

А. А. ДЕМЬЯНОВ, В. В. МЕРИАКРИ  
 (Фрязино)

### ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ НЕФТИ

При определении влагосодержания в нефти и нефтепродуктах, транспортируемых по трубопроводам, необходимо работать с непрерывным потоком этих нефтепродуктов, в связи с чем обычно применяемые емкостные датчики приходится помещать непосредственно в потоке. Наличие в нефти различного рода механических примесей приводит к загрязнению

датчика, что вызывает повышение погрешности измерения при определении влагосодержания. Все предложенные меры борьбы и предупреждения загрязнения датчика, как правило, оказываются малоэффективными.

Нами рассматривается возможность использования перестраиваемого направленного ответвителя в качестве датчика влагосодержания в нефти и нефтепродуктах. Принципиальная схема датчика-ответвителя, описанного в [1], приведена на рис. 1, а. В отличие от обычных избирательных ответвите-

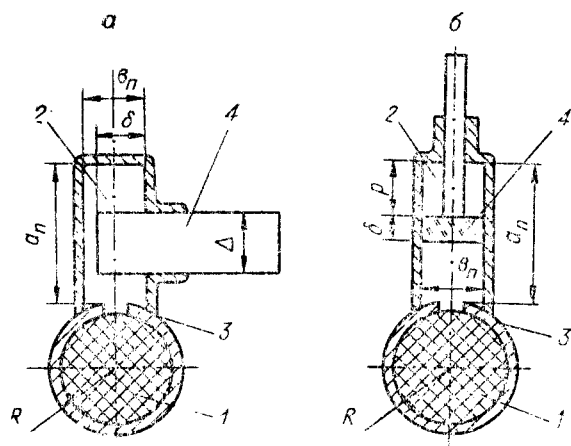


Рис. 1. Схема датчика-ответвителя:  
 1 — основной волновод; 2 — П-образный (а) и прямоугольный (б) волноводы; 3 — отверстия связи; 4 — металлическая (а) и диэлектрическая (б) пластины.

лей устройство может быть перестроено при помощи подвижной металлической пластины 4. При введении пластины 4 в волновод 2 происходит изменение фазовой постоянной волны  $H_{10} - \beta_{10}(\delta)$ . Причем с увеличением  $\delta$  критическая длина волны  $H_{10}$  в П-образном волноводе возрастает. Известно, что коэффициент связи двух волноводов максимален при равенстве фазовых постоянных волн. Эта особенность связанных волн позволяет фиксировать по максимальному коэффициенту связи момент равенства  $\beta_{10}(\delta)$  и  $\beta_{11}(\% \text{ H}_2\text{O})$ , что может быть достигнуто подбором  $a_n$  и  $\Delta$ .

В качестве датчика влагосодержания можно также использовать систему, изображенную на рис. 1, б. В ней, как и в предыдущем варианте, при изменении положения диэлектрической пластины 4 происходит изменение  $\beta_{\varepsilon}^n(p)$ . Подобрав  $a_n$  и  $\delta_p$ , можно добиться того, что при некотором  $p$  величина  $\beta_{\varepsilon}^n(p)$  станет равной  $\beta_{0,11}^n$  (% H<sub>2</sub>O).

Для установления зависимостей  $\delta=f(\% \text{ H}_2\text{O})$  и  $p=\varphi(\% \text{ H}_2\text{O})$  необходимо оценить изменение диэлектрических параметров нефти при изменении влагосодержания в ней.

Изучение диэлектрических параметров неоднородных диэлектриков (к ним относится и эмульсия нефть — вода) в основном проводилось при низких частотах, т. е. для случая, когда размеры и периодичность включений меньше длины волны. В [2] рассматривается возможность распространения обычных методов расчета гетерогенных систем на область сантиметровых длин волн, когда периодичность и размеры включений могут быть сравнимы с длиной волны. Согласно полученному в [3] уравнению, можно произвести исследование диэлектрической эмульсии нефть — вода:

$$\varepsilon_{\text{см}} = \varepsilon_n \left( 1 + \frac{3w}{\frac{\varepsilon_p + 2\varepsilon_n}{\varepsilon_p - \varepsilon_n} - w} \right), \quad (1)$$

где  $\varepsilon_p$  определяется из уравнения

$$\varepsilon_p = \frac{2(\sin ka\sqrt{\varepsilon_n \mu_n} - ka\sqrt{\varepsilon_n \mu_n} \cos ka\sqrt{\varepsilon_n \mu_n})}{(k^2 a^2 \varepsilon_n \mu_n - 1) \sin ka\sqrt{\varepsilon_n \mu_n} + ka\sqrt{\varepsilon_n \mu_n} \cos ka\sqrt{\varepsilon_n \mu_n}}. \quad (2)$$

Здесь  $\varepsilon_{\text{см}}$  — диэлектрическая проницаемость эмульсии;  $\varepsilon_n$ ,  $\varepsilon_b$  — диэлектрическая проницаемость нефти и воды;  $w$  — объемное содержание влаги;  $k$  — волновое число;  $a$  — размер дисперсных частиц.

