

Уплотнения из терморасширенного графита: условия безопасного применения в среде жидкого и газообразного кислорода

М.Ю. Белова, начальник исследовательско-аналитической лаборатории производства ТРГ, **О.Ю. Исаев**, начальник производства ТРГ (ЗАО «Новомет-Пермь»), **А.С. Розовский**, ведущий научный сотрудник, **В. М. Смирнов**, ведущий инженер (ОАО «Криогенмаш»)

Общеизвестно, что уплотнения из терморасширенного графита (ТРГ) эксплуатируют при давлении до 40 МПа в контакте с такими рабочими средами, как неорганические газы (воздух до 550 °С, кислород до 350 °С, водяной пар до 650 °С, диоксид углерода до 600 °С, диоксид серы до 300 °С и др.), нефть и нефтепродукты, спирты, кетоны, эфиры, кислоты (органические и неорганические), щелочи, растворы и расплавы солей и т.д.

В последнее время все больший практический интерес вызывают условия безопасного применения уплотнений ТРГ в контакте с кислородом.

Специфической особенностью эксплуатации кислородного оборудования (емкостей, газгольдеров, трубопроводов, компрессоров, арматуры и пр.) является [1] возможность образования горючих и взрывчатых систем, возникающая в результате контакта материалов, использованных при изготовлении деталей, узлов и других элементов кислородного оборудования с газообразным и жидким кислородом или обогащенным кислородом воздухом. Вследствие этого возникают определенные требования, как к самим конструкциям кислородного оборудования, так и к виду применяемых материалов.

Аварии, связанные с кислородным оборудованием, протекают, как правило, в виде взрыва с последующим пожаром. Причиной взрывов обычно является образование систем органические вещества-жидкий кислород (т.н. оксидиквитов). Эти системы возникают либо в результате накопления в жидком кислороде твердых масел или углеводородов, либо при пропитке кислородом (в случае утечек) таких материалов, как дерево, кожа, асфальт, бумага и т.п. Эти системы имеют свойства штатных взрывчатых веществ (ВВ), а иногда даже превосходят их по некоторым параметрам. Они обладают очень высокой чувствительностью к

механическим воздействиям (удар), к воздействию волн сжатия и различных тепловых источников (искра, нагретые тела) [1, 2].

Определяющими факторами опасности (недопустимыми последствиями) применения тех или иных уплотнительных материалов в кислородном оборудовании принято считать возможность травматизма обслуживающего персонала и взрывное разрушение оборудования.

Наиболее опасными считают материалы, способные детонировать в жидком кислороде (давление во фронте детонационной волны может достигать десятков тысяч атмосфер). Однако следует принимать во внимание, что возможность разрушения кислородного оборудования и опасность травматизма в случае детонации будут зависеть от количества вещества (материала), способного детонировать, условий его распределения в оборудовании и прочности самого оборудования. Возможность горения материала в кислороде также является недостаточным условием для вывода об опасности (невозможности) применения.

Применение материала (уплотнения) считают опасным, если при заданных условиях его горение может привести к недопустимым последствиям, оговоренным выше. В остальных случаях принято оценивать вероятность загорания (незагорания) материала и экономическую целесообразность его применения.

Из вышесказанного следует [1, 3], что понятия «возможность детонации», «возможность горения» и понятие «опасность применения в контакте с кислородом» существенно различаются, и эти понятия нельзя отождествлять.

Основные принципы оценки опасности применения материалов в системах, в которых возможен их контакт с газообразным или жидким кислородом, сформулированы в работах [1,3]. Оценку *опасности применения* материалов в том или ином виде кислородного оборудования при существующих в нем условиях обычно производят путем последовательного

изучения возможности горения материалов¹, последствий загорания и вероятности загорания (незагорания) материала.

