

УДК 621.179.14

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПЕДАНСА УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ В МЕГАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

© 2012 С.А. Борминский, Б.В. Скворцов, А.В. Солнцева

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева  
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 17.12.2012

В статье рассматриваются частотные зависимости диэлектрической проницаемости и проводимости (диэлектрических потерь) углеводородных топлив. В области аномальной дисперсии проводимость и диэлектрические потери возрастают, имеют максимум на критической частоте, критическая частота определяется временем дипольной релаксации полярных молекул в углеводородной среде. Приводится структурная схема прибора для измерений качественных характеристик топлив, основанная на измерении импеданса.

Ключевые слова: детонационная стойкость, углеводородное топливо, диэлектрическая проницаемость, проводимость, область аномальной дисперсии

Характеристики углеводородных топлив (бензинов и дизельных топлив) определяют их эффективное сгорание и напрямую связаны с эксплуатационными и экологическими характеристиками транспортных средств. Оперативный контроль качественных характеристик углеводородных топлив без сжигания является актуальной задачей нефтехимической промышленности России.

Основная характеристика жидких углеводородных энергоносителей – детонационная стойкость. Ее мерой являются октановое число для бензинов и цетановое число для дизельных топлив. Основным способом измерения детонационной стойкости является сжигание топлива с помощью моторных установок в лабораторных условиях. Помимо лабораторных методов в настоящее время развиваются приборы оперативного контроля, так такой контроль важен и актуален для всех участников рыночных отношений – производителей, продавцов и покупателей, поскольку позволяет оперативно контролировать детонационную стойкость косвенным методом без сжигания. Хорошо известны методы и устройства, основанные на контроле диэлектрической проницаемости углеводородных топлив, косвенно связанной с показателями детонационной стойкости [1]. Недостатки известных методов состоят в том, что они не позволяют контролировать достоверность топлива, т.е. наличие в нем запрещенных стандартом

*Борминский Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИЛ «Аналитические приборы и системы». E-mail: b80@mail.ru*

*Скворцов Борис Владимирович, доктор технических наук, профессор, научный руководитель НИЛ «Аналитические приборы и системы». E-mail: aps@ssau.ru*

*Солнцева Александра Валерьевна, аспирант, инженер НИЛ «Аналитические приборы и системы».*

*E-mail: als063@mail.ru*

кислородных и металлосодержащих присадок, с одной стороны, повышающих октановое число, а с другой – ухудшающих экологические характеристики двигателей.

Ниже дано теоретическое обоснование для создания устройства, позволяющего оперативно оценивать не только показатели детонационной стойкости, но и достоверность топлива с позиций содержания в нем запрещенных присадок.

Явления, происходящие в веществе, помещенном в электрическое поле (например, в зазоре конденсатора), могут быть описаны с позиций двух теорий: электротехнической и молекулярной. В электротехнической теории электродинамические свойства материалов и сред определяются диэлектрической ( $\epsilon$ ) и магнитной ( $\mu$ ) проницаемостями, а также удельной электрической проводимостью ( $\sigma$ ). При этом магнитная проницаемость состоит из действительной и мнимой частей  $\dot{\mu} = \mu_1 + j\mu_2$ , а  $\epsilon$  и  $\sigma$  образуют комплексную абсолютную диэлектрическую проницаемость среды:

$$\epsilon_A = \epsilon_A - j \frac{4\pi\sigma}{\omega} = \epsilon_A + j\epsilon'_A. \quad (1)$$

Абсолютные  $\epsilon_A, \mu_A$  и относительные  $\epsilon, \mu$  проницаемости связаны соотношениями:  $\epsilon_A = \epsilon_0 \epsilon, \mu_A = \mu_0 \mu$ , где  $\epsilon_0 = 8.85416 \cdot 10^{-12} [\text{Ф/м}]$ ,  $\mu_0 = 1.256637 \cdot 10^{-6} [\text{Гн/м}]$ .

Магнитная проницаемость всех неферромагнитных жидкостей, к которым относятся углеводородные, равна единице практически во всем диапазоне частот от инфранизких до оптических, поэтому авторы не видят смысла проводить измерения магнитных свойств среды.

Диэлектрический метод основывается на том, что изменение состава топлива сопровождается

изменениями диэлектрической проницаемости, которая определяется по изменениям емкости конденсатора. Путем измерения диэлектрической проницаемости можно получить информацию о качестве и составе исследуемого вещества.

