

УДК 532.5:537.08

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТЫ ВРЕМЕНИ РЕЛАКСАЦИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ЗАРЯДА В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЯХ

Адъюнкт **Оразбаев А. Р.** (ген. директор ТОО «SEMSEROrtSondirushi», Казахстан)
Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь
канд. техн. наук **Горовых О. Г.**
Институт переподготовки и повышения квалификации
МЧС Республики Беларусь,
пос. Светлая Роща, Республика Беларусь

В статье рассмотрены понятия: времени релаксации, константы времени релаксации и постоянной времени релаксации статического заряда диэлектрических жидкостей и показано их отличие друг от друга. Приведены методы расчета и используемые в электроизмерительной технике, методы определения постоянной времени релаксации объемного статического заряда. Рассмотрены носители заряда, которые фиксируются в стандартизованных методах определения постоянной времени релаксации и те заряды, которые фактически являются носителями опасных зарядов статического электричества. Описана установка, включающая электростатический измеритель ИПЭП-1, и показано, что фактическое время релаксации объемного статического заряда, образующегося при вертикальном свободном падении струи углеводородной жидкости, многократно превышает время релаксации, рассчитанное по формулам, рекомендованным нормативно-технической документацией.

Для предотвращения трагичных последствий, связанных с разрядом статического электричества, образовавшегося в пожаро-взрывоопасной среде, используют различные системы и способы снижения величины образовавшегося статического заряда. Например, для нейтрализации статического заряда внутри трубопровода, по которому движется углеводородная жидкость, устанавливают нейтрализаторы объёмного заряда, представляющие собой штыри внутри трубопровода; уменьшают скорость заливки топлива при заполнении ёмкости танка, цистерны; вводят специальные добавки в топливо, снижающие его удельное сопротивление [1–3]. Для правильного выбора метода нейтрализации накоп-

ленного заряда статического электричества необходимо иметь информацию об электрических свойствах (характеристиках) углеводородных жидких материалов. Одной из таких характеристик является постоянная времени релаксации статического заряда, образовавшегося в жидкости.

Экспериментальная часть

В различной учебной и нормативной литературе [10, с. 4; 6, с. 5 и др.] понятия времени релаксации и постоянной времени релаксации используют как синонимы, в то время как это принципиально различные понятия.

Определение времени релаксации можно найти в [4, с. 27], где сказано: «промежуток времени, необходимый для того, чтобы заряд, в какой-либо точке (диэлектрика) уменьшился до $1/e$ от своей первоначальной величины, называется временем релаксации» и определяется по формуле:

$$\tau = \frac{\varepsilon}{\sigma}, \quad (1)$$

где τ – время релаксации, с;

ε – диэлектрическая проницаемость жидкости;

σ – удельная проводимость (электропроводность) среды (величина обратная удельному объемному электрическому сопротивлению жидкости), $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

При переводе в определение времени релаксации вкралась ошибка, данное определение в первоисточнике выглядит так: «Thetimerequiredforthechargeatanypointtodecayto $1/e$ ofitsoriginalvalueiscalledtherelaxationtime».[11, стр.15].

Это должно быть переведено не как до величины $1/e=0,3678794412$, а в $1/e$ раз, что говорит о константе перед переменной в экспоненциальной функции.

Известно, что снижение (уменьшение) объемного заряда в диэлектрике протекает по экспоненциальному закону,

$$q = q_{\text{ст}} \cdot e^{-k \cdot \tau}, \quad (2)$$

то можно найти время полураспада создавшегося объемного заряда. Время полураспада будет равно:

$$q_{1/2} = q_{cm} \cdot e^{-k \cdot \tau_{1/2}}, \quad (3)$$

где $q_{1/2}$ – статический заряд, равный половине исходного, Кл;

q_{cm} – исходный статический заряд, Кл;

k – коэффициент пропорциональности, c^{-1} ;

$\tau_{1/2}$ – время полураспада статического заряда, с.

Проделав преобразования, получаем:

$$\frac{q_{1/2}}{q_{cm}} = e^{-k \cdot \tau_{1/2}},$$

$$2 = e^{k \cdot \tau_{1/2}},$$

$$\tau_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} \quad (4)$$

Величину k и надо называть константой времени распада, она будет зависеть только от диэлектрической проницаемости жидкости и удельной проводимости (удельного сопротивления) и не будет зависеть от величины исходного заряда. То есть, в определении, данном в [4, с. 27], говорится о константе времени распада.

