



15-я международная выставка

# НЕФТЕГАЗ



**26—29 мая 2014**

**Оборудование и технологии  
для нефтегазового комплекса**

Организаторы:

ЗАО «Экспоцентр» (Россия),  
фирма «Мессе Дюссельдорф ГмБХ» (Германия)



Самая крупная выставка России 2011–2012 гг. по тематике «Нефть и газ» в номинациях: «Выставочная площадь», «Международное признание», «Охват рынка». Рейтинг составлен ТТП РФ и РСВЯ. Все выставки – участники рейтинга прошли независимый аудит статистических показателей в соответствии с международными правилами



[www.neftegaz-expo.ru](http://www.neftegaz-expo.ru)

# ДО ВСТРЕЧИ В МАЕ В «ЭКСПОЦЕНТРЕ»!

Реклама

5-й МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ

## ЭНЕРКОН

ОТ СОВРЕМЕННЫХ НЕФТЕГАЗОВЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ К СТАБИЛЬНОМУ  
ОТРАСЛЕВОМУ РАЗВИТИЮ

**26–28 мая**  
[www.enercon-ng.ru](http://www.enercon-ng.ru)

12+

УДК 66.067.3.812

**Д.У. Думболов**, к.т.н., доцент; **А.В. Елькин**, к.т.н., доцент; **С.А. Галко**, к.т.н., доцент;

**Д.А. Дроздов**, аспирант, младший научный сотрудник; **А.А. Прохоров**, аспирант, ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России»

## СПОСОБ, УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА, СОДЕРЖАЩЕГО НЕРАСТВОРЕННУЮ ВОДУ

*В статье предлагается способ определения нерастворенной воды в топливе в динамических условиях с использованием аксиально-турбинного расходомера. Представлена структурная схема, а также математическая модель измерения расхода и содержания нерастворенной воды в топливах, учитывающая особенности различных режимов течения жидкости и изменение температуры.*

**Ключевые слова:** аксиально-турбинный расходомер, нерастворенная вода, качество топлив, диэлектрическая проницаемость, обводнение нефтепродуктов, авиационный керосин.

Контроль качества нефтепродуктов с целью определения содержания воды производят визуально или с использованием допущенных действующими нормативными положениями для выполнения данной операции приборов и индикаторов. Приборная оценка содержания воды в нефтепродуктах проводится путем отбора проб по ГОСТ 2517-85 и дальнейшего анализа в статических условиях титраторами по методу Карла Фишера.

Однако существует ряд технологических операций, где необходимо использование средств контроля содержания воды в нефтепродуктах в динамических условиях. Например, отсутствие в настоящее время в широком применении средств контроля чистоты топлив (по содержанию воды) в динамических условиях значительно затрудняет процесс перекачки и учет транспортируемого топлива по трубопроводам и повышает риск создания предпосылок к аварийным ситуациям при заправке наземной техники и летательных аппаратов.

Схема обеспечения чистоты авиационного топлива на аэродромах гражданской авиации предусматривает только одну группу расходных резервуаров с

одноступенчатой системой фильтрации высокоэффективными фильтрами и фильтрами-водоотделителями (3–5 мкм) при заправке из расходной группы. Существующая система топливоподготовки при заправке летательных аппаратов ведущих зарубежных стран обеспечивает очистку авиатоплива от механических загрязнений до 1–2 мкм, содержание свободной воды – не более 0,00015% масс и механических примесей – 0,000026% масс (0,26 мг/л). Исходя из тенденции к повышению чистоты авиационных топлив, прогнозируются аналогичные требования и для топлив перспективной авиационной техники РФ.

Это обуславливает необходимость разработки научно-методического аппарата и приборов оценки загрязненности топлив от механических загрязнений до 5 мкм и определения эффективности средств очистки и определения количества нерастворенной воды в динамических условиях, работа которых основывается на использовании физических методов исследования топлив. Исходя из анализа работы различных приборов измерения расхода жидкости, а также теории поля и теории электро-

физических констант, предлагается способ определения расхода топлива, содержащего нерастворенную воду.

