

# Кабели с диэлектриком на основе фторопласта-4 низкой и сверхнизкой плотности

Владимир СЕРЕДЕНКО  
vladimir.seredenko@nkt-rf.ru

**В статье представлены коаксиальные кабели на основе фторопласта-4 низкой и сверхнизкой плотности. Их выпускает швейцарская компания Huber+Suhner, один из мировых лидеров — производителей коаксиальных кабелей, соединителей, сборок, переходов и других пассивных компонентов. Преимуществом компании является разработка и производство как кабелей, так и соединителей, что позволяет обеспечить максимальную совместимость отдельных компонентов кабельныхборок. Компоненты Huber+Suhner широко применяются в промышленности и телекоммуникациях, в технике военного и космического назначения. Кроме того, можно выделить высококлассные компоненты для испытаний и измерений параметров радиоэлектронной аппаратуры [1].**

## Основные материалы, используемые в качестве диэлектрика

Диэлектрик коаксиального кабеля определяет его электрические характеристики — вносимые потери и максимальную рабочую мощность, а также является основным ограничением для диапазона рабочих температур изделия, так как обладает наименьшей термостойкостью и часто становится хрупким при отрицательных температурах. В современных коаксиальных кабелях в качестве диэлектрика чаще всего применяют полиэтилен (PE) и политетрафторэтилен, или фторопласт-4 (PTFE) (табл. 1) [2].

Кабели с полиэтиленовым диэлектриком характеризуются меньшей стоимостью и ограниченным диапазоном рабочих температур: от  $-40$  до  $+85$  °С. Полиэтиленовый диэлектрик коаксиального кабеля может быть изготовлен как из сплошного твердого полиэтилена, так и из вспененного. Кабели с диэлектриком на основе вспененного полиэтилена отличаются существенно меньшими вносимыми потерями по сравнению с изделиями на основе твердого материала. Существенным недостатком полиэтилено-

вых кабелей является их низкая термостойкость, что ограничивает возможности монтажа или существенно усложняет такой монтаж. Кроме того, сужается температурный диапазон, при котором такие кабели могут работать.

Кабели на основе фторопласта-4 являются более термостойкими и более дорогостоящими по сравнению с изделиями на основе полиэтилена. С точки зрения ключевых электрических характеристик фторопластовые кабели при идентичных геометрических параметрах могут не только превосходить полиэтиленовые кабели, но и уступать им по вносимым потерям в зависимости от варианта конструктивной реализации диэлектрического заполнения. Однако фторопластовые кабели практически всегда превосходят полиэтиленовые по максимальной рабочей мощности.

Диэлектрическое заполнение на основе фторопласта-4, как правило, может быть реализовано двумя различными способами: путем экструзии фторопласта-4 или путем наматывания ленты. Процесс получения экструзионного диэлектрика на основе фторопласта-4 более экономичен и стабилен,

если соответствующим образом отлажен. Процесс получения намотанного диэлектрика является более сложным и дорогостоящим из-за меньшей стабильности, однако требует меньших первоначальных инвестиций. Кабели с намотанным диэлектриком обладают еще одним недостатком — низкой технологичностью при нарезке и разделке, поэтому, как правило, потребители отдадут свое предпочтение кабелям с экструзионным диэлектриком.

Наиболее широко на мировом рынке представлены кабели на основе сплошного твердого фторопласта-4, однако наиболее высококлассными изделиями сегодня являются изделия на основе фторопласта-4 низкой плотности. Такие кабели применяются, в основном, в измерительной, авиационной, космической и другой специальной технике.

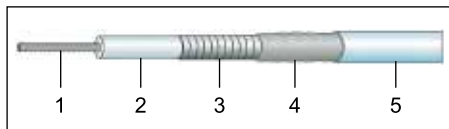
Сегодня компания Huber+Suhner производит коаксиальные кабели на основе твердого фторопласта-4, фторопласта-4 низкой и сверхнизкой плотности. Последний позволяет достичь рекордно низких потерь. В таблице 2 представлена диэлектрическая проницаемость материалов, применяемых в коаксиальных кабелях компании Huber+Suhner на основе фторопласта-4 [3].

