

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОЭЛЕКТРОДНЫХ ЭЛЕКТРОЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ВЛАГОМЕРОВ НЕФТИ

Ю.И. Стеблев, Е.С. Нефедова

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Разработана методика физического моделирования многоэлектродных электроемкостных преобразователей полнопоточных влагомеров нефти. Получены экспериментальные результаты, позволяющие оптимизировать выбор основных конструктивных параметров преобразователей при использовании средств контроля в трубопроводах различных диаметров.

Ключевые слова: многоэлектродный электроемкостный преобразователь, оптимизация, преобразователь, датчик, комплексирование, емкость, конструктивный зазор, влагомер, нефть, моделирование.

Электроемкостные преобразователи используют в диэлектрическом методе влагометрии, основанном на измерении диэлектрической проницаемости смеси «нефть – вода», связанной известной функциональной зависимостью с объемным содержанием воды. При этом водонефтяная эмульсия помещается в емкостный преобразователь, в котором измеряется емкость между двумя электродами. В нефтяных поточных влагомерах чаще всего применяют коаксиальные электроемкостные преобразователи, где первым электродом служит трубопровод, а потенциальный электрод выполнен в виде стержня.

Возможны, однако, и другие конструктивные схемы электроемкостных преобразователей поточных влагомеров, выполненных, например, в виде плоских или сегментных электродов, определенным образом размещенных в сечении трубопровода [1].

Цель статьи – оптимизировать выбор конструктивных параметров многоэлектродных электроемкостных преобразователей на основе их физического моделирования.

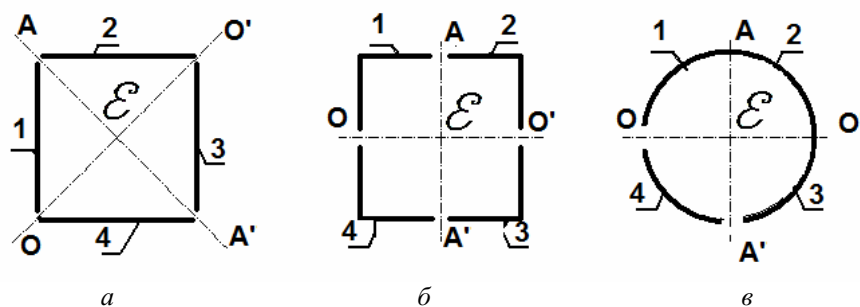
Оптимизация конструктивных параметров МЭП сводится к решению следующей задачи: определение величин конструктивных зазоров между соседними электродами, определяющих необходимые размеры зон локального зондирования многофазного потока.

Для определения возможных вариантов размещения плоских или сегментных электродов по периферии многофазного потока воспользуемся свойствами системы проводников, отмеченных в [2].

Установлено, что система из 4 проводников 1-4, разделенных бесконечно тонкими зазорами, сечения которых совпадают с линиями OA , AO' , $O'A'$ и $A'O$, обладает следующим свойством: взаимная частичная емкость между двумя любыми накрест лежащими проводниками на единицу их длины (C_{13} или C_{24}) равна $\frac{1}{\pi} \varepsilon_0 \varepsilon \ln 2$ независимо от формы и размеров цилиндра. Отметим, что процедура измерения

должна соответствовать определению взаимной частичной емкости, то есть при измерении емкости C_{13} или C_{24} потенциалы проводников, не участвующих в измерении, должны быть равны нулю.

Таким образом, могут быть реализованы следующие конструктивные схемы электроемкостных преобразователей с плоскими и сегментными электродами (рис. 1).



Р и с. 1. Конструктивные схемы электроемкостных преобразователей с плоскими (а, б) и сегментными (в) электродами

Основное достоинство предложенных конструктивных схем ЭП в том, что они позволяют реализовать электрическое зондирование поперечного сечения многофазного потока в различных направлениях и локальных областях путем измерения взаимных частичных емкостей не только между накрест лежащими, но и между соседними электродами. То есть за один цикл измерения может быть сформирован следующий многомерный сигнал:

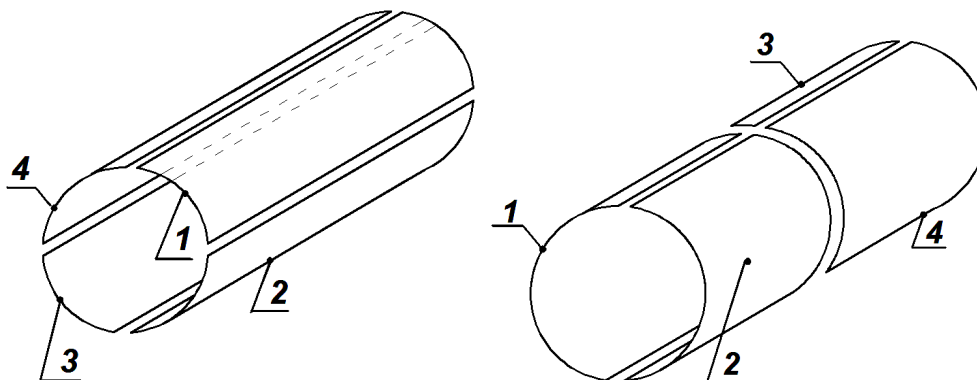
$$\bar{C} = \begin{vmatrix} C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{23} & C_{24} & C_{34} \end{vmatrix}.$$

Эксперимент проводился с многоэлектродными преобразователями (МЭП) с сегментными электродами двух конфигураций и трех различных диаметров (рис. 2).

Физическая модель многоэлектродного преобразователя представляет собой полый цилиндр трех различных диаметров $d_1=40$ мм, $d_2=50$ мм, $d_3=110$ мм с полукруглыми электродами, выполненными из медной фольги толщиной в 0,1 мм; длина каждого электрода $l=150$ мм. В первом случае электроды расположены по периметру диэлектрического каркаса и разрезаны пополам по длине электродов. Во втором случае электроды разрезаны на 4 равные части по периметру диэлектрического каркаса. Продольное и поперечное сечение МЭП изображено на рис. 2. При экспериментальных исследованиях использовалась стандартная измерительная аппаратура, в частности измерители иммитанса типа Е7-14 и Е7-12, работающие на частотах 0,1 кГц; 1 кГц; 10 кГц и 1 МГц соответственно, но основные расчеты ведутся для значений на частоте 10 кГц, т. к. при изменениях частоты значения емкости воздушной среды изменяются незначительно. Приборы предназначены для измерения емкости, проводимости, фактора потерь и добротности. Погрешность установки частоты – не более 0,01% при достаточно широком диапазоне измерения. Так, прибор Е7-14 на частоте 10 кГц имеет пределы измерения емкости от 0,001 пФ до 160 мкФ, проводимости от 0,0001 мкСм до 10 См.

С целью последующего сравнения отдельных экспериментальных результатов с известными теоретическими была измерена диэлектрическая проницаемость карка-

са, на котором крепились измерительные электроды преобразователя, и определена эквивалентная диэлектрическая проницаемость среды, включающей воздушное заполнение и стенку цилиндрического каркаса.



Р и с. 2. Физическое моделирование МЭП

Величина емкости подобного цилиндрического конденсатора определяется по известной формуле [1]

$$\frac{1}{C_{ц}} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 l} \left[\frac{1}{\epsilon_{в}} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{\epsilon_x} \ln \frac{R_3}{R_2} \right], \quad (1)$$

где $R_1=25$ мм – радиус внутреннего электрода; $R_2=52$ мм – внутренний радиус диэлектрического корпуса; $R_3=55$ мм – радиус внешнего электрода; $\epsilon_{в}=1,0$ – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха; ϵ_x – относительная диэлектрическая проницаемость материала каркаса; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная вакуума, $l=330$ мм – длина модели преобразователя.

Измерение емкости $C_{ц}$ цилиндрического конденсатора проводились на трех частотах. Результаты измерений сведены в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные значения

f, кГц	0,1	1,0	10
$C_{ц}$, ПФ	37,015	37,018	37,02

Видно, что величины емкости преобразователя с воздушным заполнением практически не зависят от частоты в рассматриваемом диапазоне. Примем $C_{ц} \approx 37$ ПФ. Используя экспериментальное значение емкости $C_{ц}$ и конструктивные параметры коаксиального электроемкостного преобразователя, из уравнения (1) получим величину относительной диэлектрической проницаемости материала каркаса $\epsilon_x=3,73$, что соответствует справочному значению диэлектрической проницаемости поливинилхлорида [4].