### СУЩНОСТЬ СПОСОБА [1] ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА В ДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ЗАКЛЮЧАЕТСЯ В СЛЕДУЮЩЕМ:

- определение расхода топлива, содержащего нерастворенную воду в потоке в гомогенной структуре, определяется по зависимости:

$$\omega = Aq_0 - (B + C), \quad (1)$$

а применяя допускающие упрощения и приравнивая моменты  $M_r = M_n = M_b = 0$ , получим

$$\omega = Aq_0 = \xi_1 q_v, \quad (2)$$

где  $\omega$  – круговая частота аксиальной турбинки;  $\xi_1$  – коэффициент, учитывающий особенности конструкции аксиально-турбинного преобразователя,  $q_v$  – объемный расход топлива,  $M_b$ ,  $M_r$ ,  $M_n$  – моменты сил вязкого трения, сил трения в подшипниках и сопротивления тахометрического преобразователя (или редуктора) соответственно, откуда

$$q_v = \frac{\omega}{\xi_1} = \frac{2\pi f}{\xi_1}, \quad (3)$$

где  $f$  – частота следования импульсов тахометрического преобразователя, аксиально-турбинного расходомера;

- определение диэлектрической проницаемости перекачиваемого топлива, содержащего нерастворенную воду;
- определение температуры перекачиваемого топлива, содержащего нерастворенную воду;
- выбор табличного значения относительной диэлектрической проницаемости перекачиваемого топлива, не содержащего примеси, приведенного к температуре 20 °C;
- пересчет табличного значения относительной диэлектрической проницаемости перекачиваемого топлива, не содержащего примеси, к температуре перекачиваемого топлива, содержащего нерастворенную воду;
- выбор табличного значения примеси (нерастворенная вода), определяемой в топливе;
- определение расхода «чистого» топлива (без не растворенной в топливе воды). Диэлектрическая проницаемость перекачиваемой среды  $\epsilon_c$  [2–5] будет равна

$$\epsilon_c = \frac{V_n}{V_n + V_p} \epsilon_n + \frac{V_p}{V_n + V_p} \epsilon_p, \quad (4)$$

где  $V_n$  – объем топлива без примесей (не растворенной в топливе воды),  $V_p$  – объем примесей (не растворенной в топливе воды),  $\epsilon_n$  – относительная диэлектрическая проницаемость топлива без примесей,  $\epsilon_p$  – относительная диэлектрическая проницаемость примесей (не растворенной в топливе воды). Отсюда при нормальных условиях (температура 20 °C)

$$\eta\% = \frac{V_p}{V_n} = \frac{\epsilon_c - \epsilon_n}{\epsilon_n - \epsilon_c}, \quad (5)$$

где  $\eta\%$  – содержание по объему включений примесей (не растворенной в топливе воды) в топливе.

С учетом зависимости Клаузиуса – Мосотти с поправкой Дебая [6] при температурах, отличных от 20 °C, диэлектрическая проницаемость топлива  $\epsilon_n$  будет равна

$$\epsilon_{nT} = \beta(t-20) + \epsilon_{n20}, \quad (6)$$

где  $\beta$  – коэффициент, учитывающий температурный градиент изменения диэлектрической проницаемости топлива,

$1/(\text{°C})$ ;  $t$  – температура перекачиваемого топлива, °C.

С учетом (3) и (5) математическая модель измерения расхода топлива с поправкой на определение нерастворенной воды можно представить в виде

$$q_n = q_v(1-\eta\%) = q_v \left(1 - \frac{V_p}{V_n}\right) = \frac{2\pi f}{\xi_1} \left(1 - \frac{\epsilon_c - \epsilon_n}{\epsilon_n - \epsilon_c}\right), \quad (7)$$

а с учетом (6)

$$q_n = \frac{2\pi f}{\xi_1} \left(1 - \frac{(\epsilon_c - (\beta(t-20) + \epsilon_{n20}))}{\epsilon_n - \epsilon_c}\right), \quad (8)$$

где  $\beta$  – коэффициент, учитывающий температурный градиент изменения диэлектрической проницаемости нефтепродукта, определяемый по уравнению Клаузиуса – Мосотти,  $1/(\text{°C})$ ;  $t$  – температура перекачиваемого топлива, °C.

Измерение диэлектрической проницаемости среды производится посредством преобразователя «емкость – напряжение». Исходя из этого получим

$$\epsilon_c = f(U), \quad (9)$$

где  $U$  – напряжение, снимаемое с преобразователя.

После подстановки (9) в (8) окончательный вариант математической модели измерения расхода топлива с поправкой на содержание нерастворенной воды будет выглядеть следующим образом:

$$q_n = \frac{2\pi f}{\xi_1} \left(1 - \frac{(f(U) - (\beta(t-20) + \epsilon_{n20}))}{\epsilon_n - f(U)}\right). \quad (10)$$

Реализация способа осуществляется последовательностью работы элементов, структурно представленных на рисунке 1.

