

Научная статья
УДК 53.083.1:678.8

Методика измерения удельного электрического сопротивления напорных рукавов

Радик Равилевич Саетгалиев, Владимир Александрович Анискович,
Марина Ивановна Марченко

Аннотация. В статье рассмотрены основные аспекты измерения удельного электрического сопротивления материалов с внедрёнными проводящими частицами, используемых для напорных топливных рукавов и других технических целей. Проведены измерения и расчеты удельного электрического сопротивления образцов многослойных рукавов с использованием стальных и медных хомутов для плотного облегания электродов. Разработана методика измерения удельного электрического сопротивления материалов трубчатых образцов на имеющемся оборудовании.

Ключевые слова: напорные рукава; теория перколяции; удельное электрическое сопротивление; методика измерения; электропроводность

Благодарности: авторы выражают благодарность В.Володиной и В.Мельникову за проведение испытаний и предоставление экспериментальных данных.

Для цитирования: Саетгалиев Р.Р., Анискович В.А., Марченко М.И. Методика измерения удельного электрического сопротивления напорных рукавов // Вооружение и экономика. 2026. №2(76). С. 52-58.

Original article

Method of Pressure Measurement of Specific Electrical Hoses Resistance

Radik R. Saetgaliev, Vladimir A. Aniskovich, Marina I. Marchenko

Abstract. The article considers the main aspects of the specific material resistance measurement with embedded conductive particles applied for pressure fuel hoses and other technical purposes. Specific electrical resistance measurements and calculations of multilayer hoses with the use of steel and copper clamps to ensure a tight fit around the electrodes are performed. A method of the specific resistance measurement of tubular samples by means of equipment on hand has been developed.

Keywords: pressure hoses; percolation theory; specific electrical resistivity; measurement technique; electrical conductivity

Acknowledgments: the authors express their gratitude to V.Volodina and V.Melnikov for conducting the tests and providing the experimental data.

For citation: Saetgaliev R.R., Aniskovich V.A., Marchenko M.I. Method of Pressure Measurement of Specific Electrical Hoses Resistance. Vooruzhenie i ekonomika = Armament and Economics. 2026; 76(2): 52-58. (In Russ.).

Процессы наземной заправки воздушных судов и слива топлива являются важными операциями в авиационной отрасли, требующими высокой надежности и безопасности¹. Согласно данным Международной организации гражданской авиации (ICAO), более 70% авиационных инцидентов, связанных с наземными операциями, вызваны нарушениями в области топливной безопасности, что подчеркивает важность контроля над всеми аспектами, способными повлиять на риск возникновения таких инцидентов. Одним из ключевых элементов инфраструктуры, обеспечивающих выполнение этих процессов, являются напорные (топливные) маслобензостойкие рукава. Их эксплуатационные характеристики, включая диэлектрические свойства, играют важную роль в предотвращении статического электричества в материалах топливных рукавов, так как это может привести к искровым разрядам, создающим угрозу взрыва или пожара [1; 2].

Таким образом, понимание физических свойств материалов и их влияние на накопление заряда является основой для разработки безопасных решений в данной области. В напорном рукаве из-за электризации нефтепродуктов (топлива) может возникать статическое электричество (рисунок 1). Удельное электрическое сопротивление материалов, из которых изготовлен рукав, является одним из параметров, определяющих безопасность

¹ Правила защиты от статического электричества в производствах химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. М.: Химия, 1973. 62 с.

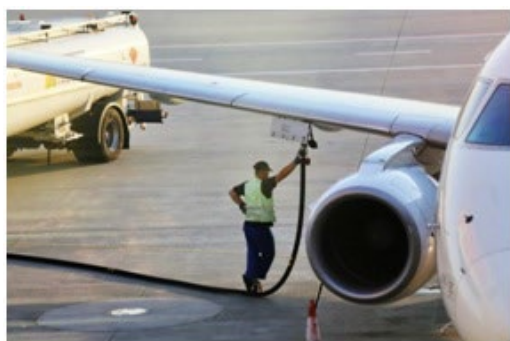
рукава. При удельном электрическом сопротивлении материалов менее 1 МОм·м заряды не сохраняются и материалы не электризуются, что позволяет эффективно снижать риск накопления статического электричества, способного привести к возгоранию.

