



УДК 621.317.7.087.92  
ГРНТИ 59.29.71

## МЕТОДЫ РАСЧЕТА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЛОЯ ДЛЯ ЕМКОСТНЫХ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ ОПАСНЫХ ПРИМЕСЕЙ В ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

*И.Н. НАЗАРЕНКО, кандидат химических наук, доцент  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
А.В. ХОРВАТ  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
С.В. БОРОДКИН  
Войсковая часть 75385 (г. Мончегорск)*

Изучено изменение емкости накладного измерительного конденсатора с электродами гребенчатой формы в зависимости от толщины многослойной системы полиэтилен – воздух в представлении псевдооднородных слоев. Проведено сравнение с расчетными значениями, найденными путем решения задачи Дирихле для уравнения Лапласа и методом конформных отображений для однородного слоя. Показано, что хорошее соответствие экспериментальных и теоретических значений для данной слоистой системы имеет место в случае использования формулы, полученной решением уравнения Лапласа.

*Ключевые слова:* накладной конденсатор; емкость; периодически чередующиеся электроды; измерение малых толщин; задача Дирихле; конформные отображения; расчетные формулы.

### DIELECTRIC LAYER CALCULATION METHODS FOR CAPACITIVE SYSTEMS OF DETECTING DANGEROUS IMPURITIES IN AIR CONDENSING UNITS

*I.N. NAZARENKO, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor  
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)  
A.V. KHORVAT  
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)  
S.V. BORODKIN  
military unit 75385 (Monchegorsk)*

The change of the capacitance of the overhead measuring capacitor with the electrodes of the comb shape depending on the thickness of the multilayer polyethylene – air system in the representation of pseudo-homogeneous layers is studied. A comparison with the calculated values found by solving the Dirichlet problem for the Laplace equation and the conformal mapping method for a homogeneous layer is carried out. It is shown that a good correspondence of experimental and theoretical values for a given layered system takes place in the case of the use of the formula obtained by the solution of the Laplace equation.

*Keywords:* overhead capacitor; capacity; periodically alternating electrodes; measurement of small thicknesses; the Dirichlet problem; conformal mappings; calculated formulas.



**Введение.** Ранее было показана возможность применения накладных измерительных конденсаторов (НИК) гребенчатой конфигурации для идентификации осадков, которые могут появиться в процессе криогенного разделения воздуха внутри установок военного назначения [1, 2]. Так же была получена общая формула для расчета емкости трехслойной системы:

- подложка конечной толщины  $H$ , экранированная снизу;
- слой конечной толщины  $h$ ;
- полубесконечная среда.

$$C(h, H) = \frac{16\varepsilon_0 S}{a\pi^3} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)^3} \left\{ \varepsilon_1 \frac{\tilde{\omega}_k + 1}{\tilde{\omega}_k - 1} + \varepsilon_2 \frac{\omega_k - q}{\omega_k + q} \right\}, \quad (1)$$

$$\omega_k = e^{2(2k+1)\pi \frac{h}{a}}, \quad \tilde{\omega}_k = e^{2(2k+1)\pi \frac{H}{a}}, \quad q = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_2 + \varepsilon_3},$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – диэлектрические проницаемости подложки, слоя и окружающей среды;  $S$  – площадь НИК;  $a$  – сумма ширины одной ламели и ширины зазора между ламелями (полупериод решетки из ламелей).

На практике можно ограничиться только первым членом этого ряда. Более того, интерес обычно представляет не общая емкость НИК, а часть ее, обусловленная наличием диэлектрического слоя между накладным конденсатором и средой, в которой он находится. Эта добавочная емкость  $\Delta C$  определяется выражением, аналогичным полученным ранее в [3, 4]:

$$\Delta C = \frac{16\varepsilon_0 S}{a\pi^3} \left[ \varepsilon_2 \frac{\exp\left(\frac{2\pi h}{a}\right) - q}{\exp\left(\frac{2\pi h}{a}\right) + q} - \varepsilon_3 \right], \quad (2)$$

Рассмотренные расчетные формулы получены путем решения обобщенной задачи Дирихле с особенностями для уравнения Лапласа. В тоже время, расчет НИК обычно производится с использованием метода конформных отображений [5–8]. Применение метода конформных отображений для расчета электрических характеристик компланарных структур (накладные конденсаторы, полосковые линии и т.п.) базируется на преобразовании геометрии изучаемого объекта к геометрии плоского конденсатора. В случае однородных изотропных сред, имеющих достаточно большую протяженность (такую, что бы их можно было считать полубесконечными) метод конформных отображений относительно несложен в применении и не требует никаких дополнительных допущений. Для сред, имеющих слоистую структуру (с четко выраженными границами между слоями) метод конформных отображений может быть использован в предположении правомерности применимости метода частичных емкостей [9, 10].

В данной работе будут рассмотрены часто используемые на практике модели Ву и Геворгияна. Так же будет проведено сравнение результатов расчета с таковыми, полученными из решения обобщенной задачи Дирихле, а так же экспериментальными данными.

**Модель Ву (Wu), приближенный расчет.** Метод конформных отображений был впервые применен для расчета емкости слоя конечной толщины на гребенчатом конденсаторе группой под руководством Ву [11]. В модели Ву НИК представляется как суперпозиция элементарных периодических секций, одна из которых показана на ри-



сунке 1 пунктиром. На рисунке приведена схема гребенчатого конденсатора, состоящего из  $N$  ламелей. Все ламели имеют одинаковую ширину  $W$ , зазор между ними равен  $G$ . Длина каждой ламели  $L$ , а расстояние от торца ламели до основания гребенчатого электрода противоположного заряда  $G_{end}$ . Ширина основания каждого из электродов  $W_T$ .

