

# Композиционные материалы на основе фторопласта с полимерным и комплексным наполнителем для компрессоров и насосов без смазки

К.Ю. Зерщиков (ООО «Константа-2», г. Волгоград),  
А.Ю. Галкин, Р.Р. Шехмамиев (АО «Транспневматика», г. Первомайск)

Проведены исследования свойств новых полимер-полимерных композитов на основе фторопласта и композитов с комплексным наполнением для применения в качестве уплотнений в бессмазочных компрессорах. Натурные испытания в составе компрессорного агрегата показали эффективность применения разработанного материала.

**Ключевые слова:** уплотнения, фторопласт, полиэфирэфиркетон, композиционный материал, компрессор без смазки.

**PTFE based composite materials with polymer fillers for compressors and pumps without lubrication.**

Zerschikov K. U («Constanta-2» LLC, Volgograd),

Galkin A. U., Shekhmamiyev R. R. (YSC «Transpneumatica», Pervomaysk)

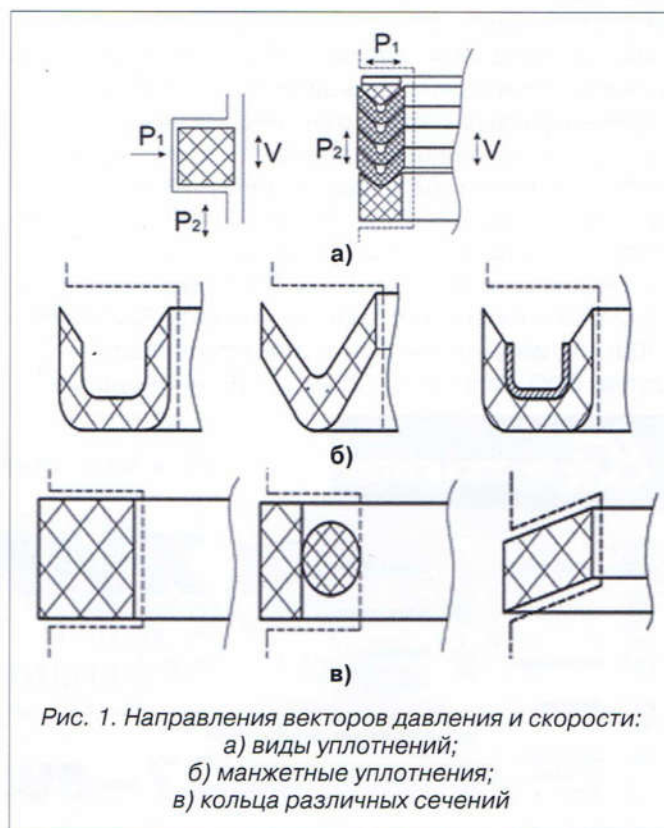
The investigation of of physical and mechanical properties of PTFE based composite materials with polymer fillers for compressors and pumps without lubrication is fulfilled. The testing of new seals in compressor shows good effect of their application.

**Keywords:** seals, PTFE, PEEK, composite material, compressors without lubrication.

Среди всего разнообразия насосных и компрессорных агрегатов бессмазочные аппараты занимают особое место. Как правило, это поршневые машины. Они используются для подготовки сжатого воздуха в различных отраслях: сжижения газов, перекачивания и нагнетания разнообразных агентов, начиная от нейтральных и заканчивая агрессивными. Особый интерес компрессоры и насосы без смазки представляют для химической, кислородной, фармацевтической, криогенной техники, как с точки зрения получения качественного продукта, так и более высокой экономичности.

Особенность работы уплотнений в этих устройствах заключается в высоких и быстро изменяющихся значениях скорости движения  $v$  и давления  $p$ , что определяет высокие значения  $pv$  фактора и вызванный этим разогрев, в присутствии трения и износа при возвратно-поступательном движении герметизируемых поверхностей (рис.1 а). Уплотнение находится под действием двух сил: давления среды и контактного давления прижатия к сопрягаемым поверхностям при наличии взаимного перемещения с переменным направлением векторов скоростей и давлений, действующих на уплотнение. Такой характер сопряжения вызывает сложное напряженное состояние в материале уплотнения. И это происходит без интенсивного охлаждения уплотнения, вызванного отсутствием смазки.