Тогда константой времени релаксации k считать величину, равную:

$$k = \sigma / (\epsilon_0 x \epsilon), c^{-1}, \quad (5)$$

где σ – удельная электропроводность жидкости, $Om^{-1} \cdot m^{-1}$.

Постоянная времени релаксации – величина, обратная константе времени релаксации, что совпадает с формулой, данной в [4, с. 27]. То есть в [4] дано понятие постоянной времени релаксации.

Время полураспада заряда также является постоянной величиной, не зависящей от величины исходного статического объемного заряда.

Время релаксации мы предлагаем понимать как время, необходимое для достижения безопасной концентрации объемного или поверхностного заряда в жидкости, рассчитанное с использованием уравнения 6.

Знание постоянной времени релаксации, позволяет определить время релаксации – промежуток времени, за который начальный электростатический заряд будет практически полностью отведен с поверхности или объема вещества и обеспечит безопасную эксплуатацию системы с технологической установкой. Постоянная времени релаксации является параметром, определяющим многие процессы при производстве и использовании диэлектрических жидкостей. К примеру, если необходимо рассчитать предельно допустимое значение плотности заряда, (предельно допустимое значение плотности заряда определяется как плотность заряда в объеме жидкости, при которой вероятность возникновения разряда с энергией, равной 0,25 минимальной энергии зажигания смеси паров этой жидкости с воздухом, не превосходит 10^{-3} [6]), то используют уравнение [7, с. 4, 5]:

$$q_{\text{пр.доп.}} = 9 \cdot 10^{-10} \cdot W_{\text{min}}^{1/4} \cdot e^{-\frac{\varphi}{4}}, \quad (6)$$

где W_{min} – минимальная энергия зажигания среды над поверхностью жидкости, Дж;

φ – безразмерный коэффициент, равный

$$\varphi = -45,01 + \ln \varepsilon \cdot \sqrt[3]{\frac{\sigma_{\text{нат}}}{\tau}}, \quad (7)$$

ε – диэлектрическая проницаемость жидкости;

$\sigma_{\text{нат}}$ – поверхностное натяжение жидкости, кг/см²;

$\tau = \varepsilon_0 \varepsilon R_v$ – постоянная времени релаксации заряда в жидкости, с; (8)

ε_0 – электрическая постоянная, равная $8,854 \cdot 10^{-12}$, Ф/м;

R_v – удельное объемное электрическое сопротивление жидкости, Ом·м.

Информация о постоянной времени релаксации объемного заряда жидкостей используется для решения задач защиты от статического электричества. Поэтому повышение точности определения этого параметра необходимо для более совершенного решения задач безопасности и выбора таких режимов, которые обеспечивают электростатически безопасное ведение технологических процессов.

Известно, что при внесении диэлектрика в электростатическое поле происходит процесс поляризации диэлектрика. Под действием электрического поля связанные заряды могут лишь

немного смещаться из положения равновесия, т. к. не могут покинуть пределы молекул, в состав которых они входят.

Методы, использующиеся для определения времени релаксации жидких диэлектриков, базируются на эффекте электризации диэлектрика в электрическом поле.

Например, в [8] для измерения постоянной времени релаксации объемного заряда в диэлектрических жидкостях используют устройство, в котором исследуемую жидкость помещают в конденсаторную ячейку, к электродам ячейки подключают постоянное напряжение, которое затем отключают, и определяют постоянную времени релаксации по формуле:

$$\tau = \frac{t}{\ln 2}, \quad (9)$$

где t – время полуразряда ячейки после отключения напряжения, с.

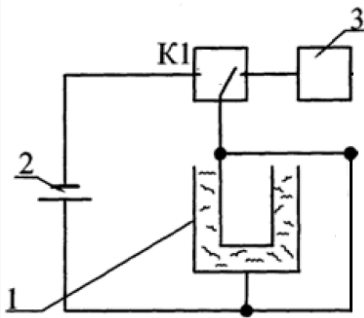


Рис. 1. Устройство для измерения постоянной времени релаксации:
 1 – измерительная ячейка,
 2 – источник постоянного напряжения,
 3 – измеритель постоянной времени спада напряжения.

Время, определенное по методу [8] – это постоянная времени релаксации.