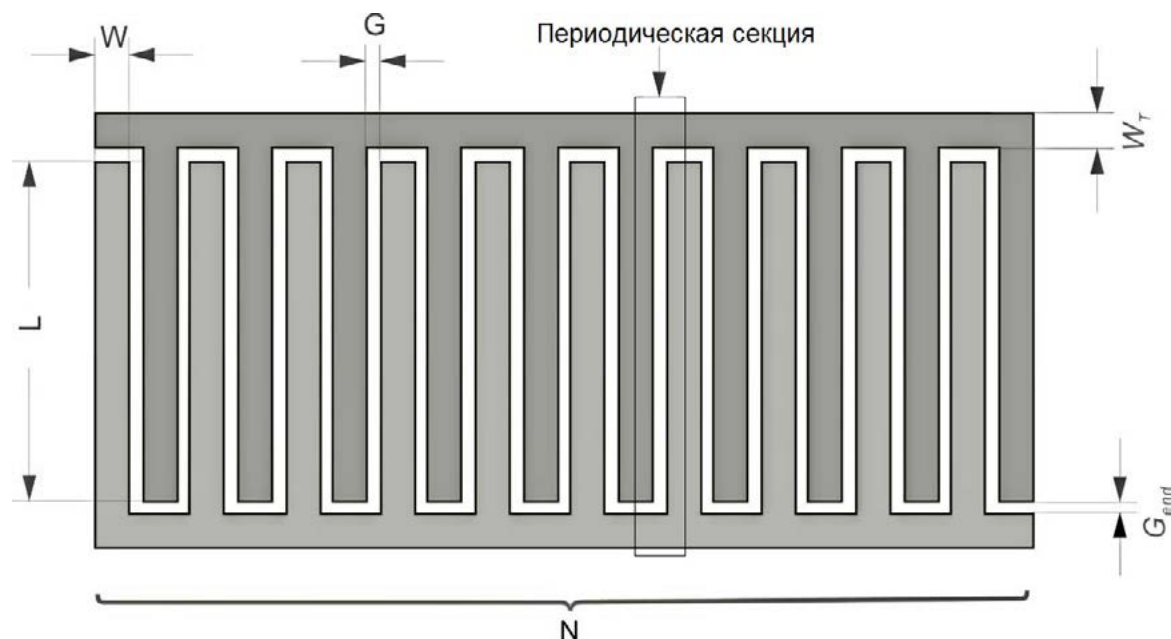


Рисунок 1 – Схема гребенчатого конденсатора, модель Ву

Общая емкость  $C$  в этой модели определяется через емкости  $N$  периодических секций  $C_{per}$  как

$$C = (N-1)C_{per}. \quad (3)$$

Емкость секции в случае  $n$  сред с диэлектрическими проницаемостями  $\epsilon_i$  в одном из полупространств определяется как сумма

$$C_{per} = L\epsilon_0\epsilon_{air} \frac{K(k_0)}{K(k'_0)} + \sum_{i=1}^n L\epsilon_0(\epsilon_i - \epsilon_{i-1}) \frac{K(k_i)}{K(k'_i)}, \quad (4)$$

где  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная  $8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $K(k)$  и  $K(k')$  – полные эллиптические интегралы первого рода от модуля  $k$  и дополнительного модуля  $k'$ , определяемого выражением:

$$k'_i = \sqrt{1 - k_i^2}. \quad (5)$$

Первый член суммы (4) определяет вклад в емкость окружающего пространства (например, воздуха). Один слой создает добавочную емкость

$$\Delta C = (N-1)L\epsilon_0(\epsilon_1 - 1) \frac{K(k_1)}{K(k'_1)}. \quad (6)$$



Как правило, полные эллиптические интегралы не рассчитывают по отдельности, а используют известную аппроксимацию Гилберга [12]:

$$\frac{K(k)}{K(k')} \approx \begin{cases} \frac{\pi/2}{2 \ln \left( 2 \sqrt{\frac{1-k'}{1+k'}} \right)}, \text{ для } k = \left[ 0, \frac{1}{\sqrt{2}} \right] \\ \frac{2}{\pi} \ln \left( 2 \sqrt{\frac{1-k}{1+k}} \right), \text{ для } k = \left[ \frac{1}{\sqrt{2}}, 1 \right] \\ 1, \text{ для } k = \frac{1}{\sqrt{2}}. \end{cases} \quad (7)$$

Относительная погрешность расчета не превышает 0,3% во всем интервале возможных значений  $k = [0,1]$ .