Если конденсатор заполняется идеальным, не имеющим проводимости диэлектриком, то при включении его в цепь переменного тока, сдвиг фаз между током и напряжением составляет  $\varphi = 90^\circ$ . Конденсатор в этом случае ведет себя как реактивное сопротивление, не отбирая энергии из цепи. Если диэлектрик не идеальный, то есть обладает проводимостью, то конденсатор имеет потери, характеризуются проводимостью потерь  $G$ , включенной параллельно емкости конденсатора. Такой конденсатор отбирает энергию из цепи, что приводит к нагреванию и увеличению подвижности молекул диэлектрика. Диэлектрические потери характеризуются тангенсом угла потерь, определяемом через отношение реактивного сопротивления конденсатора к активному:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega CR} = \frac{G}{\omega C}. \quad (6)$$

Во многих случаях  $\operatorname{tg} \delta$  оказывается не менее важным электрофизическим параметром, чем диэлектрическая проницаемость. В частности по значению  $\operatorname{tg} \delta$  о чистоте вещества можно судить более надежно, чем по значению его диэлектрической проницаемости. Если активную проводимость и емкость выразить через геометрические размеры конденсатора, удельную электрическую проводимость и диэлектрическую проницаемость, то выражение для тангенса угла потерь примет следующий вид:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{4\pi\sigma}{\omega\epsilon_A} = \frac{4\pi\sigma}{\omega\epsilon\epsilon_0}. \quad (7)$$

При молекулярно – физическом подходе характер обратимых изменений в диэлектрике объясняется молекулярным строением исследуемых веществ, которые делятся на две группы – неполярные и полярные. Вещества, у которых при отсутствии внешнего электрического поля центры положительных и отрицательных зарядов совпадают – являются неполярными диэлектриками. Из неполярных молекул состоят углеводороды, содержащие алкильный радикал, а также имеющие симметричное строение – метан, ацетилен, бензол, нафталин и другие. Вещества, у которых при отсутствии внешнего электрического поля центры положительных и отрицательных зарядов не совпадают – называются полярными диэлектриками. К полярным относятся молекулы с электровалентной и ионной связью (вода, спирты, карбоксильные и аминокислотные группы). Диэлектрическая проницаемость по-

лярных веществ выше, чем у неполярных.

Диэлектрическая поляризация состоит из нескольких компонентов.

Деформационная поляризация  $P_{EA}$ , включающая:

- а) электронную  $P_E$  в результате которой электронное облако смещается относительно атомного ядра (при этом в пределах молекулы взаимное расположение атомных ядер остается неизменным);
- б) атомную (или ионную)  $P_A$ , в результате которой атомы смещаются друг относительно друга.
- в) ориентационная поляризация  $P_O$ , в результате которой диполи упорядочиваются под действием силового поля.

Результирующая молярная поляризация  $P$  в единицах СИ определяется по формуле, впервые полученной Дебаем:

$$P = P_E + P_A + P_O = \frac{M(\epsilon - 1)}{\rho(\epsilon + 2)} = \frac{4\pi\eta^2 N_A}{9kT} + \frac{4\pi\alpha N_A}{3}, \quad (9)$$

где  $M$  – масса 1 моля,  $g/моль$ ;

$\rho$  – плотность,  $kg/m^3$ ;

$N_A$  – число Авогадро;

$\eta$  – дипольный момент,

$k$  – постоянная Больцмана,

$T$  – температура  $^\circ K$ ,

$\alpha$  – поляризуемость (молекулярный электрический момент, создаваемый единичным полем).

Уравнение Дебая дает хорошие результаты для газов, неполярных жидкостей и разбавленных растворов полярных жидкостей в неполярных растворителях, но его нельзя применять к полярным жидкостям. Для полярных жидкостей справедливо уравнение Онзагера, полученное из предположения, что поле, действующее на молекулу со стороны ее окружения, зависит от направления ее дипольного момента. Моделью Онзагера является диполь с моментом  $m$ , помещенный в центре сферы молекулярного радиуса  $r$ , а сфера окружена сплошной средой со статической диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . На диполь действует поле полости. Кроме того, диполь внутри сферы поляризует сплошную среду. Эта поляризация окружающей среды в свою очередь создает в обратном направлении поле реакции, которое оказывает поляризующее действие на диполь.