Определив диэлектрическую проницаемость материала цилиндрического каркаса, произведем расчет эквивалентной диэлектрической проницаемости двухслойной заполняющей среды в соответствии с уравнением

$$\frac{1}{\epsilon_{э}} = \frac{1}{\ln \frac{R_3}{R_1}} \left[\frac{1}{\epsilon_{воздуха}} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{\epsilon_n} \ln \frac{R_3}{R_2} \right]. \quad (2)$$

В результате получено $\varepsilon_3=1,04$.

В реальных конструкциях многоэлектродных электроемкостных преобразователей (МЭП) измерительные электроды отделяют от каркаса датчика специальными электродами – экранами. Поэтому одной из задач эксперимента было исследование влияния экранирующих электродов на выходные сигналы МЭП. Эксперименты проводились для двух конфигураций МЭП: с экраном и без экрана.

Экран выполнен из той же медной фольги, большего диаметра. В процессе сбора данных производился опрос различных частей поперечного сечения трубы, измерение емкости между различными парами электродов (см. рис. 1). В полной системе данных электрод *1* сначала выбирают в качестве активного, измеряют емкость между электродами *1* и *2*, *1* и *3*, *1* и *4*. Затем выбирают электрод *2* и измеряют емкости между парами электродов *2* и *3*, *2* и *4*. Этот процесс продолжается до измерения емкости между электродами *3* и *4*. Для *N*-электродной системы число возможных комбинаций для двух электродов (число независимых измерений) определяется выражением

$$n = \frac{N(N-1)}{2}. \quad (3)$$

Для *N*=4 получили 6 независимых измерений. При этих измерениях «пустые» электроды (не выбранные в качестве активного или детектирующего) всегда соединяются с землей, образуют «синхронные кольца» для измерительных электродов. Это позволяет сфокусировать чувствительность измерения на сравнительно узкой площади между парой выбранных электродов. Во втором случае на преобразователь надевается экран, который так же, как и «пустые» электроды, заземляется.

В ходе эксперимента изменялся зазор *h* между электродами с шагом в 1 мм. Экспериментальные данные представлены в виде графиков (рис. 3, 4) для пар электродов: 1-2 – соседних и 1-3 – противоположащих; для остальных пар электродов значения выходных сигналов аналогичны.

В отличие от МЭП первого типа здесь различие между величинами C_{12} и C_{13} достигает больших значений: C_{13} в 2-6 раз меньше C_{12} в зависимости от зазора между электродами. С увеличением зазора *h* очень быстро увеличивается емкость C_{12} между соседними электродами.

Так, с увеличением зазора от 1 до 10 мм C_{12} уменьшается в $2,5 \div 4$ раза без экрана и в $2,6 \div 5$ раз при наличии защитного экрана.

При создании полнопоточных влагомеров нефти важным является вопрос о том, каким образом зависят выходные характеристики электроемкостного преобразователя от его диаметра; при этом следует учитывать, что габаритный диаметр МЭП должен соответствовать внешнему диаметру трубопровода, в который включается влагомер.

Теоретически [1] при определенных конструктивных схемах МЭП (см. рис. 1) и бесконечно малых значениях зазоров между измерительными электродами величины емкостей между отдельными парами электродов не зависят от диаметра или габаритных размеров поперечного сечения преобразователя. В случае практической реализации МЭП с подобными выходными характеристиками основные параметры аппаратных и программных средств будут инвариантны к диаметру трубопровода, в который включается прибор, что позволяет унифицировать и упростить аппаратуру контроля.

Для анализа влияния диаметра *d* и зазора *h* между измерительными электродами на выходные сигналы МЭП по полученным экспериментальным данным введем следующие функции (4):

$$f_{12}(h,d) = \frac{C_{12}(h,d) - C_{12}(h,40)}{C_{12}(h,40)}; \quad f_{13}(h,d) = \frac{C_{13}(h,d) - C_{13}(h,40)}{C_{13}(h,40)}. \quad (4)$$

Здесь $C_{12}(h,d)$ – емкость между электродами 1 и 2 на преобразователе диаметром d с величиной зазора h между электродами 1 и 2, на преобразователе диаметром $d=40$ мм с величиной зазора h .