Применяются два последовательных преобразования. Первое – для перевода реальных координат электродов из плоскости  $Z$  в плоскость  $T$ , удобную для трансформации Шварца – Кристофеля [5, 6]. В случае слоев конечной толщины это довольно сложное преобразование с использованием эллиптических функций. В случае относительно тонких слоев, когда толщина слоя  $h < 0,1(W + G)$  для первого преобразования можно использовать более простые гиперболические функции [13], в данном случае это гиперболический синус:

$$t = \operatorname{sh} \left( \frac{\pi z}{2h_i} \right). \quad (8)$$

После трансформации Шварца–Кристофеля можно определить модули эллиптических интегралов  $k_i$ :

$$k_i = \frac{\operatorname{sh} \left( \frac{\pi \frac{W}{2}}{2h_i} \right)}{\operatorname{sh} \left( \frac{\pi \left( \frac{W}{2} + G \right)}{2h_i} \right)} \sqrt{\frac{\operatorname{sh}^2 \left( \frac{\pi \left( \frac{W}{2} + G + W \right)}{2h_i} \right) - \operatorname{sh}^2 \left( \frac{\pi \left( \frac{W}{2} + G \right)}{2h_i} \right)}{\operatorname{sh}^2 \left( \frac{\pi \left( \frac{W}{2} + G + W \right)}{2h_i} \right) - \operatorname{sh}^2 \left( \frac{\pi \left( \frac{W}{2} \right)}{2h_i} \right)}}. \quad (9)$$

Для полубесконечной среды ( $h \rightarrow \infty$ ) модуль  $k_0$  в формуле (4):

$$k_0 = \frac{W}{W + 2G} \sqrt{\frac{2W}{2W + G}}. \quad (10)$$



**Модель Ву (Wu), точный расчет.** Как отмечалось выше, для отображения  $Z \rightarrow T$  на первом этапе наиболее корректно применять функции Якоби [14], а именно эллиптический синус (синус амплитуды):

$$t = \operatorname{sn}^2\left(u \frac{z}{a}, r\right), \quad (11)$$

где  $a = W + G$ ,  $q = \exp\left(-\pi \frac{h}{a}\right)$ ,  $r = 4\sqrt{q} \prod_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1+q^{2n}}{1+q^{2n-1}}\right)^4$ ,  $u = \frac{\pi}{2} + 2\pi \sum_{s=1}^{\infty} \frac{q^s}{1+q^s}$ .

Добавочная емкость  $\Delta C$ , которую создает слой диэлектрика на поверхности НИК, находится по уравнению (6), а модули эллиптических интегралов для первого слоя рассчитывают следующим образом:

$$k_1 = \frac{\operatorname{sn}\left(u \frac{W}{2a}, r\right)}{\operatorname{sn}\left(u \frac{2S+W}{2a}, r\right)} \sqrt{\frac{1 - \operatorname{sn}^2\left(u \frac{2S+W}{2a}, r\right)}{1 - \operatorname{sn}^2\left(u \frac{W}{2a}, r\right)}}, \quad k_1' = \sqrt{1 - k_1^2}. \quad (12)$$

**Модель Геворгяна (Gevorgian).** В модели Ву электроды считаются бесконечными по протяженности и система из чередующихся ламелей так же не ограничена в пространстве. Из такой структуры «вырезается» сегмент, имеющий геометрические размеры НИК. Другими словами, модель Ву не учитывает никаких краевых эффектов, связанных с конечностью элементов накладного конденсатора. Дальнейшим развитием модели Ву стала модель Геворгяна [15], суть которой представлена на рисунке 2.

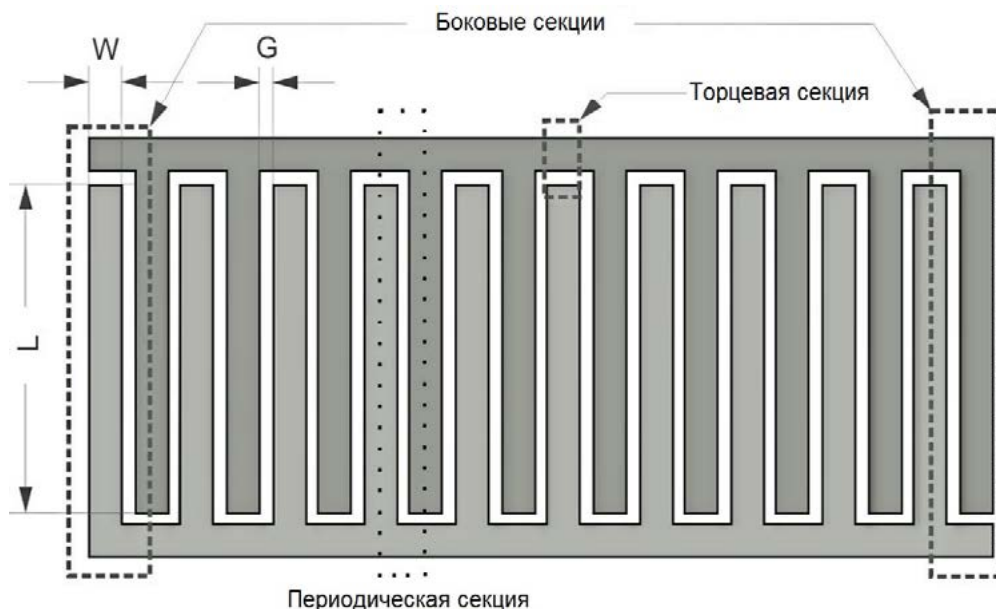


Рисунок 2 – Схема гребенчатого конденсатора, модель Геворгяна

Общая емкость в этой модели находится как сумма емкостей периодических ( $C_{\text{per}}$ ), боковых ( $C_{\text{lat}}$ ) и торцевых ( $C_{\text{end}}$ ) секций:



$$C = (N - 3)C_{per} + C_{lat} + C_{end}. \quad (13)$$

Три слагаемых в (13) определяются следующим образом:

$$C_{per} = \varepsilon_0 L \left( \frac{K(k_0)}{K(k'_0)} + (\varepsilon_n - 1) \frac{K(k_n)}{K(k'_n)} + \sum_{i=1}^{n-1} (\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}) \frac{K(k_i)}{K(k'_i)} \right), \quad (14)$$

$$C_{lat} = 4\varepsilon_0 L \left( \frac{K(k_{0,lat})}{K(k'_{0,lat})} + (\varepsilon_n - 1) \frac{K(k_{n,lat})}{K(k'_{n,lat})} + \sum_{i=1}^{n-1} (\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}) \frac{K(k_{i,lat})}{K(k'_{i,lat})} \right), \quad (15)$$

$$C_{end} = 2NW(2 + \pi)\varepsilon_0 L \left( \frac{K(k_{0,end})}{K(k'_{0,end})} + (\varepsilon_n - 1) \frac{K(k_{n,end})}{K(k'_{n,end})} + \sum_{i=1}^{n-1} (\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}) \frac{K(k_{i,end})}{K(k'_{i,end})} \right). \quad (16)$$

Для полубесконечной среды выражения (14) – (16) переходят в

$$C_{per} = \varepsilon_0 \varepsilon_{air} L \frac{K(k_0)}{K(k'_0)}, \quad (17)$$

$$C_{lat} = 4\varepsilon_0 \varepsilon_{air} L \frac{K(k_{0,lat})}{K(k'_{0,lat})}, \quad (18)$$

$$C_{end} = 2NW(2 + \pi)\varepsilon_0 L \frac{K(k_{0,end})}{K(k'_{0,end})}. \quad (19)$$

Как и в модели Ву, в случае тонких слоев для первого преобразования вместо эллиптического синуса можно использовать гиперболические функции, например гиперболический косинус:

$$t = \operatorname{ch} \left( \frac{\pi z}{2h_i} \right). \quad (20)$$

После трансформации Шварца – Кристоффеля можно определить модули эллиптических интегралов [13]:



$$k_i = \frac{\operatorname{sh} \left( \frac{\pi W}{2h_i} \right)}{\operatorname{sh} \left( \frac{\pi(W+G)}{2h_i} \right)} \sqrt{\frac{\operatorname{ch}^2 \left( \frac{\pi(W+G)}{2h_i} \right) + \operatorname{sh}^2 \left( \frac{\pi(W+G)}{2h_i} \right)}{\operatorname{ch}^2 \left( \frac{\pi W}{2h_i} \right) + \operatorname{sh}^2 \left( \frac{\pi(W+G)}{2h_i} \right)}}, \quad (21)$$

$$k_{i,lat} = \frac{\operatorname{sh} \left( \frac{\pi W}{2h_i} \right)}{\operatorname{sh} \left( \frac{\pi(W+G)}{2h_i} \right)} \sqrt{\frac{1 - \operatorname{sh}^2 \left( \frac{\pi(W+G)}{2h_i} \right) / \operatorname{sh}^2 \left( \frac{\pi(W+W_T+G)}{2h_i} \right)}{1 - \operatorname{sh}^2 \left( \frac{\pi W}{2h_i} \right) / \operatorname{sh}^2 \left( \frac{\pi(W+W_T+G)}{2h_i} \right)}}, \quad (22)$$

$$k_{i,end} = \frac{\operatorname{sh} \left( \frac{\pi W}{2h_i} \right)}{\operatorname{sh} \left( \frac{\pi(W+G)}{2h_i} \right)} \sqrt{\frac{1 - \operatorname{sh}^2 \left( \frac{\pi(W+G)}{2h_i} \right) / \operatorname{sh}^2 \left( \frac{\pi(3W+G)}{2h_i} \right)}{1 - \operatorname{sh}^2 \left( \frac{\pi W}{2h_i} \right) / \operatorname{sh}^2 \left( \frac{\pi(3W+G)}{2h_i} \right)}}. \quad (23)$$

Для полубесконечной среды ( $h \rightarrow \infty$ ) модули определяются как:

$$k_0 = \frac{W}{W+2G}; \quad (24)$$

$$k_{0,lat} = \frac{W}{W+2G} \sqrt{\frac{1 - \left( \frac{W+2G}{W+2W_T+2G} \right)^2}{1 - \left( \frac{W}{W+2W_T+2G} \right)^2}}; \quad (25)$$

$$k_{0,end} = \frac{W}{W+2G} \sqrt{\frac{1 - \left( \frac{W+2G}{3W+2G} \right)^2}{1 - \left( \frac{W}{3W+2G} \right)^2}}. \quad (26)$$



**Экспериментальная часть.** Общий вид экспериментальной установки изображен на рисунке 3. Для измерения емкости объектов, состоящих из нескольких однородных слоев (5) использовался накладной Ш-образный конденсатор (1), с ламелями из медной фольги, находящимися на подложке из трехслойного стеклотекстолита FR4, толщиной 10 мм. На обратной стороне конденсатора был наклеен экран из алюминиевой фольги. Конденсатор подключался к одному из каналов четырехканальной платы измерения емкости TI FDC 2214evm [16], закрепленном в держателе (2) и работающем на частоте 3,3 МГц. Сигналы от датчиков передавались по кабелю microUSB-USB (4) на компьютер и проходили обработку программным обеспечением от вендора.