Исходя из этих предположений, Онзагер получил следующее уравнение:

$$\frac{(\epsilon - n^2)(2\epsilon + n^2)}{\epsilon(n^2 + 2)^2} = \frac{4\pi N_A \mu^2}{9kT}. \quad (10)$$

Диэлектрическая проницаемость зависит от частоты, на которой производятся измерения. Процессы, происходящие в диэлектрике в переменном электрическом поле, объясняются введением понятия комплексной относительной диэлектрической проницаемости  $\hat{\epsilon}$ , предложенным Дебаем:

$$\epsilon = \epsilon - j\epsilon', \quad (11)$$

где  $\epsilon$  - действительная часть (относительная диэлектрическая проницаемость);  $\epsilon'$  - мнимая часть. Мнимая часть (11) характеризует поглощение энергии в диэлектрике, введенном в электрическое поле. Тангенс угла потерь определяется по формуле:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\epsilon'}{\epsilon}. \quad (12)$$

На рис. 1 показана зависимость  $\epsilon'$  и  $\epsilon$  от частоты. Действительная часть  $\epsilon$  фактически не изменяется вплоть до частот  $10^8$  Гц. Максимальная величина диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  достигается при  $\omega = 0$ . Это значение  $\epsilon$  называют квазистатическим  $\epsilon(0)$ . С увеличением частоты действительная часть  $\epsilon$  сохраняется на уровне  $\epsilon(0)$  вплоть до области аномальной диэлектрической дисперсии, в которой постепенно уменьшается, спадая до постоянного значения  $\epsilon(\infty)$ . Как следует из уравнения Максвелла, между этой величиной и показателем преломления  $n$  существует простая зависимость

$$\epsilon(\infty) = n^2. \quad (13)$$

Соотношение (13) справедливо, если атомной поляризацией можно пренебречь. Более точно диэлектрические проницаемости на предельных частотах и коэффициент оптического преломления связаны соотношением:

$$\frac{\epsilon(\infty) - 1}{\epsilon(0) + 2} = A \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}, \quad (14)$$

где  $A = 1,05 \dots 1,15$  и учитывает вклад атомной поляризации.

Теория объясняет приведенные зависимости следующим образом. Электроны, атомы, атомные группы, а также постоянные диполи в квазистатической области успевают следовать за медленно изменяющимся полем. Однако с ростом частоты картина меняется: постоянные диполи не успе-

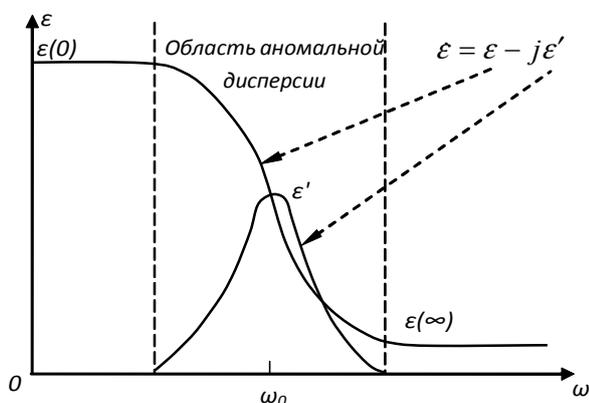


Рис. 1. Зависимость действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости от частоты

вают отслеживать изменения поля и ориентационная поляризация уже не дает прежнего вклада в полную поляризацию. Отставание в ориентации диполей относительно осцилляций поля порождает так называемую аномальную дисперсию диэлектрической проницаемости. По Дебаю дисперсия характеризуется временем релаксации  $\tau$ , зависит от вязкости раствора  $\eta$  и радиуса молекул  $a$ :

$$\tau = \frac{4\pi\eta a^3}{kT}, \quad (15)$$

где  $k$  - постоянная Больцмана;

$T$  - абсолютная температура.

Вещества с такими молекулами характеризуются тем, что у них наблюдается резкое падение диэлектрической проницаемости в области температуры затвердевания. Если молекула имеет эллипсоидальную форму, то уравнение (15) не применимо, так как для трех осей эллипсоида имеется свое время релаксации.

Когда эти времена разнятся значительно, то на дисперсионных кривых хорошо заметны три области аномальной дисперсии. Если отдельные времена релаксации по каждой оси близки, то дисперсионная область оказывается размытой. Аналогичное явление наблюдается также для сферических молекул с жесткими диполями: проявляются межмолекулярные электростатические взаимодействия или междипольные связи. Практически времена релаксации имеют порядок ( $10^{-9} - 10^{-12}$ ) сек, следовательно для измерений в дисперсионной области нужны частоты до  $10^{12}$  Гц.

