 2007. – Опубл. 27. 02. 2009. – Бюл. № 6.
3. ГОСТ Р53576-2009. Микрофоны. Методы измерения электроакустических параметров. – М., 2009.
4. Акустика: Учеб. для вузов / Ш. Я. Вахитов и др. Под ред. проф. Ю. А. Ковалгина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009.