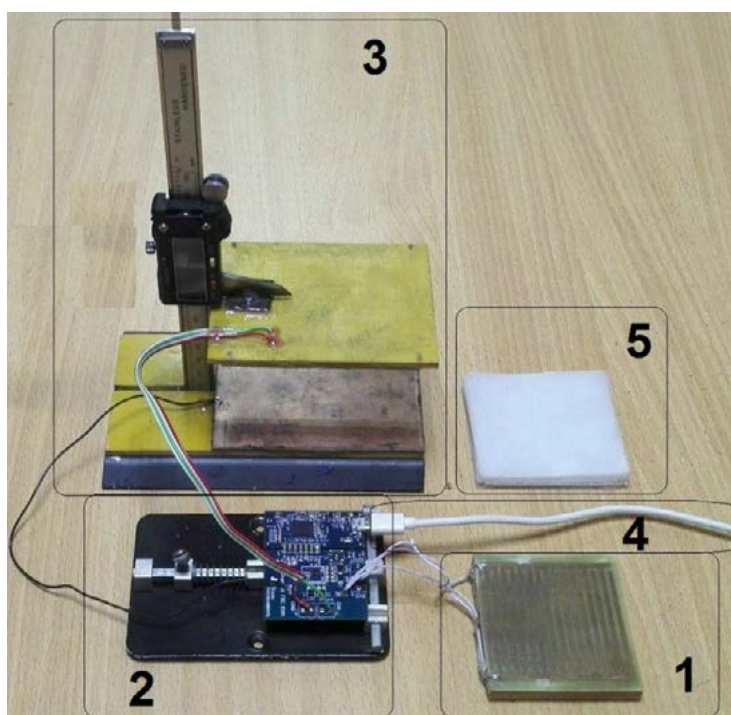


Рисунок 3 – Экспериментальная установка для определения емкости и диэлектрической проницаемости

К двум другим каналам платы 2214evm был подключен модуль для определения диэлектрической проницаемости (3). В соответствии с рекомендациями [17], была применена трехэлектродная схема подключения, в которой применяются потенциальный, измерительный и охранный электроды. Модуль состоит из плоскопараллельных пластин фольгированного стеклотекстолита (108x82 мм), сопряженных с электронным микрометром. Нижняя пластина (потенциальный электрод) прикреплена к станине штатива, а верхняя - к подвижной части электронного микрометра (цена деления 10 мкм, абсолютная погрешность измерения не более 30 мкм). В центральной части верхней пластины сделан вырез в фольге квадратной формы шириной 2 мм. Длина стороны внутреннего квадрата (измерительного электрода) 50 мм. Остальная поверхность верхней пластины выполняет роль охранного электрода и имеет потенциал, равный таковому для измерительного электрода.

В качестве объекта для измерений была выбрана пленка полиэтилена (ПЭ) высокого давления, разрезанная на квадратные куски со стороной 70 мм и собранная в стопки, толщиной несколько сантиметров. Стопки имеют чередующуюся структуру .../ПЭ/воздух/ПЭ/воздух/ПЭ/воздух/..., в которой слои двух веществ имеют отличающиеся диэлектрические свойства. Данная система может быть представлена как после-





довательность псевдооднородных слоев, если в качестве «элементарного» слоя (ЭС) рассматривать сигмент /ПЭ/воздух/: .../ЭС/ЭС/ЭС/... Замеры стопки из 83 листов ПЭ микрометром показали, что средняя толщина ЭС составляет 95 мкм.

**Оценка эффективной диэлектрической проницаемости стопки листов ПЭ.** На рисунке 4 показаны результаты замеров емкости плоского конденсатора (модуль 3 на рисунке 3) в зависимости от  $1/h$ , где  $h$  – расстояние между пластинами. Парные замеры емкости для одинаковых значений  $h$  выполнялись в воздушной среде для стопки листов ПЭ (1) и в ее отсутствии (2).

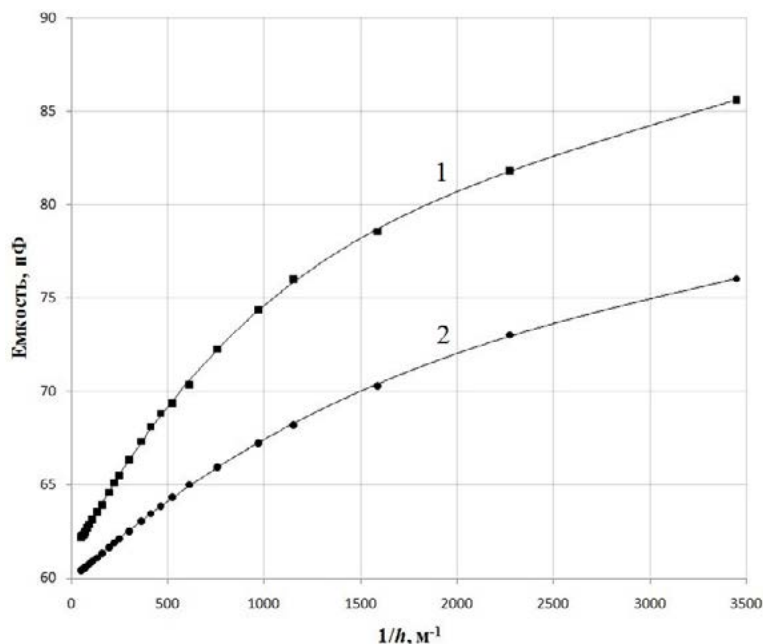


Рисунок 4 – Емкость конденсатора для различных расстояний между электродами

При  $1/h \rightarrow 0$  ( $h \rightarrow \infty$ ) емкость стремится к предельному значению, равному паразитной емкости. Паразитная емкость найдена по значениям емкости, измеренным при наибольших расстояниях между пластинами плоского конденсатора. На рисунке 5 показано, что в данном случае зависимости  $C=f(h)$  являются фактически линейными и величины паразитных емкостей (свободные члены в уравнениях) можно оценить весьма точно. Для первой конфигурации это 60,35 пФ, для второй – 60,01 пФ.