Совершенно по иному ведет себя показатель  $\epsilon'$ . В квазистатической и высокочастотной областях спектра значение  $\epsilon'$  практически очень мало. Только в области аномальной дисперсии значение  $\epsilon'$  становится существенным, а при критической частоте  $\omega_0$  достигает максимума [2].

Релаксация - это процесс установления статического равновесия, соответствующего данным внешним условиям, в частности процесс упорядочения или ориентационной поляризации дипольных молекул в статическом поле после его отключения. Постоянная времени релаксации  $\tau = 1/\omega_0$ . В течение времени  $\tau$  после отключения статического поля ориентационная поляризация уменьшается в  $\epsilon$  раз. При частоте внешнего поля, существенно большей, чем релаксационная, ориентационная компонента поляризации становится пренебрежимо малой. Время, необходимое для поворота обладающих инерцией молекул в направлении поля после его включения, составляет около  $10^{-8} - 10^{-9}$  сек. Следовательно, если через вещество пропускается свет, т.е. электромагнитные волны с частотой выше  $10^9$  1/сек, то дипольные молекулы не обнаруживают ориентационной компоненты поляризации.

Комплексную диэлектрическую проницаемость по Дебаю принято выражать в виде суммы:

$$\dot{\varepsilon} = \varepsilon - j\varepsilon' = \varepsilon(\infty) + \frac{\varepsilon(0) - \varepsilon(\infty)}{1 + j\omega\tau}, \quad (16)$$

где  $\varepsilon(\omega)$  – диэлектрическая проницаемость, измеренная на высоких (оптических) частотах.

Проведя преобразования и отделив действительную и мнимую составляющие диэлектрической проницаемости, из (16) получим следующие уравнения:

$$\varepsilon = \varepsilon(\infty) + \frac{\varepsilon(0) - \varepsilon(\infty)}{1 + \omega^2\tau^2} = \varepsilon(\infty) + \frac{[\varepsilon(0) - \varepsilon(\infty)]\omega_0^2}{\omega_0^2 + \omega^2}; \quad (17)$$

$$\varepsilon' = [\varepsilon(0) - \varepsilon(\infty)] \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} = \frac{[\varepsilon(0) - \varepsilon(\infty)]\omega\omega_0}{\omega_0^2 + \omega^2}. \quad (18)$$

На основании уравнений Дебая проанализируем зависимости диэлектрической проницаемости и проводимости от частоты. Учитывая, что

$$\omega_0 = \frac{1}{\tau} \text{ из уравнений (17) можно получить:}$$

$$\varepsilon(\omega) = \frac{\varepsilon(\infty)\omega^2 + \varepsilon(0)\omega_0^2}{\omega^2 + \omega_0^2} = \frac{n^2\omega^2 + \varepsilon(0)\omega_0^2}{\omega^2 + \omega_0^2}, \quad (20)$$

где  $n^2 = \varepsilon(\infty)$  – коэффициент оптического преломления, который чаще всего определяется на длине волны, соответствующей желтой линии спектра натрия ( $\lambda = 0,586$  мкм).

Приравнивая правые части выражений (1) и (18), после преобразований получим зависимость проводимости топлива от частоты:

$$\sigma(\omega) = \frac{\omega_0\omega^2\varepsilon_0[\varepsilon(0) - \varepsilon(\infty)]}{4\pi(\omega^2 + \omega_0^2)} = \frac{\omega_0\omega^2\varepsilon_0[\varepsilon(0) - n^2]}{4\pi(\omega^2 + \omega_0^2)}, \quad (21)$$

где  $\varepsilon_0 = 8.85416 \cdot 10^{-12}$  [Ф/м] – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Выражение (21) справедливо, если считать, что  $\sigma(0) = 0$ , что не соответствует истине. С другой стороны на оптических частотах электрическая проводимость практически равна нулю. Поэтому выражение (21) адекватно описывает изменение проводимости от частоты для диапазона частот  $\omega \geq \omega_0$ . Для описания зависимости проводимости от частоты при  $\omega \leq \omega_0$  выражение (21) необходимо добавить значением  $\sigma(0)$ :

$$\begin{aligned} \sigma(\omega) &= \sigma(0) + \frac{\omega^2\omega_0\varepsilon_0[\varepsilon(0) - \varepsilon(\infty)]}{4\pi(\omega^2 + \omega_0^2)} = \\ &= \sigma(0) + \frac{\omega^2\omega_0\varepsilon_0[\varepsilon(0) - n^2]}{4\pi(\omega^2 + \omega_0^2)} \end{aligned} \quad (22)$$