На этом основании в современных стандартах, регулирующих материалы для топливных рукавов, установлены требования² на значения сопротивления в диапазоне от 1 кОм·м до 1 МОм·м.

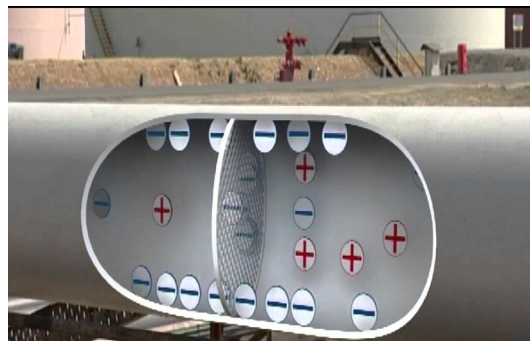
Наиболее распространенными материалами для напорных рукавов являются поливинилхлорид, полиуретан и др. с удельным электрическим сопротивлением в диапазоне 1 000-1 000 000 МОм·м, поэтому для них предусмотрено введение примесей (наполнение проводящими частицами)³, значительно изменяющих проводящие свойства материала [3; 4]. Анализ проведенных измерений показывает, что добавление примесей снижает удельное поверхностное сопротивление диэлектрических материалов до 30-40%.

Для оценки электрического сопротивления материалов существует множество теоретических моделей, каждая из которых предназначена для анализа определенных типов материалов и условий. Одной из наиболее известных является модель Друде-Лоренца (классическая электронная теория), разработанная для описания поведения электронов в металлах [5]. Эта модель основывается на предположении, что электроны в металле движутся подобно идеальному газу, сталкиваясь с атомами кристаллической решетки (ионы), что позволяет учитывать такие параметры, как проводимость и сопротивление материала (рисунок 2а).

Полимерно-композитные материалы ведут себя иначе. Поэтому для полимерных материалов, которые часто используются в производстве рукавов для заправки и слива топлива, данная модель не подходит из-за их сложной структуры. Для таких структур предпочтительнее применять модели, основанные на теории перколяции (перколяция – процесс распространения текучего вещества в пористой среде) [5]. По аналогии теория применима также для описания протекания тока в полимерной матрице, содержащей электропроводящие частицы. Матрица представляется в виде набора случайно распределенных узлов, в которые может перетекать жидкость (в данном случае электропроводящий наполнитель). Плотность узлов определяет вероятность образования непрерывных цепочек из контактирующих узлов, что позволяет жидкости протекать сквозь образец материала. Следовательно, применительно к измерению электрического сопротивления, объемная доля электропроводящего наполнителя определяет вероятность контакта между его частицами и образования проводящих путей (цепочек) в материале, соединяющих верх и низ по толщине образца (рисунок 2б).



а) заправка топливом самолета



б) распределение зарядов внутри рукава

Рисунок 1 – Рукав для заправки и слива топлива (фото из открытых источников)

² ГОСТ 31610.32-1-2015 Взрывоопасные среды. Часть 32-1. Электростатика. Опасные проявления. Руководство. М.: Стандартинформ, 2016. 153 с.

³ Калашникова П.А. Моделирование транспортных свойств полимерных композитов с углеродными нанонаполнителями: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 1.3.8. М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2021. 27 с.

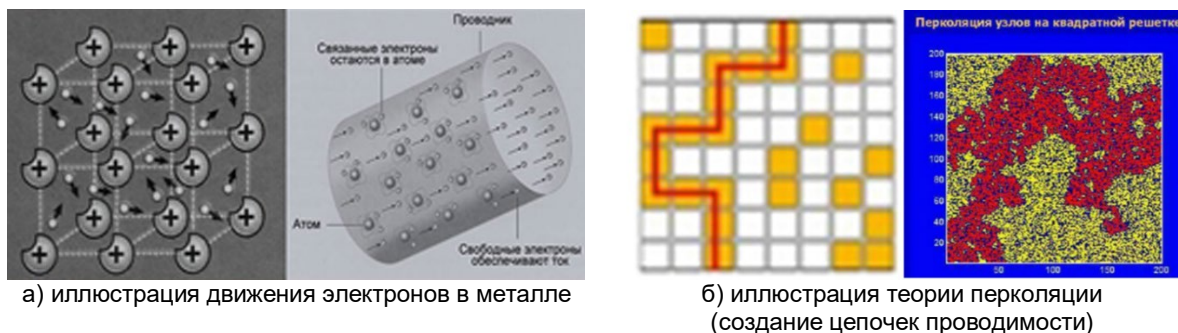


Рисунок 2 – Иллюстрации теоретических моделей, предназначенных для оценки электрического сопротивления материалов