Значения функций $C_{12}(h,d)$ и $C_{13}(h,d)$ получены в результате обработки экспериментальных данных.

На рис. 3 и 4 приведены зависимости относительных изменений межэлектродных емкостей МЭП с полуцилиндрическими измерительными электродами от конструктивных параметров h и d .

Анализ функций $f_{12}(h,d)$ и $f_{13}(h,d)$, определяющих зависимости выходных сигналов МЭП от их конструктивных параметров, позволяет оптимизировать конструкции многоэлектродных преобразователей с точки зрения унификации аппаратных средств и программного обеспечения обработки сигналов.

Так, для МЭП с полуцилиндрическими электродами (см. рис. 3-4) при зазоре $h=1,0$ мм емкость C_{12} между противоположащими электродами увеличивается на 5,1% с увеличением диаметра d в 1,25 раза и на 18,5% с увеличением диаметра в 2,75 раза. При зазоре $h=4,0$ мм указанные значения составляют 6,3 и 27,2% соответственно. Емкость C_{13} между торцевыми элементами электродов увеличивается на 22,2% с увеличением диаметра в 1,25 раза при зазоре $h=1,0$ мм и на 115,5% с увеличением диаметра в 2,75 раза при этом же зазоре. При зазоре $h=4,0$ мм эти значения составляют 26,8 и 15% соответственно. Использование защитного экрана в конструкции МЭП приводит к снижению емкостей C_{13} , а величина C_{12} практически не изменяется. Так, величина C_{13} в МЭП с защитным экраном при увеличении диаметра d в 2,75 раза увеличивается на 5% при $h=1$ мм и на 86% при $h=4$ мм. Изменение значений емкостей МЭП в 100÷150% при переходе с одного диаметра трубопровода на другой требует или расширения физического диапазона измерений прибора, что, как правило, приводит к ухудшению метрологических характеристик, или адаптивной надстройки измерительного устройства, что приводит к усложнению аппаратуры.

Полученные экспериментальные данные позволяют также прогнозировать номинальный уровень выходных сигналов МЭП различных диаметров и использовать это при проектировании измерительных блоков аппаратуры.

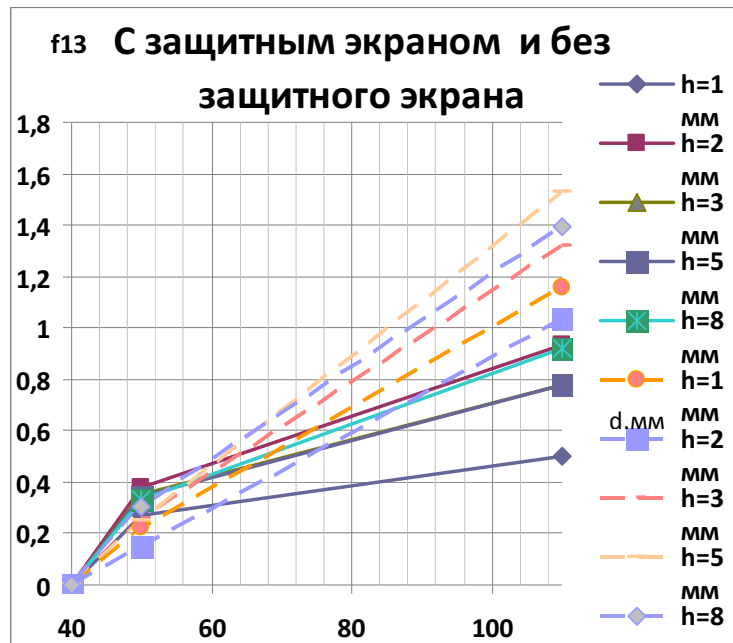
Для отдельного частного случая – емкости C_{12} между электродами в виде полуцилиндров (см. рис. 2) – возможно сравнение полученных экспериментальных данных с известными теоретическими результатами, что безусловно представляет интерес для подтверждения достоверности экспериментальных результатов.