Для описания в полном диапазоне частот выражение (10) необходимо умножить на величину  $\frac{\omega_0^2}{\omega^2 + \omega_0^2}$ , то есть можно записать:

$$\sigma(\omega) = \sigma(0) \frac{\omega_0^2}{\omega^2 + \omega_0^2} + \frac{\omega_0^3\omega^2\varepsilon_0[\varepsilon(0) - \varepsilon(\infty)]}{4\pi(\omega^2 + \omega_0^2)^2}. \quad (23)$$

Пример зависимости проводимости от частоты при различных начальных проводимостях показан на рис. 2. Конкретные числовые значения при вычислениях взяты для изооктана – эталонного компонента бензина:  $\varepsilon(0) = 1,961$ ;  $\varepsilon(\infty) = 1,958$ ;  $\omega_0 = 0,204 \cdot 10^9$  1/сек ( $\tau = 4,9 \cdot 10^{-9}$  сек). У других основных компонентов бензинов эти значения близки к указанным. Для нефтепродуктов такая зависимость получена впервые. График показывает, что экстремум проводимости имеет место на частоте, близкой к критической  $\omega_0$ , при этом начальная проводимость не влияет на величину и частоту экстремума.

Функция (23) удовлетворяет всем известным знаниям о зависимости проводимости от частоты: при  $\omega = 0$ ,  $\sigma(\omega) = \sigma(0)$  – статическая проводимость при постоянном токе; при  $\omega = \omega$ ,  $\sigma(\omega) = 0$ , так как нет таких зарядов, способных направленно двигаться синхронно полю, изменяющемуся с бесконечной частотой.

При  $\omega = \omega_0$

$$\sigma(\omega) = \frac{\sigma(0)}{2} + \frac{\varepsilon_0\omega_0[\varepsilon(0) - \varepsilon(\omega_0)]}{16\pi} -$$

максимальное значение поляризационной (дебаевской) проводимости.

На рис. 3 показано смещение графика проводимости в зависимости от значения критической частоты. Из графика следует, что величина экстремума зависит от значения критической частоты. График показывает, что на частотах 1 - 10 МГц проводимость становится достаточно высокой.

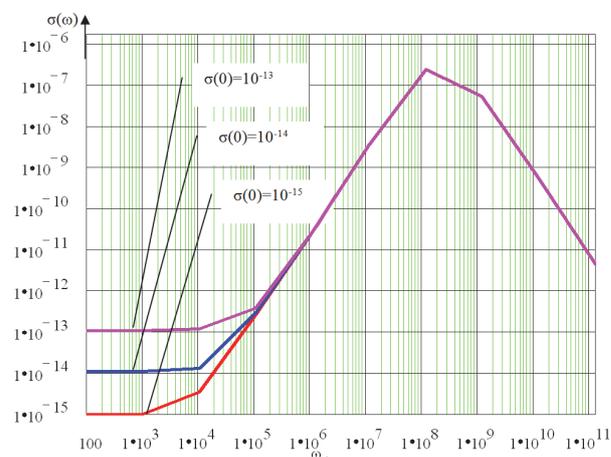
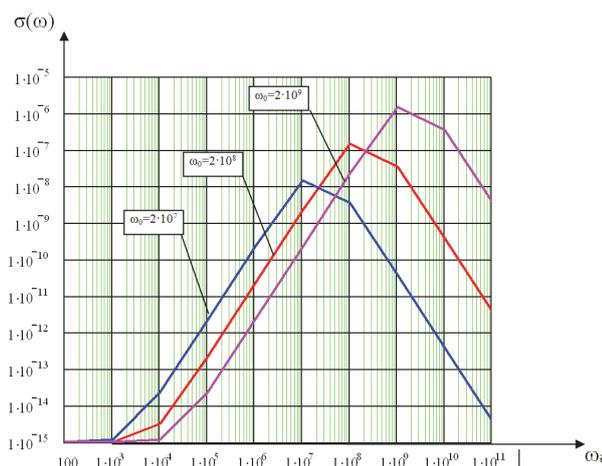