Данная модель учитывает распределение проводящих частиц (добавок) в непроводящей матрице. Чтобы зафиксировать электропроводность образованных цепочек, необходимо очень плотное облевание электродов по наружной и внутренней поверхностям образца. Рассматриваемый в целях настоящей работы топливный рукав представляет собой многослойный пакет (рисунок 3):

- внутренний слой, контактирующий с топливом, должен быть устойчив к коррозии и разрушению материала;
- армирующий слой (середина), придающий прочность и устойчивость к механическим нагрузкам, высоким давлениям и изгибам;
- внешний слой, защищающий рукав от внешних воздействий, таких как ультрафиолетовое излучение, озон, абразивные материалы и механические повреждения.

Существующий в настоящее время ГОСТ 5398-76⁴ не предусматривает определение удельного электрического сопротивления рукава армированной многослойной структуры. Также существует европейский стандарт ISO 8031:2020⁵, но этот документ предусматривает измерение непрерывности электрической цепи между концевыми фитингами рукава в сборе, без фактического измерения сопротивления.

Таким образом, исследование удельного электрического сопротивления многослойного армированного напорного рукава является актуальным и имеет важное практическое значение, способствуя разработке более надежных и безопасных решений для авиационной отрасли и повышению безопасности наземных операций.



Рисунок 3 – Вид напорного рукава

⁴ ГОСТ 5398-76 Рукава резиновые напорно-всасывающие с текстильным каркасом неармированные. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 1976. 25 с.

⁵ ISO 8031:2020 Rubber and plastics hoses and hose assemblies. Determination of electrical resistance and conductivity (Рукава резиновые и пластмассовые и рукава в сборе. Определение электрического сопротивления и удельной электропроводности)

Целью настоящей работы являются экспериментальные исследования и разработка методики измерения полного удельного электрического сопротивления многослойного материала рукава напорного, применяя имеющуюся измерительную аппаратуру отечественного производства (рисунок 4а, 4б), без использования иностранного дорогостоящего оборудования (рисунок 4в).

Будем считать, что материалы внешних поверхностей и материал наполнения рукава различны, тогда общий ток проводимости в материалах рукава складывается из тока I_V объёмной проводимости и токов I_S поверхностных проводимостей (рисунок 5а). Схему протекания электрического тока можно представить в виде схемы замещения, изображённой на рисунке 5б.



Рисунок 4 – Внешний вид средств измерений удельного электрического сопротивления образцов