Таблица 1. Основные свойства диэлектрических материалов

Свойства	Материал		
	PE		PTFE
	Стандартный	Вспененный	
Диэлектрическая проницаемость	2,28	1,3–2	2,1
Скорость распространения, % от скорости света	66	82	71
Рабочая температура, °С	$-40...+85$	$-40...+85$	$-200...+260$
Горючесть	Высокая	Высокая	Не горит

Таблица 2. Диэлектрическая проницаемость материалов, применяемых в коаксиальных кабелях компании Huber+Suhner

Материал	Диэлектрическая проницаемость	Применение	Примеры
Твердый экструзионный фторопласт-4 (PTFE)	2,1	Традиционные ВЧ- и СВЧ-кабели	Sucoform, Multiflex
Экструзионный фторопласт-4 низкой плотности (LD-PTFE)	1,68	СВЧ-кабели с малыми потерями	Sucoflex 100, 300
Экструзионный фторопласт-4 сверхнизкой плотности (ULD-PTFE)	1,26	СВЧ-кабели со сверхнизкими потерями	Sucoflex 400



**Рис. 1.** Конструкция коаксиального кабеля серии Sucoflex:  
1 — центральный проводник; 2 — диэлектрик;  
3—1-й экран; 4—2-й экран; 5 — оболочка

**Особенности конструкции коаксиальных кабелей Sucoflex**

Конструкция изделий серии Sucoflex представляет собой классический коаксиальный кабель с двойным экраном (рис. 1) [4].

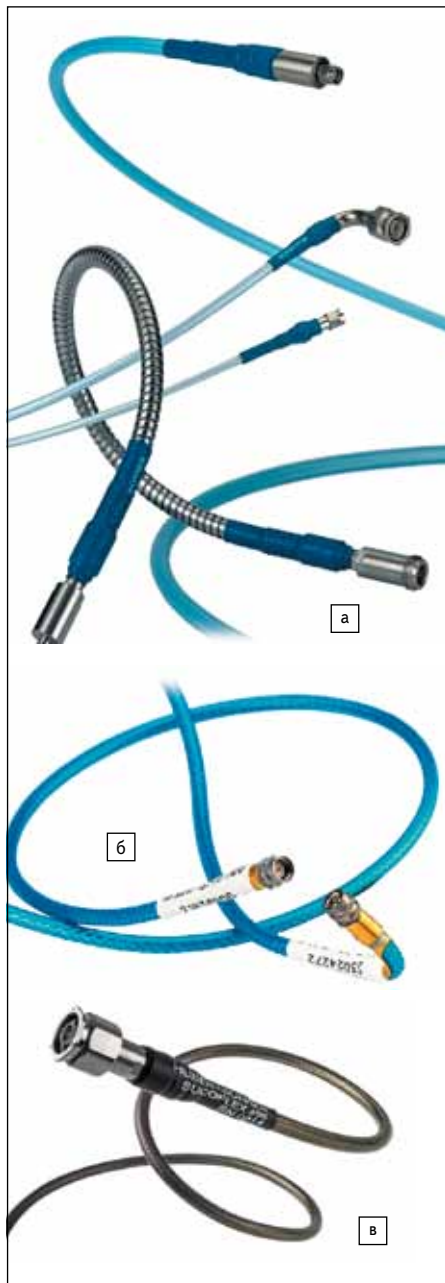
Центральный проводник коаксиального кабеля выполнен в виде сплошной жилы или плетеного проводника из меди, покрытой серебром. Кабели с плетеной центральной жилой обладают повышенной гибкостью и фазовой стабильностью при изгибе. К их наименованию добавлен индекс Р (например, SF104Р). Кабели с цельной центральной жилой вносят меньшие потери в тракт. В задачах, где предполагаются регулярные изгибы кабельных сборок, рекомендуется применять кабели с плетеной центральной жилой. Для снижения веса кабелей авиационного и космического применения в качестве основы центрального проводника используют алюминий, который покрывают серебром (серия коаксиальных кабелей Sucoflex 300) [5].

В качестве диэлектрика в кабелях серии Sucoflex 100 (рис. 2а) и Sucoflex 300 (рис. 2б) применяется экструзионный фторопласт-4 низкой плотности, а в кабелях Sucoflex 400 (рис. 2в) — экструзионный фторопласт-4 сверхнизкой плотности.

Внешний проводник, или экран коаксиального кабеля, обеспечивает электрическую герметичность изделия и определяет гибкость. Наиболее типичны двойные экраны в виде двух оплеток либо сочетания фольги или ленты в качестве первого слоя экрана и оплетки в качестве второго. С ростом частоты потери на излучение коаксиальных кабелей возрастают, и эффективность экранирования кабеля имеет все более существенное значение. Кабели с одиночным плетеным экраном остаются эффективными (в зависимости от плотности плетения) до 1–3 ГГц максимум. Кабели с двойным плетеным экраном могут быть эффективными до 6 ГГц, изделия с продольной фольгой или лентой и с оплеткой могут применяться на частоте до 18–65 ГГц (в зависимости от конкретной конструкции и точности изготовления).