Рис. 2. Общий вид зависимости проводимости нефтепродуктов от частоты



**Рис. 3.** Зависимость проводимости нефтепродуктов от частоты при различных значениях критической частоты  $\omega_0$

Выразим из (20)  $\varepsilon(\omega)$  и подставим его в (23).

$$\varepsilon(\infty) = \frac{\varepsilon(\omega)(\omega^2 + \omega_0^2) - \omega_0^2 \varepsilon(0)}{\omega^2}, \quad (24)$$

$$\sigma(\omega) = \frac{\omega_0^2 \sigma(0)}{\omega^2 + \omega_0^2} + \frac{\omega_0^3 \varepsilon_0 [\varepsilon(0) - \varepsilon(\omega)]}{4\pi(\omega_0^2 + \omega^2)}. \quad (25)$$

Выразим из (8)  $\varepsilon(0)$  и подставим в (11).

$$\varepsilon(0) = \frac{\varepsilon(\omega)(\omega^2 + \omega_0^2) - \omega^2 \varepsilon(\infty)}{\omega_0^2}, \quad (26)$$

$$\sigma(\omega) = \frac{\omega_0^2 \sigma(0)}{\omega^2 + \omega_0^2} + \frac{\omega_0 \omega^2 \varepsilon_0 [\varepsilon(\omega) - \varepsilon(\infty)]}{4\pi(\omega_0^2 + \omega^2)}. \quad (27)$$

Выражения (25) и (27) связывают между собой проводимость и диэлектрическую проницаемость на различных частотах, при этом (25) предпочтительно для частот  $\omega \leq \omega_0$ , а (27) для частот  $\omega \geq \omega_0$ .

Рассмотрим частотную зависимость для тангенса угла потерь. Из (1) следует:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta(\omega) &= \frac{4\pi\sigma(\omega)}{\omega \varepsilon_A(\omega)} = \frac{4\pi\sigma(\omega)}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon(\omega)} = \\ &= \frac{\{4\pi(\omega^2 + \omega_0^2)\sigma(0) + \varepsilon_0 \omega_0 \omega^2 [\varepsilon(0) - \varepsilon(\infty)]\} \omega_0^2}{\varepsilon_0 \omega [\omega^2 \varepsilon(\infty) + \omega_0^2 \varepsilon(0)] (\omega_0^2 + \omega^2)} \end{aligned} \quad (28)$$

или с учетом  $n^2 = \varepsilon(\infty)$ :

$$\operatorname{tg} \delta(\omega) = \frac{\{4\pi(\omega^2 + \omega_0^2)\sigma(0) + \varepsilon_0 \omega_0 \omega^2 [\varepsilon(0) - n^2]\} \omega_0^2}{\varepsilon_0 \omega [\omega^2 n^2 + \omega_0^2 \varepsilon(0)] (\omega_0^2 + \omega^2)}. \quad (29)$$

Численный эксперимент показал, что на потери существенно влияет разность между квазистатической и оптической диэлектрическими проницаемостями.

Углеводородная среда плохой проводник электричества. Удельная электрическая проводимость  $s$  нефтепродуктов возрастает с повышением пределов их выкипания в процессе перегонки нефти и для рассматриваемых видов топлив находится в пределах  $10^{-17} \div 10^{-16} [Ом^{-1} м^{-1}]$ . Для бензиновых фракций прямой перегонки проводимость составляет  $(0,1 \div 1,0) \times 10^{-16} [Ом^{-1} м^{-1}]$ . В целях предотвращения скопления статического электричества в бензиновых баках и на бензозаправках в бензин добавляют специальные присадки, которые увеличивают его электрическую проводимость. Поэтому проводимость готовых товарных автомобильных бензинов, измеренная на частотах 100 – 1000 Гц при температуре 20<sup>0</sup>С составляет  $(3 \div 10) \times 10^{-16} [Ом^{-1} м^{-1}]$ . С ростом частоты проводимость уменьшается до нуля в соответствии с графиком на рис. 2.

В последнее время на рынке приборов измерения детонационной стойкости появились приборы, измеряющие не только диэлектрическую проницаемость, но и проводимость среды. Однако, такие приборы, как правило, измеряют проводимость на постоянном токе, что приводит лишь к измерению проводимости присадки, увеличивающей электрическую проводимость топлив.