Расходомер 2 обеспечивает изменение внутреннего сопротивления датчика с частотой, пропорциональной расходу жидкости. Формирователь импульсов преобразует изменение внутреннего сопротивления датчика расходомера в импульсное напряжение в уровнях ТТЛ, которое подается на вход микропроцессора, обеспечивающего измерение количества импульсов за единицу времени и пересчитывающего это значение в расход жидкости.

Преобразователь емкости в напряжение преобразует в напряжение значение емкости датчика 5, расположенного в трубопроводе. Емкость датчика зависит от значения  $\epsilon$  (относительного коэффициента диэлектрической проницаемости) жидкой среды в трубопроводе (примесь нерастворенной воды в топливе). Выходное напряжение датчика измеряется микропроцессором. Одновременно измеряется температура топлива в трубопроводе. Микропроцессор по пересчетным таблицам определяет  $\epsilon$  жидкой среды в трубопроводе.

Связь с ПЭВМ осуществляется по CAN-интерфейсу (на расстояние до 1 км), подключенному к микропроцессору через преобразователь интерфейса. ПЭВМ подключается к CAN-интерфейсу через стандартный преобразователь интерфейсов CAN-USB. При этом на ПЭВМ устанавливается виртуальный COM-порт [7]. При необходимости установки расходомера на больших расстояниях применяются другие интерфейсы. Например, на расстояниях до 7 км – токовая петля (ИРПС). Двусторонний обмен данными блока измерения с ПЭВМ осуществляется по интеллектуальному помехоустойчивому

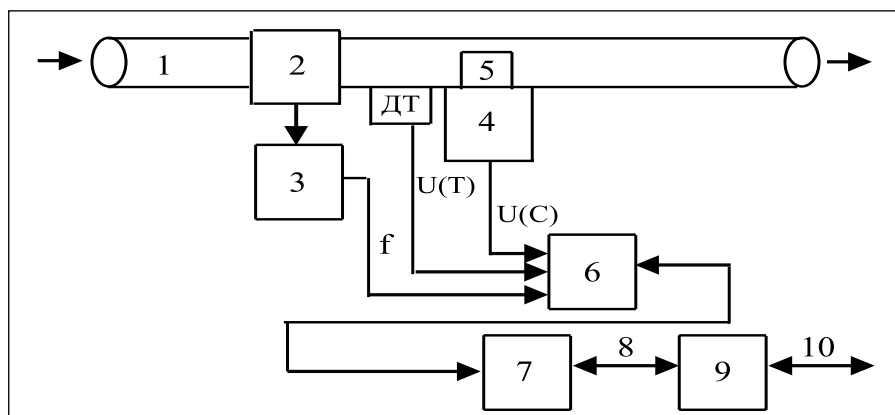
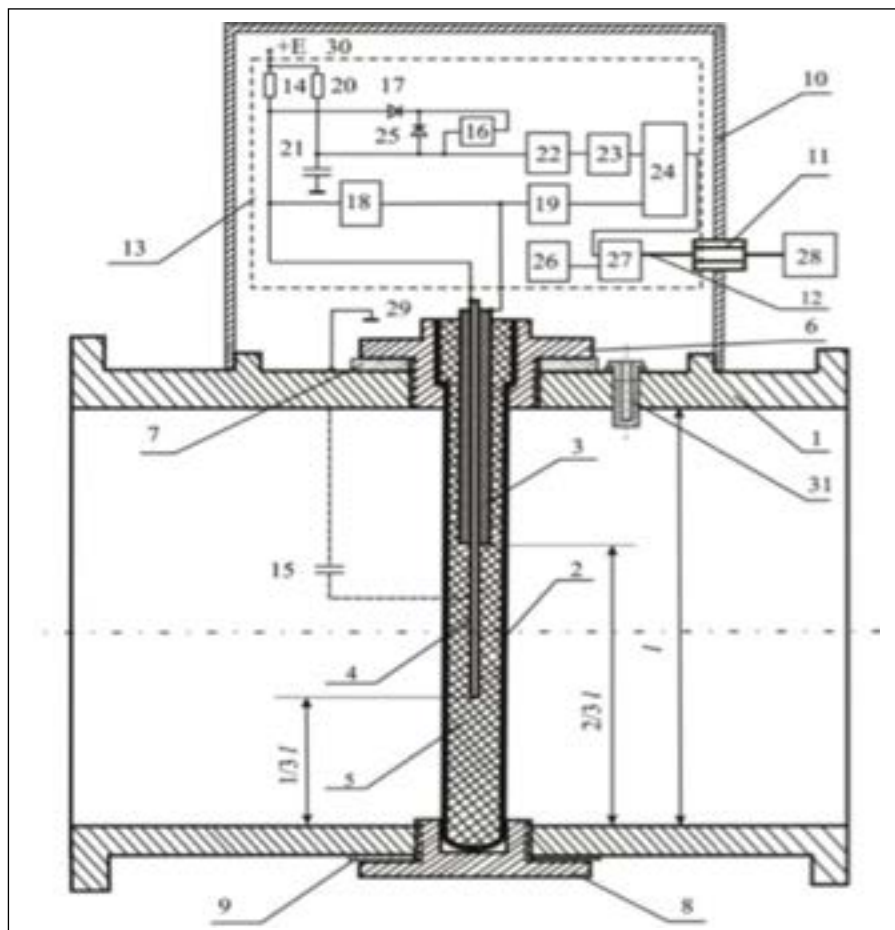