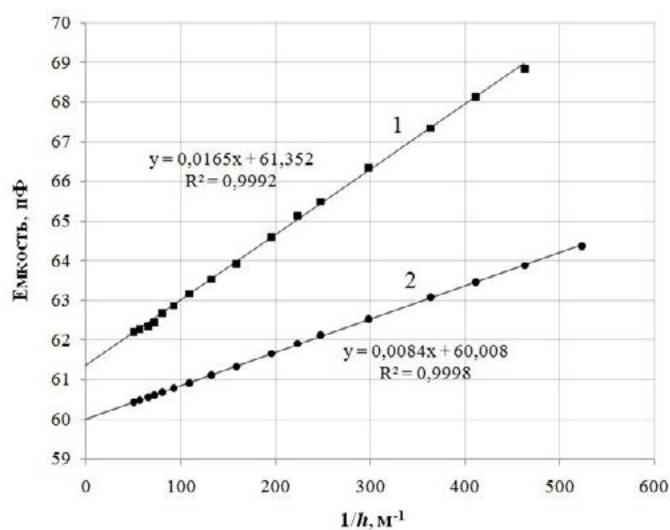


Рисунок 5 – Определение паразитных емкостей.  $R^2$  – коэффициент детерминации



После вычитания паразитных емкостей получаются парные значения  $C_1$  и  $C_2$ , а их отношение по физическому смыслу есть эффективная диэлектрическая проницаемость многослойной среды  $\epsilon_{eff}$ :

$$\epsilon_{eff} = \frac{C_1}{C_2}. \quad (27)$$

На рисунке 6 показаны рассчитанные значения  $\epsilon_{eff}$ .

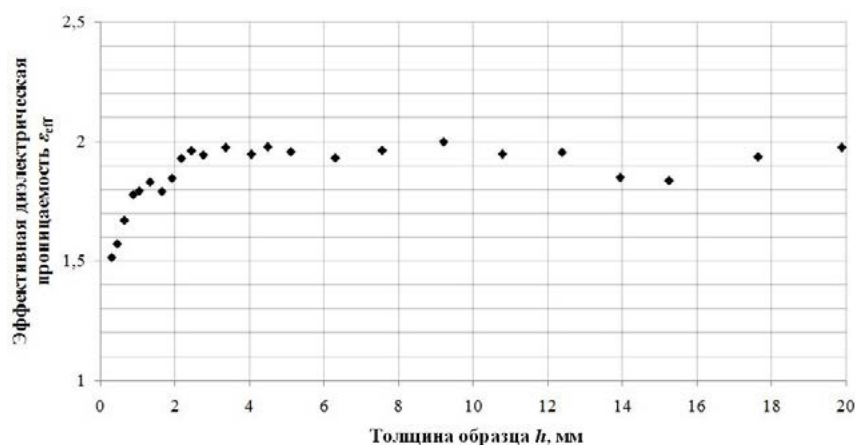


Рисунок 6 – Расчетные значения эффективной диэлектрической проницаемости

Для толщин более 1 мм (~10 и более ЭС)  $\epsilon_{eff} = 1,8 - 2,0$ . Уменьшение количества ЭС в образце приводит к понижению  $\epsilon_{eff}$ , что может быть связано с менее плотным прилеганием слоев полиэтилена друг к другу.

**Емкость накладного измерительного конденсатора как функция толщины многослойной системы ПЭ–воздух.** Основной задачей экспериментальной части работы было изучение характера влияния толщины диэлектрического покрытия на емкость системы НИК – диэлектрик – окружающая среда (воздух) с целью проверки соответствия моделям, рассмотренным выше. В эксперименте использовался накладной измерительный конденсатор (рисунок 3) 60x60 мм состоящий из 16 ламелей, объединенных в две группы (2 электрода). Все ламели имели одинаковую длину  $L = 54$  мм и  $W = G = G_{end} = W_T = 2$  мм (см. рисунок 1).

Предварительно была определена паразитная емкость (без стопы ПЭ). Измерения проводились при последовательном удалении слоев ПЭ из стопы. Из измеренного значения общей емкости вычиталась паразитная емкость, и получалось добавочная емкость  $\Delta C$ , значения которой приведены на рисунке 7 в виде треугольников. На рисунке 7 так же показаны расчетные кривые, полученные по моделям: (1) – Ву, отображающая функция  $sh(x)$ ; (2) – Ву, отображающая функция  $sn^2(x)$ ; (3) – Геворгяна и (4) – решение уравнения Лапласа.