Возможность горения — необходимое, но не достаточное условие для вывода об опасности (невозможности применения) материала. Если известно, что материал в заданных условиях не способен гореть, то его используют как любой другой негорючий материал. Если же в указанных условиях материал может гореть, то в этом случае возможность или невозможность его применения определяют, оценивая опасность последствий загорания материала. В случае, если последствия загорания недопустимы, материал запрещают использовать в данных условиях и в данной конструкции. Если же последствия загорания допустимы, то проводят оценку вероятности загорания (незагорания) материала.

Предельное давление горения (кислорода) P_{np} , ниже которого горение по материалам не распространяется при поджигании от локального источника, характеризует границу безопасного применения материалов.

P_{np} материалов (уплотнений) зависит от условий их контакта (открытый² или закрытый³) с кислородом и другими элементами конструкции, от толщины уплотнительного элемента и агрегатного состояния окислителя (жидкий или газообразный). Кроме того, в условиях неограниченного доступа кислорода к поверхности исследуемого образца, P_{np} зависит от ориентации образца при горении (вертикальная или горизонтальная), состояния поверхности (гладкая, ворсистая и т.п.), начальной температуры образца и температуры окружающей среды.

Для неметаллических материалов, наиболее широко используемых для изготовления уплотнительных и герметизирующих элементов, большее значение имеет величина предельного давления кислорода при горении в щелях, которая обычно в сотни, тысячи и более раз превышает P_{np} при неограниченном доступе кислорода к поверхности конкретного материала.

Предельное давление кислорода, при котором возможно горение неметаллических материалов в *неподвижных соединениях* в виде достаточно тонких прокладок (зажатых между двумя металлическими поверхностями), зависит от толщины материала. Причем при приемлемых толщинах прокладок P_{np} многих неметаллических материалов настолько высоки, что представляется возможным использовать материалы в условиях, обеспечивающих абсолютную безопасность. Следует отметить, что величины P_{np} значительно уменьшаются в случае разноплотности материала выше допусти-

мой величины, следствием которой является возникновение утечек [1].

Условия применения неметаллических материалов, используемых для изготовления уплотнений для *подвижных (сальниковых) соединений* кислородного оборудования, определяют исходя из величин предельного давления, измеренных при горении материалов различной толщины и формы в щелях. Типы уплотнений для подвижных соединений и типы контакта уплотнения с кислородом приведены в [1, 4].

Энергия зажигания E_z зависит от вида материала, состояния поверхности, давления, температуры и скорости потока кислорода, геометрических размеров образца. Следует отметить зависимость величины энергии зажигания от толщины образца, особенно при малых толщинах (0,1–0,5 мм); при толщине же образцов более 1 мм ее влияние на E_z практически отсутствует [1].

В случае использования материалов при давлении выше предельного (т.е. в условиях, когда горение возможно) необходимо определять *вероятность незагорания* (Π), для оценки которой используют зависимость между энергией зажигания материала (E_z) и вероятностью появления в кислородном оборудовании случайного источника с энергией, равной E_z [3]. Такими источниками, способными привести к воспламенению уплотнительных материалов в оборудовании, работающем с газообразным кислородом, являются открытое пламя и ударные волны, образующиеся при быстром открытии арматуры, соединяющей коммуникации высокого и низкого давления. Для оборудования, работающего с жидким кислородом, в качестве такого источника могут выступать открытое пламя и механический удар.

Чувствительность к воздействию ударных волн (т.н. чувствительностью к «газовому удару») считают минимальное значение p/p_0 (p — давление разрыва диафрагмы, $p_0 = 0,1$ МПа). Эта величина зависит от химического состава, физических свойств, состояния поверхности, структуры материала образца и др. факторов.

Чувствительность к воздействию механического удара (как правило, отношение числа взрывов к общему числу испытаний⁴) зависит от энергии удара, толщины образцов (обратно пропорционально), начального давления кислорода (прямо пропорционально), агрегатного состояния кислорода (в газообразном кислороде эта величина выше, чем в жидком).

Авторами были найдены данные о проведении исследований зарубежными производителями уплотнений с целью определения условий безопасного применения *уплотнительных элементов из терморасширенного графита* в кислородном оборудовании.