Рис. 1. Схема структурная измерения расхода топлива и количества в ней нерастворенной воды: 1 – трубопровод, 2 – расходомер, 3 – формирователь импульсов, 4 – преобразователь «емкость – напряжение», 5 – датчик преобразователя «емкость – напряжение», 6 – микропроцессор, 7 – преобразователь интерфейсов ТТЛ-CAN, 8 – линия связи с CAN-интерфейсом, 9 – преобразователь интерфейсов CAN-USB, 10 – линия связи с USB-интерфейсом



**Рис. 2. Структурная схема емкостного датчика для определения нерастворенной воды в топливах в динамических условиях**

протоколу обмена, в котором ПЭВМ с ПО инициирует каждый обмен посылкой управляющей последовательности данных, а блок управления при получении корректной управляющей последовательности выполняет команду управляющей последовательности и в ответ посылает результирующую последовательность данных.

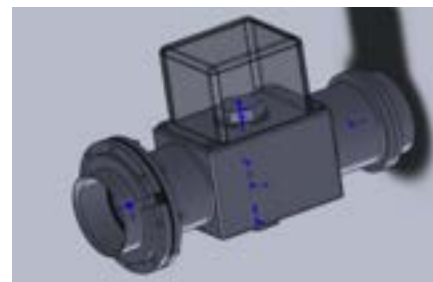
На рисунке 2 представлена структурная схема емкостного датчика для определения в топливе нерастворенной воды в потоке по диэлектрической проницаемости перекачиваемого продукта для установки в трубопроводах. Схема включает участок трубопровода 1 с емкостным датчиком в виде стеклянной колбы 2, в которую помещен трубчатый медный электрод («охранный электрод») 3, центральный медный электрод 4, залитые диэлектриком 5, например эпоксидным клеем. Колба вклеена во втулку 6, вкрученную в стенку трубопровода 1, через первую прокладку 7. Фиксирует датчик втулка 8 с второй прокладкой 9. Также на схеме изображены: крышка корпуса емкостного датчика 10 с втулкой 11 для герметизации интерфейса 12, электрон-

ная схема емкостного датчика 13, RC-цепь датчика с резистором  $R_d$  14 и емкостью  $C_d$  15, образованной между центральным электродом 4 и корпусом трубопровода 1, генератор 16, диод 17, подключенный катодом к выходу генератора 16, а анодом – к центральному электроду 4, первый повторитель напряжения 18, первая интегрирующая цепь 19, образцовый резистор  $R$  20 и образцовый конденсатор 21  $C$ , второй повторитель напряжения 22, вторая интегрирующая цепь 23, вычитающее устройство 24, второй диод 25, подключенный анодом к входу генератора 16 и точке соединения резистора 20 и конденсатора 21, а катодом – к точке соединения выхода генератора 16 и катода диода 17, датчик температуры 26 на интегральной микросхеме, микропроцессорное устройство 27 и ПЭВМ 28. Питание устройства осуществляется источником разнополярного напряжения 30, подключенного к первому контакту через резисторы 14 и 20 и ко второму контакту, подключенному к корпусу трубопровода и общей шине питания 29. В емкостном датчике центральный электрод 4 экранируется «охранным

электродом» 3, который обеспечивает эквипотенциальное экранирование центрального электрода примерно на  $1/3$  длины у стенки трубопровода. Длина центрального электрода выбрана так, чтобы его окончание находилось на расстоянии примерно  $1/3$  длины от противоположной стенки трубопровода. Это обеспечивает измерение емкости центральной части стержня относительно стенок трубопровода. При этом емкость датчика определяется относительной диэлектрической проницаемостью топлива в трубопроводе. Стеклянная колба обеспечивает герметизацию центрального электрода датчика, обеспечивает его стабильные характеристики.