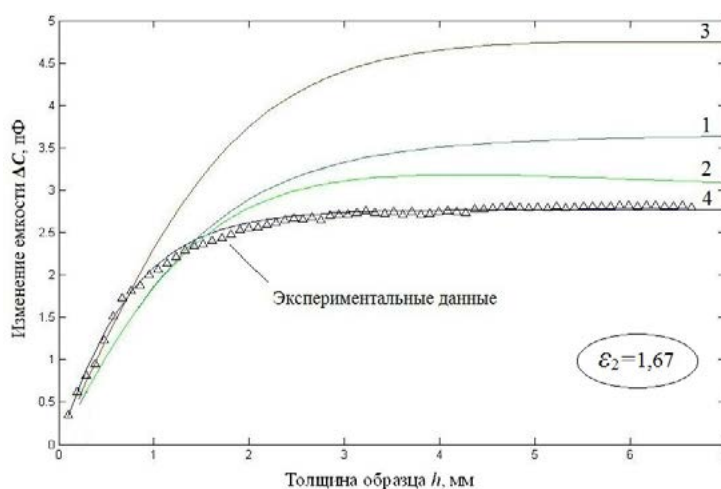


Рисунок 7 – Экспериментальные значения изменения емкости НИК и расчетные кривые

Так как диэлектрическая проницаемость исследуемого образца строго не определена, то значение  $\epsilon_2$  подбиралось эмпирически по принципу наилучшего соответствия модельных расчетов экспериментальным данным. Удовлетворительное соответствие получено только в случае решения задачи Дирихле для уравнения Лапласа при  $\epsilon_2 = 1,67$ . Ни одна из моделей, основанных на методе конформных отображений (в рамках предположений и допущений, рассмотренных выше) не дала похожего результата. В качестве примера на рисунке 8 показана попытка установить соответствие между экспериментальными данными и расчетом по модели Геворгяна. Критерием выбора подходящего значения  $\epsilon_2$  являлось совпадение «хвостов» кривых в области псевдостабильности емкости при  $h \geq (W + G) = 4$  мм. Хорошо видно, что значения  $\Delta C$ , найденные опытным путем существенно отличаются от расчетных. При этом диэлектрическая проницаемость исследуемой среды должна быть аномально малой ( $\epsilon_2 = 1,37$ ).

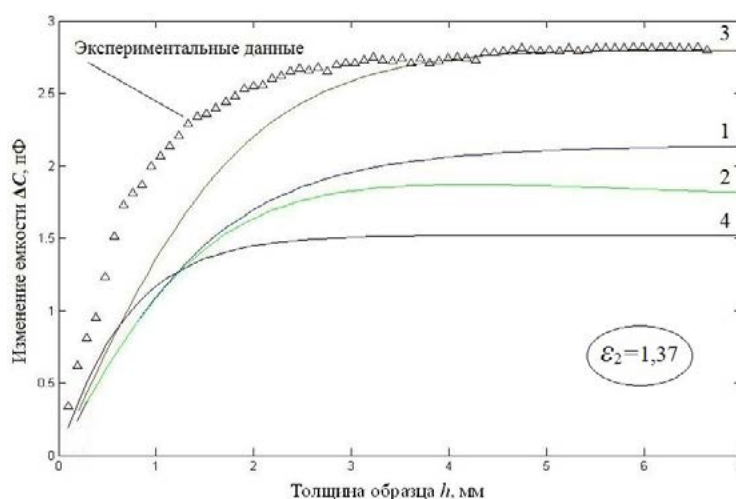


Рисунок 8 – То же, что на рисунке 7. Сравнение расчета по Геворгяну с экспериментом.

**Обсуждение и выводы.** Все рассмотренные модели и подходы к решению задачи обнаружения осадка на поверхности плоского емкостного датчика дают сходные зависимости изменения емкости от толщины. Это кривые, на которых можно условно выделить три участка:

- 1) относительно быстрого изменения  $\Delta C$ , близкого к линейному;
- 2) переходный участок;
- 3) почти не изменяющейся (квазистационарной) емкости.



Для решений с использованием конформных отображений эти участки находятся на интервалах (по толщине слоя):

- 1) от 0 до  $(W+G)/4$ ;
- 2) от  $(W+G)/4$  до  $(W+G)/2$ ;
- 3)  $h \geq (W+G)$ .

При решении задачи Дирихле условные границы между участками закономерно сдвигаются в область меньших толщин:  $(W+G)/4 \rightarrow (W+G)/8$  и  $(W+G)/2 \rightarrow (W+G)/4$ .

Главным допущением, которое было сделано при сравнении экспериментальных данных и теоретических расчетов, является то что слоистая стопа листового полиэтилена рассматривалась как гомогенная среда. Правомерность такого подхода не всегда очевидна и применимость тех или иных моделей должна быть установлена опытным путем. Что и было сделано в настоящей работе. То, что характер хода кривой  $\Delta C = f(h)$  в данном случае соответствует решению уравнения Лапласа не является прямым доказательством, что для других слоистых структур будет наблюдаться то же самое.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хорват А.В., Иванов А.В., Назаренко И.Н. Модель емкостного датчика системы мониторинга воздухоразделительных установок // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 10-2. С. 248–252.
2. Хорват А.В. Определение емкостных характеристик гребенчатого конденсатора для анализа толщины диэлектрического покрытия // Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки. Тамбов, 2017. Т. 22. Вып. 1. С. 69–74.
3. Измерение твердых осадков в оживенных газах / И.Ф. Григорьев и др. // Приборы и системы управления. 1975. № 8. С. 28–29.
4. Курбатов В.М., Пресняков Ю.П. Емкость конденсатора с электродами гребенчатой формы // Электричество. 1975. № 6. С. 84–86.
5. Фильчаков П.Ф. Приближенные методы конформных отображений. Киев: Наукова думка, 1964. 531 с.
6. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. М.: Наука, 1987. 688 с.
7. Матис И.Г. Емкостные преобразователи для неразрушающего контроля. Рига: Зинатне, 1982. 302 с.
8. Джежора А.А. Емкостные преобразователи и методы их расчета. Минск: РУП Издательский дом «Белорусская наука», 2008. 305 с.
9. Кочанов Э.С. Паразитные емкости в печатном монтаже радиоаппаратуры // Радиотехника. 1967. Т. 22. Вып. 7. С. 82–85.
10. Делинин А.Н. К вопросу о погрешности метода частичных емкостей // ЖТФ. 1999. Т.69. Вып. 4. С. 8–13.
11. Voltage tunable capacitors using high temperature superconductors and ferroelectrics / H. D. Wu et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1994. V. 4. № 3. P. 156–160.
12. Hilberg W. From approximation to exact relations for characteristic impedans // IEEE on Microwave and Techniques. 1969. V.17. № 5. P. 259–264.
13. Mak K.W., Hao J. Advance in the analysis models for characterizing multi-layered interdigital capacitors // Int. J. of Adv. Applied Physics Research. 2014. № 1. P. 1–8.
14. Chen T.K., Huff G.H. Analytical investigation of periodic coplanar waveguides // Progress In Electromagnetics Research M. 2013. V. 30. P. 167–181.