Разложив в (2)  $\sin ka\sqrt{\varepsilon_n \mu_n}$  и  $\cos ka\sqrt{\varepsilon_n \mu_n}$  по степеням  $ka\sqrt{\varepsilon_n \mu_n}$ , при малых  $ka\sqrt{\varepsilon_n \mu_n}$  получим

$$\varepsilon_p = \varepsilon_b \left( 1 + \frac{k^2 a^2 \varepsilon_n \mu_n}{10} \right). \quad (2a)$$

Производя оценку порядка второго члена в диапазоне  $\lambda_0=3,28$  см при  $a=0,01 \div 0,05$  мм,  $\varepsilon_b=30 \div 31$  и  $\mu_n=1$ , получаем, что с большой степенью точности влиянием второго члена можно пренебречь. В этом случае (1) принимает вид

$$\varepsilon_{\text{см}} = \varepsilon_n \left( 1 + \frac{3w}{\frac{\varepsilon_b + 2\varepsilon_n}{\varepsilon_b - \varepsilon_n} - w} \right). \quad (3)$$

Рассчитываем  $\varepsilon_{\text{см}}$  при условии, что  $\lambda_0=3,28$  см,  $\varepsilon_b=30$  и  $\varepsilon_n=2,0$ , а объемное содержание воды в нефти изменяется в пределах  $w=0 \div 0,75$  (табл. 1).

Таблица 1

H <sub>2</sub> O, %	10	5	2	1	0,75	0,50	0,20	0,10
$\varepsilon_{\text{см}}$	2,54	2,36	2,10	2,05	2,04	2,025	2,006	2,005

Данные табл. 1 позволяют осуществить расчет пределов изменения  $\beta_{\varepsilon}^n$  (% H<sub>2</sub>O) и определить параметры датчиков влагосодержания.

Исходим из условия равенства фазовых постоянных в связанных волноводах:

$$\beta_{\epsilon}^n = \beta_{\epsilon}^0, \quad (4)$$

где

$$\beta_{\epsilon}^0 = \sqrt{k^2 \epsilon_{\text{см}} - g^2}; \quad (4a)$$

$$\beta_{\epsilon}^n = \sqrt{k^2 - \left(\frac{2\pi}{\lambda_{\text{кр}}^n}\right)^2}; \quad (4б)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_0}; \quad g = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{кр}}^0}.$$

Подставив (4a) и (4б) в (4) и разрешив его относительно  $\lambda_{\text{кр}}^n = \psi(\epsilon_{\text{см}})$ , получаем

$$\lambda_{\text{кр}}^n = \frac{2\pi}{\sqrt{g^2 + k^2(1 - \epsilon_{\text{см}})}}. \quad (5)$$

Отсюда для волны  $H_{11}$  в круглом волноводе имеем

$$\lambda_{\text{кр}}^n = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{1,841}{R}\right)^2 - \left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)^2 (\epsilon_{\text{см}} - 1)}}. \quad (5a)$$

Из (5a) очевидно, что  $R$  и  $\lambda_0$  должны быть подобраны так, чтобы величина под корнем всегда была положительна, а зависимость  $\lambda_{\text{кр}}^n = \psi(\epsilon_{\text{см}})$  была наиболее резкой (крутой).

Нами были произведены расчеты для нескольких значений  $R$  при  $\lambda = \text{const}$ . Вычисления показали, что весь диапазон изменения  $\omega$  следует разбить на три: от 0,75 до 0,10; от 0,10 до 0,01; от 0,05 до 0,001. В этом случае можно получить датчики, обладающие хорошей чувствительностью к изменению влагосодержания. Если принять  $R = 8,5$  мм и  $\lambda = 3,28$  см, то можно осуществить контроль влагосодержания в пределах 0,1—5,0%  $\text{H}_2\text{O}$  (табл. 2).

Таблица 2

$\text{H}_2\text{O}, \%$	5	2	1	0,75	0,50	0,20	0,10
$\lambda_{\text{кр}}^n, \text{ см}$	18,5	7,2	6,4	6,24	6,11	5,91	5,90

Остается подобрать размеры П-образного волновода (см. рис. 1, а) и прямоугольного (см. рис. 1, б) волновода и установить зависимости  $\delta = f(\% \text{H}_2\text{O})$  и  $p = \varphi(\% \text{H}_2\text{O})$ .