### УСТРОЙСТВО РАБОТАЕТ СЛЕДУЮЩИМ ОБРАЗОМ:

Генератор напряжения 16, близкого к пилообразному, выполнен на микросхеме таймера КР1006ВИ (LM555). Образцовый конденсатор 21 заряжается через образцовый резистор 20 от источника напряжения  $E$  30 по экспоненте. При достижении уровня напряжения  $U_2$  на конденсаторе 21 открывается выходной ключ микросхемы таймера и через диод 25 разряжает конденсатор 21 до напряжения  $U_1$  ( $U_1 < U_2$ ). Затем процесс повторяется. При этом напряжение на конденсаторе 21 изменяется от напряжения  $U_1$  до  $U_2$  практически по линейному закону. Напряжение питания  $E$  существенно больше  $U_2$ . Электрическая емкость  $C_d$  конденсатора 15 цепи датчика выбирается заведомо больше образцовой электрической емкости  $C$  конденсатора 21 при близких значениях сопротивления резисторов 20 и 14. При этом она также будет заряжаться от источника напряжения  $E$  через резистор 14. Однако при разряде конденсатора 21 через диод 25 одновременно конденсатор 15 через диод 17 разрядится до на-



**Рис. 3. Трехмерная графическая модель емкостного датчика определения количества в топливе нерастворенной воды в динамических условиях**

пряжения U1. В следующий такт работы генератора конденсатор 15 через резистор 14 будет заряжаться по экспоненте с напряжением на конденсаторе, близким к линейному ( $E$  существенно больше  $U_2$ ). Но скорость заряда конденсатора 15 будет в  $C_d/C$  меньше скорости заряда конденсатора 21. Поэтому максимальное напряжение заряда будет меньше  $U_2$  и зависит от значения емкости датчика 15. Среднее значение пилообразного напряжения также будет зависеть от емкости  $C_d$  конденсатора 15.

При достижении напряжения на конденсаторе 21 напряжения  $U_2$  конденсаторы 21 и 15 одновременно разряжаются до напряжения  $U_1$ . Далее процесс повторяется.

Напряжение с конденсаторов 21 и 15 через повторители напряжения 18 и 22 подаются на интегрирующие цепи 19 и 23, с выхода которых снимаются средние значения пилообразных напряжений конденсаторов 21 и 15. Вычитающее устройство 24 обеспечивает выделение разности средних значений пилообразных напряжений конденсаторов 21 и 15. Выходное напряжение вычитающего устройства подается на вход АЦП микропроцессора 27. Микропроцессор 27 управляется ПЭВМ 28 по интерфейсу.

Перед введением в эксплуатацию устройства в память микропроцессора 27 вводятся значения напряжений, соответствующих выходным напряжениям датчика при различных видах чистых топлив, заливаемых в датчик, значения температурных поправок и



**Рис. 4. Экспериментальный образец устройства для определения количества топлива и содержащейся в нем нерастворенной воды в динамических условиях**

поправочный коэффициент для данного экземпляра датчика (снимается экспериментально для образца чистого топлива). Все значения коэффициентов снимаются экспериментально при исследовании первого образца датчика. На рисунке 3 представлена трехмерная графическая модель емкостного датчика определения количества в топливе нерастворенной воды в динамических условиях.

Экспериментальный образец устройства, которое может работать в технологической схеме топливозаправщика, представлен на рисунке 4.

Таким образом, полученная измерительная математическая модель аксиально-турбинного тахометрического расходомера позволит определять расход топлива и содержащейся в нем нерастворенной воды в динамических условиях при различных температурах и режимах движения жидкости. Анали-

тические коэффициенты, полученные при математическом моделировании аксиально-турбинного расходомера с емкостным датчиком определения в топливе нерастворенной воды, а также адекватность полученных результатов необходимо определить в ходе планирования и проведения эксперимента на лабораторном стенде с использованием экспериментального образца устройства для определения количества топлива и содержащейся в нем нерастворенной воды в динамических условиях.