В [5] для определения постоянной времени релаксации объемного заряда диэлектрических жидкостей исследуемую жидкость помещают в двухэлектродную измерительную ячейку, подключают параллельно электродам ячейки дополнительные конденсаторы различной емкости, измеряют постоянные времени спада напряжения между электродами при каждом подключенном конденсаторе, а постоянную времени релаксации объемного заряда жидкости определяют по формуле:

$$\tau = \frac{\tau_1 \cdot C_1 - \tau_2 \cdot C_2}{C_1 - C_2}, \quad (10)$$

где τ_1 – постоянная времени спада напряжения между электродами при подключенном конденсаторе C_1 , с;

τ_2 – постоянная времени спада напряжения между электродами при подключенном конденсаторе C_2 , с;

C_1 и C_2 – емкости подключаемых конденсаторов, Ф.

Большинство авторов [9, с. 4] при определении токов электризации диэлектрических жидкостей при их движении по трубопроводам используют в своих расчетах математические выражения, в которых время релаксации (правильно, постоянная времени релаксации) заряда определяется именно по формуле (1). Например, ток электризации определяется выражением [9, с. 4],

$$I = 0,035 \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot R \cdot T \cdot v}{n \cdot F} \text{Re}^{7/8} \cdot Sc^{1/4} \left(1 - \frac{C_s}{C_0}\right) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{L}{\tau \cdot v}\right)\right], \text{ А;} \quad (11)$$

где τ – постоянная времени релаксации, определяемая по формуле:

$$\tau = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \rho, \text{ (хотя авторы называют эту величину временем релаксации);}$$

$R_v(\rho)$ – удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м.

Формула (1), введенная Дж. Стреттоном, определяет заряд в диэлектрике, появляющийся при помещении его во внешнее электрическое поле за счет таких механизмов как: электронная поляризация, ионная поляризация, дипольная релаксационная поляризация. Дж. Стреттон указывает, что «во всех, даже плохих, проводниках τ необычайно мало. Так, в морской воде время релаксации порядка $2 \cdot 10^{-10}$ с...» [4, с. 27].

Механизм же образования заряда при движении диэлектрических жидкостей (нефтепродуктов) совсем иной, и протекает без приложения внешнего электрического поля (не считая поля Земли). Заряды в объеме движущейся диэлектрической жидкости появляются за счет такого механизма, как образование двойного электрического слоя и неравенство потенциалов в жидкой и твердой (стенка трубы) фазах. При наличии разности потенциалов одни ионы адсорбируются на стенках трубы и разряжаются, другие – уносятся потоком и накаливаются в емкостях (аппара-

тах). Этот процесс идет в двух направлениях: как в сторону электризации, так и в сторону релаксации, то есть восстановления. Слои жидкости, которые находятся на малых расстояниях от стенки трубопроводов легко релаксируются и в конечном счете в трубопроводе достаточной длины образуется некий средний совокупный заряд, который характеризуется показателем «объёмная плотность электрического заряда» и измеряется в физических единицах Кл/м³.

Таким образом, заряженные частицы в нефтепродуктах представлены ионами. Ионами, могут быть электрически заряженные атомы, молекулы, радикалы или более крупные образования [12, с. 5], несущие заряд мицеллы, ионофоры и ионогены. Ионы в жидкости возникают от разложения возможных примесей или при протекании окислительно-восстановительных реакций, в том числе на стенке трубопровода (резервуара). В неполярных и слабополярных жидких диэлектриках (минеральные масла, светлые и темные нефтепродукты) электропроводность определяется примесями, в случае, если примеси имеют достаточные размеры их электропроводность имеет иной тип, называемый в литературе катафорической [13, с. 235].

Постановка проблемы

Время релаксации ионов не может быть равно времени релаксации зарядов, образовавшихся при приложении внешнего электростатического поля, природа которых совершенно иная. Поэтому необходимо использовать установку, в которой формирование заряда в нефтепродукте происходит именно при движении жидкости, то есть носителями зарядов должны являться многоатомные ионы, мицеллы или иные заряженные частицы, и затем определять время релаксации образовавшегося заряда.

Используемая в исследованиях установка представляет собой особый случай применения принципа «клетки Фарадея». Все элементы установки, приемный резервуар, трубопровод, электрод-антенна, площадка для съема сигнала тщательно изолируются с использованием политетрафторэтиленовых материалов.

Установка состояла из (рис. 2) приемной емкости наэлектризованного нефтепродукта вместимостью 2 дм³; полимерного трубопровода длиной 40 см и диаметром 7 см, который можно располагать с различным углом отклонения от вертикальной оси при помощи держателя, укрепленного на штативе; штатива с закрепленной на нем трубой; емкости с не наэлектризованной жидкостью объемом 1 дм³; приемного устройства – электрода-антенны; соединительных проводов (общая длина 25 см; площадка для съема сигнал, в виде круга диаметром 3 см, укрепленного на диэлектрической подставке и измерительного прибора ИПЭП-1.