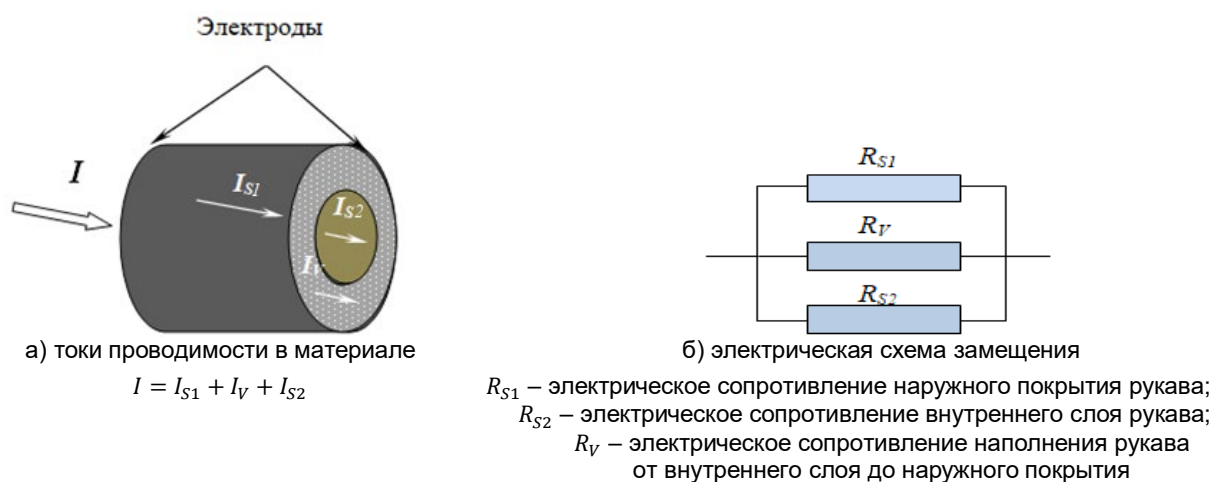


Рисунок 5 – Схема протекания электрического тока в материале рукава

Электрические свойства внешних поверхностей и внутреннего наполнения могут быть разными. Полное сопротивление материала рукава можно определить как результирующее трёх сопротивлений, объёмного и поверхностных, включенных параллельно между электродами. Математическая связь между общим сопротивлением и индивидуальными сопротивлениями выражается формулой:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{S1}} + \frac{1}{R_V} + \frac{1}{R_{S2}} \quad \text{или} \quad R = \frac{R_{S1} \cdot R_V \cdot R_{S2}}{R_{S1} \cdot R_V + R_{S1} \cdot R_{S2} + R_{S2} \cdot R_V}, \quad (1)$$

где: R_{S1} – сопротивление наружной поверхности, Ом;

R_V – сопротивление по толщине образца, Ом;

R_{S2} – сопротивление внутренней поверхности, Ом.

В качестве электродов стандартно применяются:

- металлические нажимные электроды из нержавеющей стали;
- электроды из отожженной алюминиевой, медной или оловянной фольги, притертой тонким слоем конденсаторного или трансформаторного масла;
- графитовые электроды: электроды из осажденных в вакууме металлов или паст – серебра, платины, меди, цинка;
- электроды из токопроводящей резины и т.д.

Электроды должны обеспечивать плотный контакт с очищенной поверхностью образца, чтобы не искажать значения измерений из-за сопротивления самого электрода или загрязнения поверхности. Неравномерное прилегание контактируемых поверхностей уменьшает площадь контакта, что приводит к неоднородности плотности тока при измерениях на испытуемом участке образца. Более плотное прилегание электрода, создающееся увеличением прижимного давления, приводит к сжатию резины, а вследствие сжатия – к уменьшению электрического сопротивления резины. Электроды должны обладать высокой проводимостью, обеспечивать плотный электрический контакт по всей поверхности и не вступать в химические реакции с образцом.

В настоящей работе в качестве наружных электродов использовались контактная медная фольга шириной 25 мм, накрученная вокруг образца, и обжимные хомуты из оцинкованной стали, позволяющие проводить плавную бесступенчатую затяжку для равномерного обжатия образца. При помощи гаечного ключа на хомуте закручивается специальная гайка, регулирующая силу стягивания. Затяжка хомутами не превышала 20% толщины стенки образца.

В качестве внутренних электродов – контактная медная фольга, стальной конус и червячный хомут, представляющий собой узкую полосу из оцинкованной стали и оба конца которой соединены винтовым (червячным) замком. Для исключения концевых эффектов электроды внутри и снаружи располагались в 10 см от концов (рисунок 6).

Объектами испытаний являлись образцы, вырезанные из прототипов армированных напорных рукавов. Измерения сопротивлений по наружной поверхности, по внутренней поверхности и по толщине образца проводились тераомметром типа ТОММ-01 (рисунок 7).

По измеренным значениям электрических сопротивлений на наружной поверхности, внутренней поверхности и по толщине проводится расчёт R по формуле (1) и затем расчет удельного электрического сопротивления ρ по формуле:

$$\rho = R \cdot \frac{S}{l} \cdot 10^{-6}, \quad (2)$$

где: R – значение электрического сопротивления образца, Ом;

l – расстояние между электродами электродного устройства, 0,1 м;

S – площадь сечения испытуемого образца, мм².

Результаты измерений и расчетов, а также сравнения значений сопротивления при использовании медных и стальных хомутов, приведены в таблице 1.