Размер широкой стенки П-образного волновода  $a_n$  определяется неравенством  $\lambda_{\text{кр}}^n \leq \lambda_{\text{кр}}^n \text{ min}$  или  $a_n \leq 2,95$  см (согласно данным табл. 2). Выбираем сечение  $23 \times 10$  мм. Зная параметры П-образного волновода зависимость  $\frac{\delta}{b_n} = f_0\left(\frac{\lambda_{\text{кр}}^n}{a_n}\right)$  [4] (для  $\frac{\Delta}{a_n} = 0,5$  имеем  $\Delta = 11,5$  мм).

Величины  $a_n$  и  $b_n$ , находим  $\delta = f_1(\lambda_{\text{кр}}^n)$  (рис. 2). Для получения зависимости  $\delta = f(\% \text{H}_2\text{O})$  достаточно для  $\lambda_{\text{кр}}^n$  (см. табл. 2), соответствующего определенному процентному содержанию воды в нефти, найти значение  $\delta$  по кривой рис. 2. Результаты записаны в табл. 3.

Таблица 3

H <sub>2</sub> O, %	0,1	0,2	0,5	0,75	1,00	2,00
$\delta$ , мм	4,9	5,0	5,15	5,35	5,6	5,4
$\rho$ , мм	—	3,06	3,45	3,84	4,255	6,256

Размеры прямоугольного волновода подбираются исходя из соотношений, полученных для фазовращателей. В [5] приводится зависимость  $\frac{\rho}{a_n} = \varphi_0 \left( \frac{\lambda_{кр}'' \epsilon}{\lambda_{кр0}''} \right)$ . Осуществляя пересчет величин для волновода

сечением  $23 \times 10$  мм, получаем зависимость  $\rho = \varphi_0(\lambda_{кр}'')$ , приведенную на рис. 2. Для получения зависимости  $\rho = \varphi(\% \text{ H}_2\text{O})$  достаточно для  $\lambda_{кр}''$  (см. табл. 2) найти по кривой рис. 2 значение  $\rho$ . Результаты приведены в табл. 3.

Сравнивая зависимости  $\delta = f(\% \text{ H}_2\text{O})$  и  $\rho = \varphi(\% \text{ H}_2\text{O})$ , полученные для датчиков, приведенных на рис. 1, приходим к заключению, что применение перестраиваемого направленного ответвителя в качестве датчика влагосодержания позволяет перекрыть большой диапазон изменения процентного содержания воды. С другой стороны, плавный фазовращатель обладает большей точностью.

Применяя системы, приведенные на рис. 1, в совокупности с соответствующей системой поиска и экстремального регулирования, можно

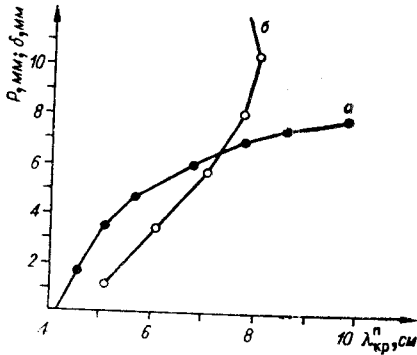


Рис. 2. Зависимость критической длины П-образного волновода (а) и плавного фазовращателя (б) от положения подвижной пластины.

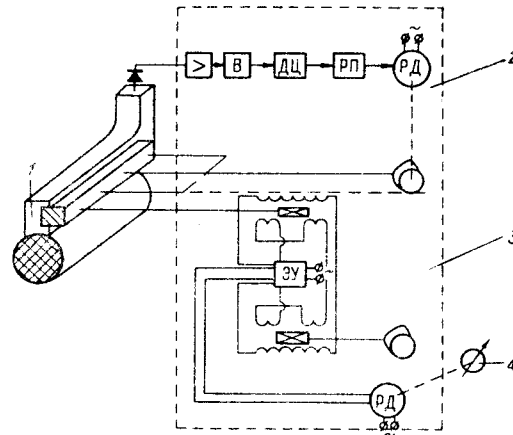


Рис. 3. Устройство для автоматического измерения влагосодержания нефти:

1 — датчик; 2 — система экстремального регулирования; 3 — дифференциально-трансформаторная передача; 4 — самопишущий прибор; В — выпрямитель; ДЦ — дифференцирующая цепь; РП — реле поляризованное; РД — реверсивный двигатель; ЭУ — электронный усилитель.

по положению подвижной пластины судить о процентном содержании воды в потоке жидкости, заполняющей основной (круглый) волновод. Это позволяет разработать блок-схему измерения влагосодержания.