15. Gevorgian S.S., Martinsson T., Linner P.L.J., Kollberg E. L. CAD models for multi-layered substrate interdigital capacitors // IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques. 1996. V. 44. № 6. P. 896–904.
16. FDC2214 with two capacitive sensors evaluation module [Электронный ресурс] URL: <http://ti.com/tool/FDC2214EVM> (дата обращения 30.01.2018).
17. ГОСТ 22372-77. Материалы диэлектрические. Методы определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот от 100 до  $5 \times 10^6$  в ст. 6 Гц. М.: Изд-во стандартов, 1977. 20 с.

#### REFERENCES

1. Horvat A.V., Ivanov A.V., Nazarenko I.N. Model' ehlektroemkostnogo datchika siste-my monitoringa vozduhorazdelitel'nyh ustanovok // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2016. № 10-2. S. 248–252.
2. Horvat A.V. Opredelenie emkostnyh karakteristik grebenchatogo kondensatora dlya analiza tolshchiny dielektricheskogo pokrytiya // Vestnik Tambovskogo universiteta. Ser. Estestvennye i tekhnicheskie nauki. Tambov, 2017. T. 22. Vyp. 1. S. 69–74.
3. Izmerenie tverdyh osadkov v ozhizhennyh gazah / I.F. Grigor'ev i dr. // Pribory i sistemy upravleniya. 1975. № 8. S. 28–29.
4. Kurbatov V.M., Presnyakov YU.P. Emkost' kondensatora s ehlektrodami grebenchatoy formy // EHlektrichestvo. 1975. № 6. S. 84–86.
5. Fil'chakov P.F. Priblizhennyye metody konformnyh otobrazhenij. Kiev: Naukova dumka, 1964. 531 s.
6. Lavrent'ev M.A., SHabat B.V. Metody teorii funktsij kompleksnogo peremennogo. M.: Nauka, 1987. 688 s.
7. Matis I.G. Elektroemkostnye preobrazovateli dlya nerazrushayushchego kontrolya. Riga: Zinatne, 1982. 302 s.
8. Dzhzhzhora A.A. Elektroemkostnye preobrazovateli i metody ih rascheta. Minsk: RUP Izdatel'skiy dom «Belorusskaya nauka», 2008. 305 s.
9. Kochanov EH.S. Parazitnye emkosti v pechatnom montazhe radioapparatury // Radiotekh-nika. 1967. T. 22. Vyp. 7. S. 82–85.
10. Deliniv A.N. K voprosu o pogreshnosti metoda chastichnyh emkostej // ZHTF. 1999. T.69. Vyp. 4. S. 8–13.
11. Voltage tunable capacitors using high temperature superconductors and ferroelectrics / H. D. Wu et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1994. V. 4. № 3. P. 156–160.
12. Hilberg W. From approximation to exact relations for characteristic impedans // IEEE on Microwave and Techniques. 1969. V.17. № 5. P. 259–264.
13. Mak K.W., Hao J. Advance in the analysis models for characterizing multi-layered interdigital capacitors // Int. J. of Adv. Applied Physics Research. 2014. № 1. P. 1–8.
14. Chen T.K., Huff G.H. Analytical investigation of periodic coplanar waveguides // Progress In Electromagnetics Research M. 2013. V. 30. P. 167–181.
15. Gevorgian S.S., Martinsson T., Linner P.L.J., Kollberg E. L. CAD models for multi-layered substrate interdigital capacitors // IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques. 1996. V. 44. № 6. P. 896–904.
16. FDC2214 with two capacitive sensors evaluation module [Электронный ресурс] URL: <http://ti.com/tool/FDC2214EVM> (дата обращения 30.01.2018).
17. ГОСТ 22372-77. Материалы диэлектрические. Методы определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот от 100 до  $5 \times 10^6$  в ст. 6 Гц. М.: Изд-во стандартов, 1977. 20 с.



© Назаренко И.Н., Хорват А.В., Бородкин С.В., 2018

Назаренко Игорь Николаевич, кандидат химических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vaiu@mil.ru

Хорват Алексей Владимирович, адъюнкт научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vaiu@mil.ru

Бородкин Станислав Владимирович, начальник группы газового обеспечения, Россия, 184512, г. Мончегорск, в/ч 75385, vaiu@mil.ru