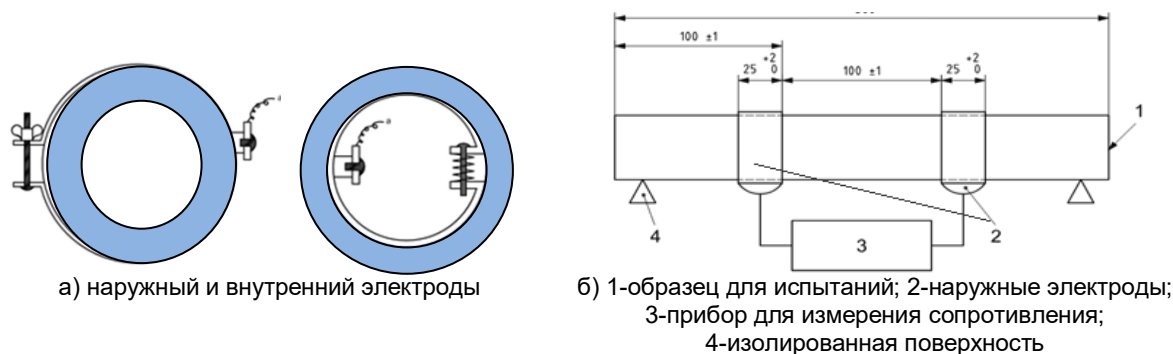


Рисунок 6 – Схема расположения внутреннего и внешнего электродов в образце трубчатой формы



а) наружные стальные электроды на образце многослойной резины



б) внутренние стальные электроды на образце многослойной резины

Рисунок 7 – Примеры расположения электродов на образце для измерения

Таблица 1 – Результаты испытаний и расчетов электрического сопротивления

№ п/п	Образец	Длина образца, м	Площадь сечения, S , кв. мм	Рассчитанное по измеренным данным значение электрического сопротивления, R , Ом	Удельное сопротивление, ρ , Ом·м
1	Рукав напорный*	0,3	1526,0	$3,0 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^3$
2	Рукав напорный**	0,3	1354,1	$2,5 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^3$
3	Рукав напорный*	1,0	1356,5	$9,0 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^3$

Примечание: * – использовались медные хомуты, ** – использовались стальные хомуты.

Анализ результатов испытаний показывает следующее:

- значения измеренного сопротивления не зависят от использования медных или стальных хомутов;
- многослойный армированный напорный рукав имеет удельное сопротивление $\sim 1,3 \cdot 10^3$ Ом·м, что соответствует требованиям, установленным в авиационной промышленности.

Таким образом, в ходе проведения исследования разработана методика измерения удельного электрического сопротивления на отрезке образца напорного рукава, содержащего в своем составе высокопроводящие компоненты, позволяющие минимизировать накопление статического электричества.

Выводы

1. Проведен анализ теоретических моделей протекания тока через материалы и существующей нормативной документации по определению удельного электрического сопротивления трубчатых образцов.
2. Разработана методика измерения удельного электрического сопротивления напорных рукавов и проведен сравнительный анализ полученных результатов при использовании стальных и медных хомутов.
3. Проведены измерения при установившемся токе (время электризации 60 С) и последующий расчет полного удельного сопротивления образцов, которое составляет $\sim 1,3 \cdot 10^3$ Ом·м для многослойного армированного напорного рукава, что соответствует требованиям, установленным в авиационной промышленности.
4. Обоснована возможность проведения измерений и расчета удельного сопротивления образцов многослойного армированного напорного рукава на имеющемся оборудовании без приобретения специальных измерительных средств.

Список источников

1. Хорват Т., Берта И. Нейтрализация статического электричества. М.: Энергоатомиздат, 1987. 104 с.
2. Гуль В.Е., Шенфиль Л.З. Электропроводящие полимерные композиции. М.: Химия, 1984. 240 с.
3. Волков О.Е., Корнев В.А., Колесников А.А. Перспективные рукава для технических средств перекачки горючего // Наука, техника и образование. 2015. №7(13). С. 8-13.
4. Ларионов С.А., Деев И.С., Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я. Влияние углеродных наполнителей на электрофизические, механические и реологические свойства полиэтилена // Труды ВИАМ. 2013. №9. С. 4-14.
5. Делекторский А.А., Зубов В.Е., Стефов Н.В. Измерение удельного электрического сопротивления анизотропной цилиндрической токопроводящей резины в радиальном направлении // Территория НЕФТЕГАЗ. 2010. №12. С. 34-38.

Информация об авторах

Р.Р. Саетгалиев – кандидат технических наук.
В.А. Анискович – доктор технических наук.
М.И. Марченко – ORCID 0009-0002-1083-6787.