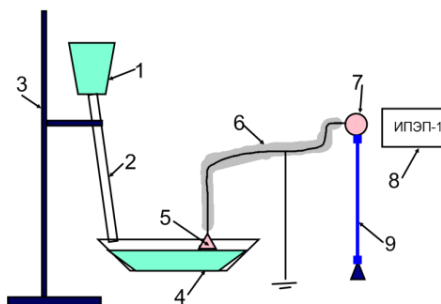


Рис. 2. Испытательная установка:

- 1 – емкость с жидкостью, 2 – труба, 3 – штатив, 4 – приемная емкость, 5 – антенна, 6 – экранированный провод, 7 – диск съема сигнала, 8 – измерительный прибор, 9 – электроизоляционная подставка.

Исследование проводили в следующей последовательности: в емкость с не наэлектризованным нефтепродуктом (1) помещали 1 дм³ диэлектрической жидкости (нефть, бензин). Электрод-антенну устанавливали таким образом, чтобы при поступлении всего объема жидкости в приемную жидкость волосики антенны касались поверхности жидкости. Включали прибор ИПЭП-1. Прибор заземляли, соединительные провода покрывали экраном из алюминиевой фольги и экран также заземляли. Временно заземляли круглый экран, после получения нулевых значений на ИПЭП-1 заземления снимали. Быстро выливали всю жидкость из емкости и фиксировали значение на приборе, затем контролировали измеряемые величины через определенные промежутки времени, фикс-

сировали изменение потенциала на расстоянии 2 см от поверхности площадки при съеме сигнала прибором ИПЭП-1. Порция нефти использовалась одна и та же многократно. Результаты измерений, полученные на нефти, приведены в табл. 1. Так как на поверхности жидкости образуется электростатический заряд, он по соединительным проводам от антенны частично переходит на круглый экран до достижения состояния равновесия. В зависимости от величины заряда, перешедшего на диск, возникает различный потенциал, который фиксировали прибором.

Таблица 1

Изменение величины потенциала электростатического поля на круглом диске (расстояние 2 см)

Время, с	Потенциал, В	Время, с	Потенциал, В	Время, с	Потенциал, В
Опыт 1		Опыт 2		Опыт 3	
0	+2	0	0	0	0
20	-45	2	-10	2	-10
60	-44	60	-6	120	-8
90	-38	240	-5	240	-6
120	-36	270	-4	270	-4
180	-36	300	-3	300	-3
240	-29	360	-3	360	-3
300	-24	-	-	-	-
360	-22	-	-	-	-
420	-20	-	-	-	-

Из представленных результатов видно, что приобретенный при вертикальном (свободном) падении струи заряд, полностью не исчезает с поверхности нефтепродукта достаточно длительное время более 420 секунд. Второе, время релаксации заряда намного больше, чем рассчитанное по формуле (5), равное 24 с для используемой в эксперименте нефти в удельным электрическим сопротивлением $2 \cdot 10^{-12}$ Ом·м.

Ниже приведены графики с постоянной времени релаксации, определенной по [6], с использованием программы **Grafikus** в интервале диэлектрической проницаемости приложение 3 [7] и удельного объемного электрического сопротивления указанного в приложении 1 [6].

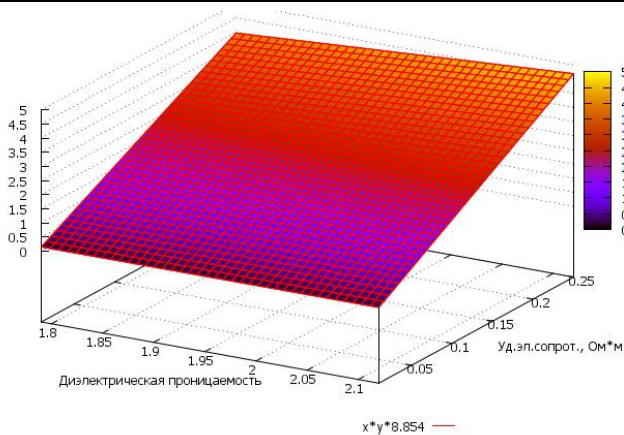


Рис. 3. Постоянная времени релаксации бензина автомобильного А-76.