⁴ — по некоторым методикам за чувствительность к воздействию механического удара принимают энергию падающего груза, при ударе которого по образцу в определенных условиях происходит хотя бы один взрыв в пяти последовательных опытах, либо максимальную энергию груза, при которой из определенного числа опытов (3-5) получают 100 % отказов.

¹ — как правило, определяя следующие параметры: предельное давление горения (P_{np}); энергию зажигания (E_z); чувствительность к ударным волнам; чувствительность к механическому удару в жидком кислороде и, в случае необходимости, некоторые другие параметры.

² — при неограниченном доступе кислорода к поверхности уплотнения.

³ — уплотнение зажато между металлическими поверхностями, горение происходит в щели.

Например, на сайте корпорации «Union Carbide», производящей графитовые уплотнения «GRAFOIL», размещена информация о проведенных испытаниях, в т.ч. по определению стойкости к механическому удару⁵ в жидком кислороде (удар с энергией 154 Дж) и испытании на взрыв. Для проведения испытания на взрыв сосуд герметизировали уплотнением «GRAFOIL» и заполняли кислородом под давлением 14 МПа. Затем сосуд прогревали до 500 °С. При этом возгорания уплотнения (а следовательно разрушения уплотнения и взрыва) отмечено не было.

По результатам проведенных испытаний для листов (графитового прокладочного материала), сальниковых колец, уплотнительной ленты и ламинированных прокладок были установлены следующие условия эксплуатации (безопасной) в среде жидкого и газообразного кислорода: давление до 14 МПа, температура до 400 °С. Для гофрированной ленты и плетеных уплотнений (сальниковых набивок) рекомендованы следующие условия эксплуатации: давление до 1,4 МПа, температура 60 °С. Отдел Безопасности Подразделения Газов The British Oxygen Company Ltd. (Англия) одобрил применение листов (графитового прокладочного материала) «GRAFOIL» в качестве уплотнительного материала для кислородного оборудования, работающего с газообразным кислородом при давлении до 170 атм. (17 МПа) и температуре 50 °С, а также с жидким кислородом. Кроме того, на сайте приведено множество примеров применения уплотнений «GRAFOIL» в различных типах кислородного и криогенного оборудования различными компаниями.

В 2003 г. специалистами ОАО «Криогенмаш» (г. Балашиха) были проведены испытания образцов графитовых уплотнений производства ЗАО «Новомет-Пермь».

В качестве объектов исследования в этой работе были использованы материалы и уплотнения из ТРГ, представленные в таблице 1.

В стандартных исследованиях для определения условий безопасного применения материалов и уплотнений в контакте с кислородом принято определять условия, в которых они не могут гореть при поджигании от локального источника (в этом случае материалы могут быть приравнены к негорючим, следовательно, их применение является безопасным), и условия, в которых горение возможно (в этом случае уплотнения можно применять с заданной га-

⁵ — по методике Армейской Ассоциации Ракетной Баллистики США.

Таблица 1. Исследуемые материалы и уплотнения

Наименование и марка материала или уплотнения ТРГ	Описание материала или уплотнения ТРГ
Картон ГПМ-1,0/1,0 по ТУ 5728-003-12058737-2000	Графитовый прокладочный материал (картон ТРГ), листовой, однослойный, толщиной 1,0 мм, плотностью 1,0 г/см ³ (применяют для изготовления прокладок)
Лента ГФ-0,48/0,9-10 по ТУ 5728-003-12058737-2000	Лента графитовая шириной 10 мм, полученная методом продольной нарезки фольги ТРГ, гладкая, толщиной 0,48 мм, плотностью 0,9 г/см ³ (самостоятельное уплотнение)
Лента СК-Г-ГФ-0,48/0,9-10 по ТУ 5728-003-12058737-2000	Лента графитовая шириной 10 мм, полученная методом продольной нарезки фольги ТРГ, гофрированная, самоклеящаяся (со слоем безосновного пленочного клея), толщиной 0,48 мм, плотностью 0,9 г/см ³ (самостоятельное уплотнение)
Набивка НГ-Л-6×6 по ТУ 2573-002-12058737-2000	Набивка графитовая сечением 6×6 мм, сплетенная из нитей ТРГ, армированных лавсановыми нитями (самостоятельное уплотнение в виде плетеных колец)
Кольца 00-В-Б-42×30×8 по ТУ 2531-001-12058737-2000	Кольца ТРГ витые пресованные, неармированные, не оснащенные обтюрами, плотностью 1,5-1,7 г/см ³ , размерами: $D_{наружн}=42$ мм, $d_{внутр}=30$ мм, $h=8$ мм (самостоятельное уплотнение)