Так, в работе [2] приведено аналитическое выражение для емкости на единицу длины двух коаксиальных незамкнутых оболочек одинакового радиуса

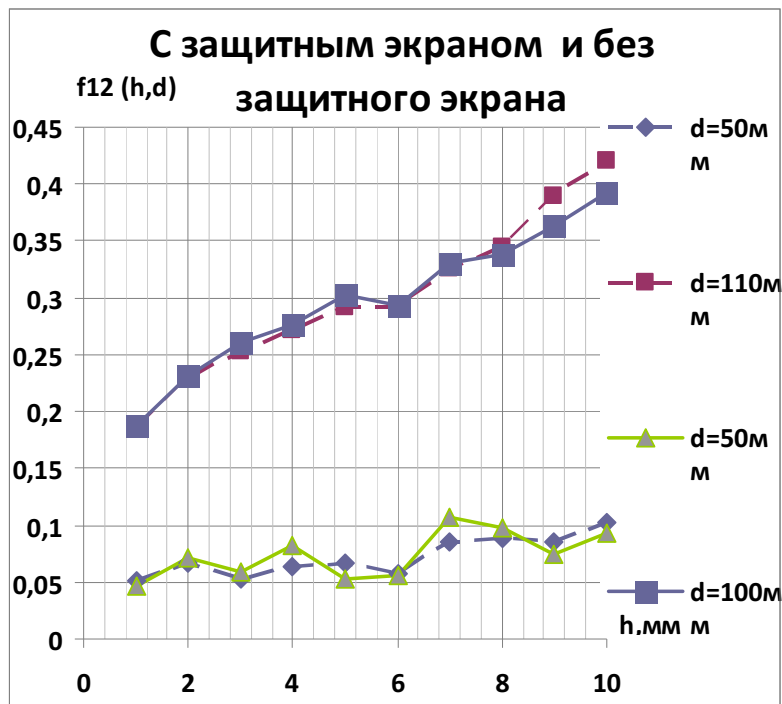
$$\frac{C}{\varepsilon_0 \varepsilon l} \approx \frac{K'(k)}{K(k)}, \quad (5)$$

где K и K' – полные эллиптические интегралы первого рода с модулями k и $K' = \sqrt{1-k^2}$ соответственно, $K = \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2}$; l – длина электродов конденсатора; h – величина зазора между электродами по дуге.

Величины h , R и φ связаны соотношением $\varphi = \frac{h}{2R}$.



Р и с. 3. Относительные изменения межэлектродных емкостей МЭП с полуцилиндрическими измерительными электродами в функции конструктивных параметров: - - без защитного экрана; – с защитным экраном



Р и с. 4. Относительные изменения межэлектродных емкостей МЭП с полуцилиндрическими измерительными электродами в функции конструктивных параметров: - - без защитного экрана; – с защитным экраном

При условии $\varphi < \frac{\pi}{10}$ формула (5) приближенно представляется в виде

$$\frac{C}{\varepsilon_0 \varepsilon l} \approx \frac{4}{\pi} \ln \frac{4}{\varphi}; \quad \varphi < \frac{\pi}{10}. \quad (6)$$

Из уравнений (5) и (6) следует, что емкость между двумя цилиндрическими коаксиальными оболочками одинакового радиуса определяется безразмерным параметром h/R , где h – длина зазора между электродами по дуге. Это дает дополнительные возможности регулирования емкостей между противоположащими электродами МЭП первого типа.

Таблица 2

Соотношения h/R

$\frac{h}{R} = 0,04 \div 0,054$	$C_{13},$ ПФ	$\frac{h}{R} = 0,145 \div 0,16$	$C_{13},$ ПФ	$\frac{h}{R} = 0,182 \div 0,2$	$C_{13},$ ПФ
$\frac{h}{R} = \frac{1}{20} = 0,05$	2,30	$\frac{h}{R} = \frac{3}{20} = 0,150$	1,83	$\frac{h}{R} = \frac{4}{20} = 0,20$	1,72
$\frac{h}{R} = \frac{1}{25} = 0,04$	2,43	$\frac{h}{R} = \frac{4}{25} = 0,160$	1,91	$\frac{h}{R} = \frac{5}{25} = 0,20$	1,9
$\frac{h}{R} = \frac{3}{55} = 0,054$	2,29	$\frac{h}{R} = \frac{8}{55} = 0,145$	1,90	$\frac{h}{R} = \frac{10}{55} = 0,182$	1,64