**Литература:**

1. Коваленко В.П., Думболов Д.У., Сыромятников В.И. и др. Способ измерения расхода углеводородного горючего в потоке // Международный технико-экономический журнал. – 2010. – № 4. – С. 6.
2. Грохольский А.Л., Меньшиков А.П. Определение числа диэлектрических микропримесей в различных средах // Труды метрологических институтов СССР / ВНИИМ: Исследования в области измерений электромагнитных параметров. – Вып. 177/237. – Л., 1975. – С. 66–69.
3. Оделевский В.И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных сред // Журнал технической физики. – 1951. – Т. 21. – № 3. – С. 46–51.
4. Фокин Л.Г. Диэлектрическая проницаемость смеси // Журнал технической физики. – 1971. – Т. 41. – № 6. – С. 1073–1079.
5. Зайдель Р.М. Диэлектрические свойства с плоскими частицами примеси // Электричество. – 1967. – № 1. – С. 89–91.
6. Эме Ф. Диэлектрические измерения. – М.: Химия, 1967. – 223 с.
7. Думболов Д.У. и др. Разработка и исследование аппаратно-программных средств измерения физических величин // Итоговый отчет о НИР. – Ульяновск: УВВТУ, 2008. – 155 с.
8. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мелихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

**Automation**

**D.U. Dumbolov**, Philosophy Doctor, Associate Professor; **A.V. Elkin**, Philosophy Doctor, Associate Professor; **S.A. Galko**, Philosophy Doctor, Associate Professor; **D.A. Drozdov**, junior research scientist; **A.A. Prohorov**, postgraduate student, Federal Autonomous Enterprise «The 25-th State Research Institute of Himmotology, Ministry of Defense of Russian Federation»

**Method, device for its implementation and the mathematical model for determining the fuel consumption-containing undissolved water**

*The article proposes a method for determining the undissolved water in fuel under dynamic conditions with an axially turbine flowmeter. A structural scheme and the mathematical model of the flow and content of undissolved water in fuels, which takes into account characteristics of the various regimes of liquid flow and temperature changes.*

**Keywords:** axially turbine flowmeter, undissolved water, fuel quality, dielectric permittivity, supplying with water of oil products, aviation kerosene.

**References:**

1. Kovalenko V.P., Dumbolov D.U., Syromyatnikov V.I. and others. Sposob izmereniya rashkoda uglevodородного goryuchego v potoke (Method to measure hydrocarbon fuel flowing consumption) // The International Technical-Economic Journal. – 2010. – No. 4. – P. 6.
2. Grokhol'skiy A.L., Mentshikov A.P. Opredelenie chisla dielektricheskikh mikroprimesei v razlichnykh sredakh (Determination of amount of dielectric trace impurities in various media) // Proceedings of metrological institutions of the USSR / All-Russian Scientific-Research Institute for Metrology: Research in the area of electromagnetic parameters measurement. – Issue 177/237. – L., 1975. – P. 66–69.
3. Odelevskiy V.I. Raschet obobshchenoi provodimosti geterogennykh sred (Calculation of heterogeneous media generic conductivity) // Technical Physics Journal. – 1951. - T. 21. – No. 3. - P. 46–51.
4. Fokin L.G. Dielektricheskaya pronitsaemost' smesi (Mixture dielectric capacitance) // Technical Physics Journal. – 1971. - T. 41. – No. 6. - P. 1073–1079.
5. Zaydel R.M. Dielektricheskie svoystva s ploskimi chastitsami primesi (Dielectric properties with flat impurity particles) // Electricity. – 1967. – No. 1. – P. 89–91.
6. Eme F. Dielektricheskie izmereniya (Dielectric measurements). – Moscow: Chemistry, 1967. – 223 p.
7. Dumbolov D.U. and others. Razrabotka i issledovanie apparatno-programmykh sredstv izmereniya fizicheskikh velichin (Development and research of hardware and software for physical quantities measurement) // Final report on research activities. – Ulyanovsk: UVVTU, 2008. – 155 p.
8. Fizicheskie velichiny (Physical quantities): Reference book / Under the editorship of I.S. Grigoryev, Ye.Z. Melikhov. – Moscow: Energoatomizdat, 1991.