Полученные теоретические результаты дают возможность более точно рассчитывать и анализировать распространение электромагнитных волн в разнообразных средах, а также более точно рассчитывать и конструировать датчиковую аппаратуру, основанную на использовании изменений параметров  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  в широком диапазоне частот. В частности, полученные соотношения используются при исследовании свойств нефти и нефтепродуктов в широком диапазоне частот. Состав топлива и его детонационные свойства влияют на все главные электрические параметры: проводимость  $\sigma$ , критическую частоту  $\omega_0$ , квазистатическую  $\varepsilon(0)$  и оптическую  $\varepsilon(\omega)$  диэлектрические проницаемости. Приведенные графики позволяют сориентироваться в ожидаемых значениях указанных параметров при их измерении и выбрать рабочий диапазон частот.

На основании полученных теоретических исследований был сконструирован опытный прибор измерения детонационной стойкости и достоверности топлив (рис. 4).

Ядром схемы является микроконтроллер, к которому подсоединяются основные функциональные блоки: датчики, одним из которых обязательно является датчик температуры, входящий в блок термодатчика, индикатор, клавиатура управления прибором, а также вспомогательные устройства, обеспечивающие возможности связей с программатором и внешним компьютером.

В последнее время появились новые микросхемы, которые можно использовать для прецизионного измерения емкости и определения тангенса угла потерь. В частности, для измерения емкости в разработанном приборе используется специализированная микросхема AD7747, состоящая из задающего генератора, усилителя с высоким входным сопротивлением и 24 разрядного АЦП. Всё это позволяет измерять емкость в диапазоне 0-8 пФ с точностью до 10 фФ.

Измерение потерь реализовано двумя отдельными блоками. Первый блок измеряет сопротивление по постоянному току датчика, погруженного в нефтепродукт (измеряемые сопротивления порядка 1-100 ГОм). Второй блок измеряет сопротивление датчика в широком диапазоне частот (1-500 МОм).

Все три измерительных блока получают информацию с одного коаксиального конденсатора, погружаемого в нефтепродукт. Вместе с конденсатором в среду погружается и термодатчик. Благодаря высокой чувствительности микросхем в качестве емкостного датчика выбран коаксиальный конденсатор малых размеров – диаметр составляет 3см, высота - 2см. Выбор коаксиальной конструкции датчика обусловлен наибольшей механической стойкостью к внешним воздействиям, что является необходимым для получения высоких метрологических характеристик.

Во избежание помех, все измерительные блоки работают по очереди. Общий цикл измерений с учетом обработки – несколько секунд.

Применение вышеописанных формул и схем



Рис. 4. Структурная схема прибора

позволило создать прибор, способный измерять детонационную стойкость с точностью до 0,5%, а измерение проводимости топлива в широком диапазоне частот позволяет выявить большинство топлив, изготовленных с нарушениями техпроцесса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы измерений количественных и качественных характеристик жидких энергоносителей / С.А. Борминский, Б.В. Скворцов, А.В. Солнцева. Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. 222 с.
2. Импульсные методы измерений количества и качества жидких углеводородных топлив / Б.В. Скворцов, С.А. Борминский. Самара: Издательство СНЦ РАН, 2010. 220 с.

### RESEARCH OF IMPEDANCE OF HYDROCARBON FUELS IN THE MEGAHERTZ RANGE FREQUENCY

© 2012 S.A. Borminsky, B.V. Skvortsov, A.V. Solntseva

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolev  
(National Research University)

The article deals with the frequency dependence of the dielectric constant and conductivity (dielectric loss) of hydrocarbon fuels. In the anomalous dispersion conductivity and dielectric losses increase, have a maximum at the critical frequency, the critical frequency determined by the dipole relaxation of polar molecules in a hydrocarbon medium. Provides a block diagram of the device for measuring the quality characteristics of fuels, based on measuring the impedance.

Key words: detonation resistance, hydrocarbon fuel, dielectric constant, conductivity, the region of anomalous dispersion.

*Sergey Borminsky, Candidate of Technics, Senior Research Fellow at the Research Laboratory «Analytical Devices and Systems». E-mail: aps@ssau.ru*

*Boris Skvortsov, Doctor of Technics, Professor, Supervisor at the Research Laboratory «Analytical Devices and Systems». E-mail: aps@ssau.ru*

*Alexandra Solntseva, Graduate Student, Engineer at the Research Laboratory «Analytical Devices and Systems». E-mail: als063@mail.ru*