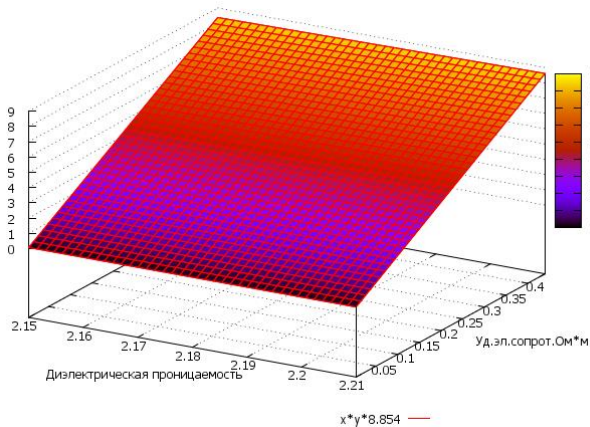


Рис. 4. Постоянная времени релаксации бензина автомобильного АИ-93.

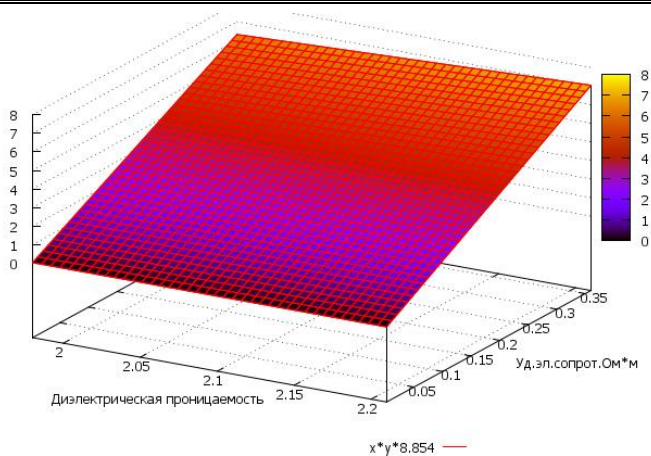


Рис. 5. Постоянная времени релаксации керосина осветительного.

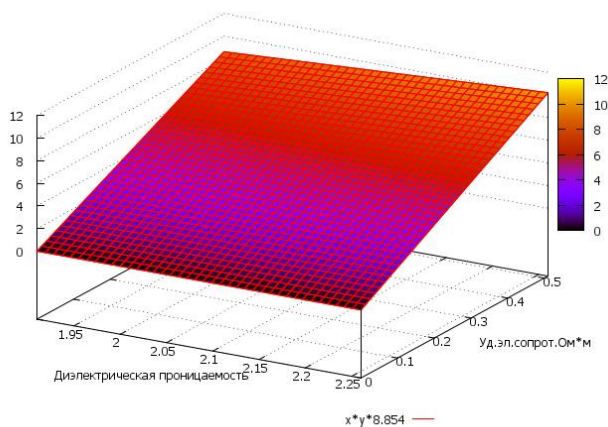


Рис. 6. Постоянная времени релаксации топлива дизельного.

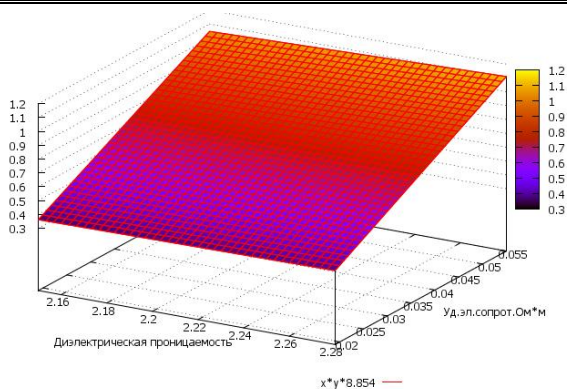


Рис. 7. Постоянная времени релаксации топлива Т-1.

Обсуждение результатов

Из представленных графиков 3–7 видно, что постоянная времени релаксации для всех углеводородных жидкостей нормируемых [7] не превышает 12 секунд, в то время как экспериментальное время в отдельных опытах с использованием вышеописанной установки и измерителя электростатических величин ИПЭП-1 составило более 420 с. Также из представленных графиков видно, что наибольшая электризация возможна у топлива дизельного и Т-1, которое представляет собой продукт прямой перегонки малосернистых нефтей нафтенового основания с пределами выкипания 130–280 °С, содержащее большое количество нафтеновых кислот, в то время как наиболее часто пожары от статического электричества наблюдаются на резервуарах с автомобильными бензинами.