Для сравнения полученных экспериментальных данных для МЭП первого типа без защитного экрана с известными теоретическими данными [2] были рассчитаны по формуле (4) значения емкостей для трех значений радиуса – 20, 25 и 55 мм, с зазорами между электродами от 1 до 10 мм с шагом 1 мм. Экспериментальные значения емкостей C_{12} нормировались к длине электродов преобразователя и рассчитанной по формуле (2) эквивалентной диэлектрической проницаемости среды, заполняющей преобразователь.

Нормированные значения межэлектродных емкостей, полученные экспериментально $\frac{C_{12}^{\exists}}{\varepsilon_0 \varepsilon_{\exists} l}$ и теоретически $\frac{C_{12}^P}{\varepsilon_0 \varepsilon l}$, сведены в табл. 3.

Таблица 3

Теоретические и приведенные расчетные данные

h, мм	d=40 мм		d=50 мм		d=110 мм	
	$\frac{C_{12}^P}{\varepsilon_0 \varepsilon l}$	$\frac{C_{12}^{\exists}}{\varepsilon_0 \varepsilon_{\exists} l}$	$\frac{C_{12}^P}{\varepsilon_0 \varepsilon l}$	$\frac{C_{12}^{\exists}}{\varepsilon_0 \varepsilon_{\exists} l}$	$\frac{C_{12}^P}{\varepsilon_0 \varepsilon l}$	$\frac{C_{12}^{\exists}}{\varepsilon_0 \varepsilon_{\exists} l}$
1	6,46	6,44	6,75	6,77	7,75	7,63
2	5,58	5,61	5,86	5,98	6,87	6,89
3	5,06	5,06	5,35	5,33	6,35	6,34
4	4,70	4,65	4,98	4,95	5,98	5,92
5	4,41	4,40	4,70	4,70	5,70	5,69
6	4,18	4,18	4,46	4,41	5,47	5,40
7	3,98	3,95	4,27	4,30	5,27	5,24
8	3,81	3,77	4,10	4,10	5,10	5,06
9	3,66	3,58	3,95	3,88	4,95	4,97
10	3,53	3,44	3,81	3,79	4,82	4,89

Хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных подтверждает достоверность полученных результатов.

Полученные в результате физического моделирования данные позволяют обоснованно подойти к выбору основных конструктивных параметров МЭП при проектировании полнопоточных влагомеров нефти, предназначенных для работы в трубопроводных системах с различным диаметром труб, обеспечить при этом инвариантность аппаратной реализации средств контроля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Стеблев Ю.И., Нefeldова Е.С.* Анализ конструктивных схем электроемкостных преобразователей поточных влагомеров нефти // Вестник Самарского гос. техн. ун-та, секция Техническая наука, 2007. – №1(19). – С. 107-115.
2. *Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струйский М.Г.* Расчет электрической емкости. – Ленинград: Энергоиздат, 1981. – 288 с.
3. *Ахобадзе Г.Н.* Принцип измерения влагосодержания в нефтепотоке на основе двух разных по характеру измерения сигналов // Приборы и системы, управление, контроль, диагностика. – М., 2004. – №2. – С. 38-41.
4. *Сагшин Б.И.* Электрические свойства полимеров. – Л.: Химия, 1970. – 357 с.

Статья поступила в редакцию 24 марта 2010 г.

UDC 621.382.8

OPTIMIZATION OF STRUCTURAL PARAMETERS OF MULTIELECTRODE ELECTRO-CAPACITY TRANSFORMERS OF VLAGOMEROV OF OIL

U.I. Steblev, E.S. Nefeldova

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The method of physical modeling of multielectrode electro-capacity converters of multi-flow oil hydrometers is given. Experimental data that allow to optimize the choice of basic structural parameters of converters in various pipeline calibers is obtained.

Keywords: *multielectrode an electro-capacity transformer, optimization, transformer, sensor, kompleksirovanie, capacity, structural gap, vlagomer, oil, design.*

*Uriy I. Steblev – Doctor of Technical Sciences, Professor.
Ekaterina S. Nefeldova – Assistant.*