рантированной вероятностью незагорания в соответствии с требованиями ГОСТ 12.2.052 [4]).

При исследовании условий безопасного применения материалов и уплотнений из терморасширенного графита ЗАО «Новомет-Пермь» в газообразном и жидком кислороде определяли следующие параметры:

- предельное давление горения ($P_{нр}$) материалов и уплотнений, имеющих с кислородом тип контакта 0 (открытый), тип контакта 1 (в неподвижном соединении)⁶ и тип контакта 2 (в подвижном соединении) по ГОСТ 12.2.052;
- энергию зажигания (E_z) от открытого пламени;
- чувствительность к ударным волнам;
- чувствительность к механическому удару в жидком кислороде.

Результаты определения параметров зажигания и горения материалов и уплотнений ТРГ, имеющих открытый контакт с газообразным кислородом представлены в таблице 2, с жидким кислородом — в таблице 3.

Испытания показали, что все исследованные материалы и уплотнения имеют достаточно высокие значения $P_{нр}$ и E_z . Причем в жидком кислороде значения этих параметров выше, чем в газообразном. Кроме того, $P_{нр}$ уплотнительных элементов, имеющих открытый контакт с газообразным (Таблица 2) и жидким (Таблица 3) кислородом, несколько возрастают с увеличением толщины (площади сечения) образцов.

Материалы и изделия ТРГ не воспламенялись при воздействии ударных волн во всем диапазоне перепадов давлений на экспериментальной установке (до 40,0/0,1 МПа) и не были чувствительны к механическому удару в жидком кислороде при воздействии падающего груза с максимальной энергией 115 Дж.

Изменение температуры газообразного кислорода от минус 183 °С (пары жидкого кислорода) до плюс 200 °С незначительно влияло на

⁶ — уплотнения для гладких фланцев и фланцев типа шип-паз и замок.

Таблица 2. Параметры зажигания и горения материалов и уплотнений ТРГ при открытом контакте с газообразным кислородом

Наименование и марка материала или уплотнения ТРГ	Параметры материала или уплотнения ТРГ		Предельное давление горения (P_{np}), МПа	Энергия зажигания (E_z), Дж, при давлении, МПа	
	размеры, мм	плотность, г/см ³		2,0	20,0
ГПМ (картон)	толщ.* 1,0	1,0	0,35	200	90
Лента ГФ	толщ. 0,48	0,9	0,65	220	150
Лента СК-Г-ГФ	толщ. 0,48	0,9	0,50	220	160
Набивка НГ-Л	6×6	1,1	0,70	950	340
Кольцо 00-В-Б	42×30×8	1,5 - 1,7	1,50	1600	600

* – толщина.

Таблица 3. Параметры зажигания и горения материалов и уплотнений ТРГ при открытом контакте с жидким кислородом

Наименование и марка материала или уплотнения ТРГ	Параметры материала или уплотнения ТРГ		Предельное давление горения (P_{np}), МПа	Энергия зажигания (E_z), Дж, при давлении, МПа	
	размеры, мм	плотность, г/см ³		2,0	20,0
ГПМ (картон)	толщ.* 1,0	1,0	1,7	-	650
Лента ГФ	толщ. 0,48	0,9	2,1	-	760
Лента СК-Г-ГФ	толщ. 0,48	0,9	2,1	-	760
Набивка НГ-Л	6×6	1,1	2,4	-	1100
Кольцо 00-В-Б	42×30×8	1,5 - 1,7	3,5	-	1250

* – толщина.