Многими авторами отмечается, что измеренный ток электризации обычно в 10 раз больше расчетного. Этот факт авторы объясняют шероховатостью стенок металлических труб, что может вызвать увеличение электризации в 1,75–5 раз [9] и диссоциацией примесей на не однозарядные ионы. Но этот факт может быть также корректным определением постоянной времени релаксации заряда. Однако данная разница никак не учитывается в нормативной литературе при расчете максимальной плотности электростатического заряда.

Вывод

Разграничение понятий времени релаксации и константы времени релаксации требует и различных методов по их определению, кроме того используемые в настоящий момент методы определения постоянной времени релаксации не учитывают релаксацию основных носителей статического заряда, что приводит к занижению этого времени, что и нашло отражение в нормативно-технической литературе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Галка В. Л.* Вопросы электростатической искробезопасности наливных судов. СПб.: Элмор, 2003. 125 с.
2. *Захарченко В. В., Журавлев В. С., Очков Ю. Д.* Правила защиты от статического электричества в производствах химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. М.: Химия, 1973. 44с.
3. Правила технической эксплуатации резервуаров для нефти и нефтепродуктов: ТКП 169-2009 (09100). Введ. 01.08.09. Мн.: Концерн «Белнефтехим», 2009. 137с.
4. *Стреттон Дж. А.* Теория электромагнетизма / Пер. М. С. Рабиновича, В. М. Харитоновна. Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1948. 541с.
5. *Аксельрод В. С., Авербух Г. И., Бурбуков А. В.* Способ и устройство для измерения постоянной времени релаксации объемного заряда в диэлектрических жидкостях: пат. 2453857 РФ, МПК7G 01 R 29/12. Заявитель Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. № 2010140869/28; заявл. 07.10.2010; опубл. 20.06.2012. Бюл. № 17. Патентообладатель Министерство промышленности и торговли Российской Федерации.
6. Допустимые скорости движения жидкостей по трубопроводам и истечения в емкости (аппараты, резервуары): РТМ 6-28-007-78/ ВНИИТБХП.- М., 1978. С. 35.
7. Рекомендации по предотвращению опасной электризации нефтепродуктов при наливке в вертикальные и горизонтальные резервуары / Введ. 28.12.93. М.: Главнефтепродукт ГП Роснефть, 1993.
8. *A. Klinkenberg, I. L. van der Minne.* Electrostatic in Petroleum Industry / Elsevier publishing comp, 1958. V. 1.
9. Электризация жидкостей и ее предотвращение / *Захарченко В. В.* [и др.]. М.: Химия, 1975. 127 с.
10. *Блинов А. А.* Защита от статического электричества объектов НПЗ, нефтебаз и трубопроводов. М.: ЦНИИТЭнергохим, 1985. 37с.

11. Stratton, Julius Adams Electromagnetic Theory. New York and London: McGRAW-HILL Book Company, Inc. 1941. 615с.

12. Захарченко В. В. Электризация жидкостей в аппаратах и резервуарах и методы ее снижения / Под ред. В. А. Линецкого. М.: 1974. 40 с.

13. Сканави Г. И. Физика диэлектриков. М.: Изд-во «Технико-теоретической литературы», 1949. 253 с.



УДК 536.126

Канд. техн. наук, доц. *Саханский Ю. В.*,
асп. *Макаров Н. Г.*

Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет)
г. Владикавказ, РСО-Алания, Россия

ПРОБЛЕМА НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЁНОК В ИЗДЕЛИЯХ ЭЛЕКТРОНИКИ И СЛОИСТЫХ УСТРОЙСТВАХ ИНИЦИИРОВАНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Рассмотрены методы нанесения тонких плёнок. Дана их классификация и выделены основные характеристики при использовании в изделиях электроники и электровзрывании.

Технология нанесения покрытий на различные изделия и материалы является одной из новых и прогрессивных в процессах, которые широко используются в разных отраслях промышленности.

Наиболее перспективными и интересными процессами можно без преувеличения считать нанесение тонкопленочных покрытий в вакууме.

Разнообразие вариаций реализации данных процессов сводится к тому, что материал покрытия в условиях достаточно высокого вакуума переводится в газовую фазу и в виде направленного потока атомов или молекул поступает к подложке, где и конденсируется, образуя покрытие.

В то же время методы, используемые для получения газовой фазы покрывающего материала, и конструкции устройств, которые реализуют эти способы, достаточно сильно отличаются друг от друга.