В представленных коаксиальных кабелях экран состоит из двух слоев:

- первый — медная или алюминиевая намотанная лента, покрытая серебром;
- второй — медная или алюминиевая оплетка, покрытая серебром.



**Рис. 2.** Кабельные сборки серии:  
а) Sucoflex 100; б) Sucoflex 300; в) Sucoflex 400

Оболочка коаксиального кабеля является основной защитой элементов конструкции. Как правило, оболочки выполняются в виде сплошного слоя полимерного материала. Кабели серии Sucoflex производятся с оболочкой на основе фторэтиленпропилена (FEP) или полиуретана (PUR), в наименование таких изделий добавлен индекс Е. Кабель в оболочке из полиуретана рекомендуется использовать, когда требуется максимальная гибкость или устойчивость к регулярному динамическому воздействию.

Отличительной чертой представленных серий кабельных сборок также является возможность исполнения с дополнительной защитой для различных условий применения.

Защитное покрытие типа А (рис. 3а) состоит из стальной спирали, оплетки и полиуретановой оболочки. Оно обеспечивает защиту от сжатия, растяжения, кручения, истирания и других механических воздействий при температуре до +85 °С. Этот тип защиты рекомендуется использовать в лабораторных условиях для измерений и испытаний.

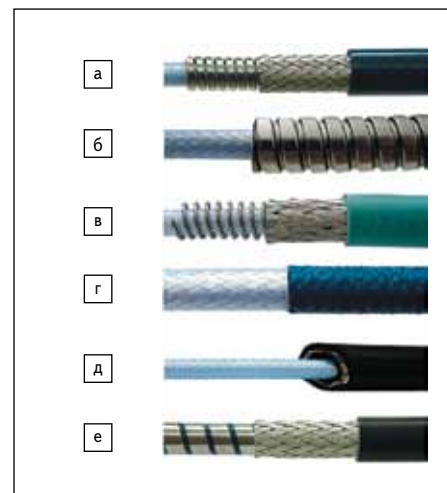
Защитное покрытие типа В (рис. 3б) состоит из гибкого шланга из нержавеющей стали. Оно обеспечивает защиту от сжатия, истирания, механических воздействий и открытого огня при температуре до +165 °С. Этот тип защиты рекомендуется использовать в промышленных условиях.

Защитное покрытие типа С (рис. 3в) идентично типу А за исключением оболочки, которая выполнена из RADOX вместо полиуретана. RADOX является огнестойким материалом. (Диапазон рабочей температуры — до +125 °С.)

Защитное покрытие типа D (рис. 3г) состоит из арамидной оплетки, пропитанной лаком. Оно обеспечивает защиту кабеля от истирания и кратковременных высокотемпературных воздействий. Применяется в авиационной технике.

Защитное покрытие типа G (рис. 3д) состоит из гибкого двухслойного резинового шланга со слоем неопрена. Оно обеспечивает высокую стойкость к истиранию, кручению, химическим веществам и маслам. Кабельные вводы защищены. Подходит для наружного и морского применения при температуре до +100 °С.

Защитное покрытие типа М (рис. 3е) состоит из дополнительной ленты ферромагнетика, оплетки и оболочки, которая при горении выделяет мало дыма. Эта оболочка также не содержит веществ-галогенов. Покрытие обеспечивает дополнительное экранирование на частоте до 1 ГГц (120 дБ) и, таким образом, защищает кабель от электромагнитных наводок цепи управления и питания. Применяется для измерений



**Рис. 3.** Типы защитных покрытий коаксиальных кабелей серий Sucoflex:  
а) тип А; б) тип В; в) тип С; г) тип D; д) тип G; е) тип М



Рис. 4. Кабельные сборки серии Sucoflex TVAC

с повышенными требованиями к ЭМС, при температуре до +85 °С.

Для испытаний космических спутников и их частей требуется специальная тестовая и измерительная аппаратура, обладающая особыми характеристиками. Необходимо избегать загрязнения испытываемого оборудования и термовакуумной камеры частицами материалов, так как они могут вызывать коррозию и вывод оборудования из строя. Для этих целей компания Huber+Suhner предлагает специальную серию кабельных сборок Sucoflex TVAC (рис. 4), выполненных из материалов с пониженным уровнем выделения газа. Для этих сборок предназначены специальные вентилируемые соединители. С помощью соответствующих оптимизированных каналов в соединителях достигаются оптимальные параметры понижения и повышения давления, в результате чего адаптация к давлению происходит быстро и без ущерба для соединителей и кабеля.