Система (рис. 3) состоит из датчика — перестраиваемого ответвителя 1, системы экстремального регулирования 2 и дифференциально-трансформаторной передачи 3. Измеряемая величина фиксируется

самопишущим прибором. Устройство работает следующим образом. При изменении содержания влаги происходит изменение критической длины волны в основном волноводе. Это вызывает изменение сигнала на выходе ответвителя 1, а следовательно, и разбаланс в схеме 2. Сигнал разбаланса детектируется и поступает на дифференцирующую цепь, которая производит определение знака производной функции сигнала. Переключение реле и направление вращения реверсивного двигателя зависят от знака производной. Как только положение подвижной пластины, приводимой в движение кулачком от механического привода реверсивного двигателя окажется таким, что наступит равенство фазовых постоянных во вспомогательном и в основном волноводах, то наступит равновесие. При этом сигнал на выходе ответвителя 1 максимален. Положение пластины фиксируется при помощи дифференциально-трансформаторной передачи. Измеряемая величина записывается самопишущим прибором, проградуированным в процентах влагосодержания.

К достоинствам предлагаемого метода измерения влагосодержания относится, как было указано выше, то, что датчик не имеет элементов, расположенных в потоке и присоединяется к отводной трубе трубопровода фланцевым соединением. В датчике осуществляется надежная герметизация полости основного (круглого) волновода, заполненного об-

водненной нефтью, от вспомогательного с помощью диэлектрика или слюдяной пластины. Процесс измерения легко автоматизируется. Однако результаты измерения зависят от параметров сухой нефти и температуры, поэтому метод может быть рекомендован для измерений влагосодержания в нефти одного месторождения в диапазоне от 1,0 до 20,0%  $H_2O$ .

Применение второго датчика, заполненного сухой нефтью при тех же условиях, что и измерительный (рис. 4), позволяет исключить влияние параметров сухой нефти и температуры на результаты измерений. Это достигается за счет добавления второй цепи автоматического регулирования.

Положение подвижной пластины фиксируется дифференциальными катушками, которые включены встречно. Это позволяет компенсировать влияние параметров сухой нефти и температуры, так как изменение температу-

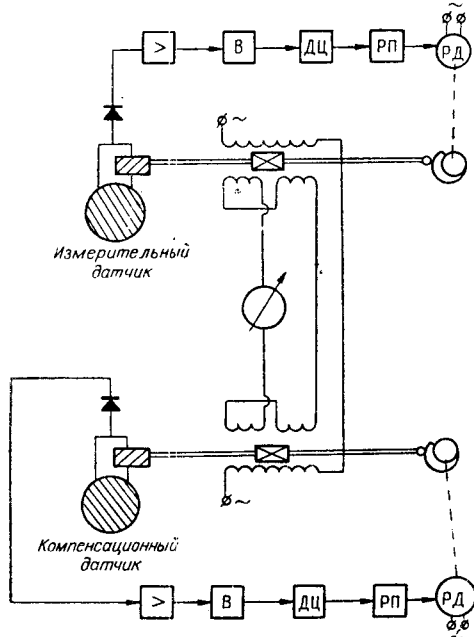


Рис. 4. Принципиальная схема автоматического измерения влагосодержания нефти и нефтепродуктов с коррекцией по составу и температуре.

ры изменяет э. д. с. в компенсационной системе, которая включена встречно с э. д. с., возникающей в измерительной катушке при изменении влагосодержания в нефти. Разность э. д. с., пропорциональная положению подвижных пластин, а следовательно, и фазовых постоянных среды, заполняющей основной волновод, фиксируется стрелочным или самопишущим прибором.

Обеспечив циркуляцию сухой нефти через компенсационный датчик,

можно осуществить коррекцию по изменяющимся параметрам сухой нефти, что дает возможность осуществить контроль малых влагосодержаний. Расчеты показывают, что такая система позволяет проводить измерение влагосодержания с точностью 0,05%  $H_2O$ . Датчики легко перестраиваются на различные диапазоны измерения влагосодержания. Погрешность измерения не хуже 2,5%.

Данная методика может быть применена не только для определения содержания воды в нефти. Принцип ее построения позволяет получить информацию о влиянии на диэлектрические свойства жидких веществ любого параметра (например, снятие температурных зависимостей).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Мериакри. Многоволновый перестраиваемый ответвитель.— ПТЭ, 1966, № 2.
2. Л. М. Парнас, К. И. Лебедева. Диэлектрические свойства неоднородных диэлектриков на сверхвысоких частотах.— Физика диэлектриков (труды II Всесоюзной конференции). М., Изд-во АН СССР, 1960.
3. Л. Левин. Современная теория волноводов. М., Изд-во иностр. лит., 1954.
4. В. В. Мериакри. Исследование потерь волны  $H_{01}$  на преобразования в линиях со случайными неоднородностями.— Автореферат канд. дисс. М., 1963.
5. А. Ф. Харвей. Техника сверхвысоких частот, т. 1. М., Изд-во иностр. лит., 1965.

*Поступила в редакцию  
8 июля 1969 г.,  
окончательный вариант —  
25 декабря 1970 г.*