параметры горения материала (Таблица 4). Испытания при более высокой температуре не проводили из-за ограниченных возможностей экспериментальной установки.

По пожаробезопасности в кислороде испытанные материалы и изделия значительно превосходят большинство неметаллических материалов (фторопласты, поликарбонат, полиамиды и др.), применяемых для изготовления уплотнительных элементов кислородной арматуры и фланцевых соединений кислородного оборудования.

Значения P_{np} и E_z уплотнений ТРГ (Таблицы 2, 3) соизмеримы с P_{np} и E_z тонких ($\delta = 0,5-2,0$ мм) уплотнительных элементов из нержавеющей стали. Например [1], для образцов стали X18N10T толщиной 1 мм в жидком кислороде $P_{np} = 0,15$ МПа, а в газообразном кислороде $P_{np} = 2,1$ МПа при толщине образца 1,6 мм; для образцов стали СВО4Х19Н9 толщиной 1 и 2 мм как в газообразном, так и в жидком кислороде $P_{np} = 0,2$ МПа. В то время, как для образцов неметаллических материалов (размером 4×8×120 мм, в горизонтальном положении) величины P_{np} в жидком кислороде значительно выше:

для фторопласта-3 $P_{np} = 6,2$ МПа, для фторопласта-4 $P_{np} = 4,1$ МПа, для паронита $P_{np} = 4,5$ МПа, для пеноасбеста $P_{np} = 3,0$ МПа.

Испытания по определению P_{np} материалов и изделий в условиях, имитирующих работу в качестве уплотнительных элементов фланцевых соединений по ГОСТ 12815 [5] и уплотнителей сальниковых узлов, показали, что образцы графитового прокладочного материала (картона), ленты (фольги) гладкой неармированной и ленты (фольги) гофрированной самоклеящейся, установленные в имитаторах фланцевых соединений, не горели при поджигании от локального источника во всем диапазоне давлений (до 40,0 МПа) как в среде жидкого, так и в среде газообразного кислорода. Применение вышеуказанных уплотнений в исследованных условиях является безопасным.

Образцы набивки НГ-Л и колец витых прессованных,

установленные в имитаторе сальникового уплотнения, при поджигании от локального источника имели $P_{np} = 12,0$ МПа в жидком и $P_{np} = 15,0$ МПа в газообразном кислороде. Расчетные значения вероятности незагорания для набивок и колец при давлениях 20,0 и 40,0 МПа представлены в таблице 5.

Таким образом, использование сальниковой набивки и сальниковых колец в подвижных соединениях является безопасным при давлении жидкого кислорода $P < 12,0$ МПа и давлении газообразного кислорода $P < 15,0$ МПа. При давлениях $P \geq P_{np}$ можно применять эти

Таблица 4. Параметры горения ГПМ (картона) в кислороде при различных температурах (ГПМ толщиной 1,0 мм и плотностью 1,0 г/см³)

Температура кислорода, °С	Предельное давление горения (P_{np}), МПа	Энергия зажигания (E_z), Дж, при давлении, МПа	
		1,0	2,0
-183	0,8	280	240
+20	0,8	250	200
+200	0,7	200	120

Таблица 5. Расчетные значения вероятности незагорания уплотнений ТРГ

Наименование и марка уплотнения ТРГ	Параметры уплотнения ТРГ		Вероятность незагорания в жидком кислороде, не ниже, при давлении, МПа		Вероятность незагорания в газообразном кислороде, не ниже, при давлении, МПа	
	размеры, мм	плотность, г/см ³	20,0	40,0	20,0	40,0
Набивка НГ-Л	6×6	1,1	0,9999998	0,99999945	0,999994	0,999986
Кольцо 00-В-Б	42×30×8*	1,5 - 1,7	0,9999998	0,9999995	0,9999965	0,999991

* – ширина поля кольца 6 мм.