### Основные характеристики коаксиальных кабелей Sucoflex

Выбор конкретного типа коаксиального кабеля проводится на основе анализа требований к характеристикам изделия. Среди них можно выделить:

- волновое сопротивление;
  - диапазон рабочих частот;
  - затухание;
  - мощность;
  - эффективность экранирования;
  - стабильность фазы от температуры и при изгибе;
  - диапазон рабочих температур;
  - гибкость.
- Общими параметрами для всей серии Sucoflex являются:
- волновое сопротивление 50 Ом;
  - эффективность экранирования не менее 90 дБ на 18 ГГц;
  - диапазон рабочих температур от -55 до +125 °С.

Все кабели серии Sucoflex обладают высокой фазовой стабильностью в рабочем диапазоне температур, а кабели с плетеной центральной жилой также стабильны при изгибе, что позволяет обеспечить получение достоверных результатов при испытаниях. Для кабеля SF101P изменение фазы при изгибе равно 5° на 18 ГГц (метод тестирования IEC 60966-1, 8.6.2.1, диаметр цилиндра — 35 мм). Основные характеристики кабелей представлены в таблице 3.

Коаксиальные кабельные сборки серий Sucoflex доступны как с большинством стандартных типов соединителей, так и со спе-

циализированными (с подстройкой фазы, укороченной резьбой, усиленные интерфейсы для анализаторов цепей). Конфигурацию сборок, интерфейсы и длину кабеля определяет сам заказчик.

Коаксиальные кабельные сборки серий Sucoflex производятся только на заводах компании Huber+Suhner в Швейцарии и Польше, кабель и соединители как сырье недоступны, что позволяет гарантировать высокое качество выпускаемых кабельных сборок. Для подтверждения высокого уровня заявленных характеристик все сборки Sucoflex проходят тестирование и при поставке сопровождаются протоколом измерений.

### Заключение

Гибкие СВЧ кабельные сборки серий Sucoflex отличаются высокими электрическими и механическими характеристиками и могут применяться как в статических, так и в динамических системах. Продукция серии Sucoflex предназначена для систем с рабочей частотой до 50 ГГц, где предъявляются высокие требования к электрическим параметрам, особенно относительно стабильности и уровня потерь. По устойчивости к механическим и климатическим воздействиям эта продукция превосходит стандартные гибкие кабели. Кабели Sucoflex подходят для использования в составе тестовой и измерительной аппаратуры и находят широкое применение в аэрокосмической и оборонной отрасли. ■

### Литература

1. [www.hubersuhner.com](http://www.hubersuhner.com)
2. RF cables. Каталог компании Huber+Suhner. 2013.
3. Sucoflex 400. Брошюра компании Huber+Suhner. 2013.
4. RF microwave assemblies. Каталог компании Huber+Suhner. 2010.
5. Spaceflight Sucoflex 300. Брошюра компании Huber+Suhner. 2009.

Таблица 3. Основные характеристики коаксиальных кабелей Sucoflex

Тип кабеля	Макс. рабочая частота, ГГц	Затухание на 10 ГГц, дБ/м	Затухание на максимальной рабочей частоте, дБ/м	Емкость, пФ/м	Относительная скорость распространения, %	Задержка, нс/м	Макс. мощность на частоте 18 ГГц, 40 °С, Вт	Мин. статический радиус изгиба, мм	Мин. динамический радиус изгиба, мм	Вес, кг/100 м	Диаметр кабеля, мм
101	50	2	3,5	87	77	4,3	70	11	20	3,6	3,65
101P	50	3	5,5	87	77	4,3	65	11	20	3,3	3,65
102	46	1,7	2,8	87	77	4,3	93	12	20	4	4
103	33	1,3	1,9	87	77	4,3	145	13	22	5,3	4,6
104	26,5	1,1	1,4	87	77	4,3	214	16	25	8,4	5,5
104P	26,5	1,6	2	87	77	4,3	187	16	25	6,9	5,5
106	18	0,8	0,8	87	77	4,3	373	24	40	15,7	7,9
106P	18	1,3	1,3	87	77	4,3	326	24	40	15,8	7,9
301	18	2	2	86,4	77	4,3	70	15	20	2,4	3,5
302	18	1,9	1,9	87,3	77	4,3	93	20	30	2,9	3,7
304	18	1,2	1,2	86,7	77	4,3	214	20	50	4,6	5,4
404	26,5	1	1,2	74,7	89	3,74	100	25	50	7,2	5,55
406	18	0,6	0,6	74,7	89	3,74	200	30	60	14,5	8,35