уплотнения в условиях с существующей принципиальной возможностью горения при *вероятности незагорания II*, удовлетворяющей требованиям ГОСТ 12.2.052 ($II \geq 0,999$).

Выводы и рекомендации по применению уплотнений ТРГ в кислородном оборудовании

По пожаробезопасности в кислороде (жидком и газообразном) испытанные материалы и уплотнения из терморасширенного графита значительно превосходят большинство неметаллических материалов, применяемых для изготовления уплотнительных элементов кислородного оборудования.

Параметры горения P_{np} и E_3 исследованных материалов и уплотнений ТРГ соизмеримы с P_{np} и E_3 тонких уплотнительных элементов из нержавеющей стали (см. выше).

Применение прокладок из графитового прокладочного материала (картона ТРГ) марки ГПМ-1,0/1,0, ленты (фольги) ТРГ марки СК-Г-ГФ-0,48/0,9-10 и ленты (фольги) ТРГ марки ГФ-0,48/0,9-10 во фланцевых соединениях кислородного оборудования при давлениях газообразного и жидкого кислорода до 40,0 МПа является *безопасным*.

Набивку графитовую марки НГ-Л-6×6 и кольца ТРГ марки 00-В-Б-42×30×8 можно *безопасно* эксплуатировать в сальниковых уплотнениях кислородного оборудования при давлениях P ниже предельных давлений горения, а именно: при $P < 15,0$ МПа в контакте с газообразным кислородом и $P < 12,0$ МПа в контакте с жидким кислородом.

При давлениях $P_{np} \leq P \leq 40,0$ МПа вышеуказанные материалы можно применять в кислородном оборудовании с *заданной гарантированной вероятностью незагорания* не ниже 0,99999945 в жидком кислороде и не ниже 0,999986 в газообразном кислороде.

Изменение температуры газообразного кислорода от минус 183 до плюс 200 °С незначительно влияет на параметры горения материалов и уплотнений из терморасширенного графита. Это влияние можно не учитывать при использовании уплотнений ТРГ в кислородном оборудовании.

Рекомендации по условиям безопасного применения материалов и

уплотнений из терморасширенного графита в качестве уплотнительных элементов неподвижных (фланцевых) и подвижных (сальниковых) соединений кислородного оборудования приведены в таблицах 6 и 7.

Сравнительные данные по рекомендуемым условиям применения наиболее распространенных неметаллических материалов (по [1]) и уплотнений ТРГ (по Таблицам 6, 7) в непо-

Таблица 6. Установленные условия безопасного применения материалов и уплотнений ТРГ во фланцевых и сальниковых соединениях в газообразном кислороде

Наименование и марка материала или уплотнения ТРГ	Параметры материала или уплотнения ТРГ		Условия применения при давлении, МПа	
	размеры, мм	плотность, г/см ³	менее 15,0	не более 40,0
ГПМ (картон)	толщ. 1,0	1,0	Применение пожаробезопасно (группа «А» по ГОСТ 12.2.052-81)	
Лента ГФ	толщ. 0,48	0,9		
Лента СК-Г-ГФ	толщ. 0,48	0,9		
Набивка НГ-Л	6×6	1,1	Применение пожаробезопасно (группа «А» по ГОСТ 12.2.052-81)	Применение допускается. Вероятность незагорания не ниже 0,999986 (группа «Б» по ГОСТ 12.2.052-81)
Кольцо 00-В-Б	42×30×8	1,5 - 1,7		

Таблица 7. Установленные условия безопасного применения материалов и уплотнений ТРГ во фланцевых и сальниковых соединениях в жидком кислороде

Наименование и марка материала или уплотнения ТРГ	Параметры материала или уплотнения ТРГ		Условия применения при давлении, МПа	
	размеры, мм	плотность, г/см ³	менее 12,0	не более 40,0
ГПМ (картон)	толщ. 1,0	1,0	Применение пожаробезопасно (группа «А» по ГОСТ 12.2.052-81)	
Лента ГФ	толщ. 0,48	0,9		
Лента СК-Г-ГФ	толщ. 0,48	0,9		
Набивка НГ-Л	6×6	1,1	Применение пожаробезопасно (группа «А» по ГОСТ 12.2.052-81)	Применение допускается. Вероятность незагорания не ниже 0,9999945 (группа «Б» по ГОСТ 12.2.052-81)
Кольцо 00-В-Б	42×30×8	1,5 - 1,7		

двигных (закрытого типа) и подвижных (сальниковых) соединениях сведены в таблицы 8 и 9.

Таблица 8. Рекомендуемые условия применения прокладок из неметаллических материалов в соединениях закрытого типа (тип контакта 1 по ГОСТ 12.2.052)⁷, при которых вероятность их воспламенения мала и может не учитываться (температура ±60 °С) [1]

Материал прокладки	Предельно допустимое давление кислорода, МПа, при толщине прокладки, мм			
	4,0	2,0	1,0	0,5
Резины В-14, В-14-1, Н-1, Н-10, Н-24, В-24, ТМ	4,0	5,0	6,0	12
Капрон	6,4	7,5	15	22
Поликарбонат	7,5	10	15	25
Паронит МБП-1, паронит ПОН, клигерит, каугазит	10	12	16,5	22
Фторопласт-4	10	15	42	42
ТРГ (ГПМ, фольга, лента)*	-	-	40**	40**

* — для этих материалов данные (по Табл. 6, 7) приведены для сравнения;
 ** — для больших давлений испытания не проводились; материал пожаробезопасен; температура эксплуатации от минус 183 до плюс 200 °С.

⁷ — фланцевые соединения типа шип-паз и замок.

Таблица 9. Рекомендуемые условия применения подвижных (сальниковых) уплотнений (тип контакта 2 по ГОСТ 12.2.052)⁸, при которых вероятность их воспламенения мала и может не учитываться (температура ± 60 °С) [1]

Материал прокладки	Предельно допустимое давление кислорода, МПа, при диаметре d^* жгута, из которого изготовлено кольцо, или ширине поля δ^* кольца, мм, не более			
	4	6	7	10
Резины В-14, В-14-1	4,0	-	3,0	1,6
Капрон, фенилон, фторопласт-3	6,4	-	4,5	3,5
Поликарбонат	7,5	-	5,0	4,0
Фторопласт-4	10	-	7,5	6,4
Набивка АСТ, материал АСФ	42	-	36	25
Кольцо ТРГ 00-В-Б **	-	40 ***	-	-
Набивка НГ-Л **	-	40 ***	-	-

* — обозначения приведены в соответствии с ГОСТ 12.2.052 и [4], поясняющий эскиз приведен там же;
 ** — для этих материалов данные (по Табл. 6, 7) приведены для сравнения;
 *** — для больших давлений испытания не проводились; температура эксплуатации от минус 183 до плюс 200 °С; условия безопасного применения: при P менее 15,0 и 12,0 МПа в контакте с газообразным и жидким кислородом соответственно.

⁸ — подвижные (сальниковые) или неподвижные соединения с зазором не более 0,5 мм.

Следует отметить, что для соединений открытого типа (гладкие фланцы) рекомендуемые значения $P_{пр}$ несколько меньше [1].

Библиографический список:

1. Иванов Б.А. Безопасность применения материалов в контакте с кислородом. М.: Химия, 1984. 272 с.
2. Беляев А.Ф. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных веществ. М.: Наука, 1968. 256 с.
3. Иванов Б.А., Розовский А.С. Безопасность работы с жидким кислородом. М.: Химия, 1989. 192 с.
4. ГОСТ 12.2.052–81. ССБТ. Оборудование, работающее с газообразным кислородом. Общие требования безопасности. ИПК Изд-во стандартов, 2001.
5. ГОСТ 12815–80. Фланцы арматуры, соединительных частей и трубопроводов. ИПК Изд-во стандартов, 1997.