Отмеченные выше, особенности работы уплотнений определяют основные требования к материалам





и конструкции уплотнительных узлов. Еще в работе [1] отмечалось, что трудность проектирования узла уплотнения, работающего при высоких переменных нагрузках и температурах, связана с применением в нем неметаллических самосмазывающихся материалов, которые имеют высокую эластичность, низкую теплопроводность, высокий КТЛР, способность экструдироваться в зазор между поршнем и цилиндром. Установлено, что принцип действия самосмазывающихся материалов состоит в образовании пленки материала на поверхности контртела, поэтому помимо удельного давления, скорости скольжения, температуры решающее значение при сухом трении имеют адгезионные свойства материалов пары трения и их способность образовывать на поверхности пленки, адсорбировать газы, жидкости. Кроме того, надежная работа уплотнения в большой степени зависит от износостойкости материала [1].

Как было показано ранее [2], оптимальный материал для уплотнения должен иметь невысокую твердость, высокую прочность и модуль упругости, высокую теплостойкость, низкий коэффициент трения, малую ползучесть, низкий коэффициент термического линейного расширения (КТЛР), обладая при этом высокой химической стойкостью. Несложно заметить, что требования, предъявляемые к уплотнительным материалам, довольно разнообразны и подчас взаимоисключающи. Сложно совместить невысокую твердость и высокую эластичность с высокими прочностными показателями и все это с агрессивной стойкостью. Тем важнее задача поиска новых материалов, удовлетворяющих этим задачам, особенно при герметизации подвижных соединений.

Кроме того, важно понимать, как те или иные физико-механические и другие свойства материала влияют на работоспособность уплотнений. Поскольку для подвижных соединений необходим быстрый переход напряжений одного знака в противоположные, материалы для уплотнения должны обладать высокой эластичностью, то есть низкой энергией релаксации для поддержания герметичности. Помимо этого, для компрессоров и насосов актуальна высокая прочность и термостойкость для противодействия повышенным температурам и давлениям. Опираясь на опыт разработки материалов для уплотнений, в таблице 1 предложено сопоставление физико-механических свойств материалов с характеристиками, определяющими основные показатели работоспособности уплотнений в подвижных соединениях. Приведенные данные позволяют, исследуя обозначенные свойства материалов, делать как минимум качественные заключения об их работоспособности и сравнивать эффективность применения различных материалов.

Основные свойства материалов, определяющие эксплуатационные характеристики уплотнений подвижных соединений

Таблица 1

Характеристики уплотнения	Свойства материала
Герметизирующая способность	Твердость
	Относительное удлинение при разрыве
Максимальное рабочее давление	Прочность при разрыве
	Предел текучести при сжатии
	Модуль упругости при сжатии
Диапазон температур эксплуатации	Предельные рабочие температуры
Ресурс эксплуатации	Коэффициент трения, износостойкость

В насосных и компрессорных агрегатах применяются уплотнения различных типов и конструктивно-го исполнения, но все это многообразие сводится к двум типам: кольцам прямоугольного сечения (рис. 1а) и манжетам (рис. 1б). Так, для компрессоров небольшой производительности и невысокого выходного давления и насосов рационально использовать манжетные уплотнения. Для компрессоров высокого давления применяют кольца, как правило, прямоугольного сечения, часто подпружиненные эспандерами различной формы для увеличения контактного давления.

В свое время было разработано большое количество полимерных композитов для компрессорных агрегатов. Одной из основных матриц для этих материалов был фторопласт, что объясняется, в первую очередь, низким коэффициентом трения, химической устойчивостью, практически, ко всем рабочим средам и способностью не охрупчиваться при низких температурах. Также широкое применение фторопласта 4 для изготовления уплотнений бесшмазочных агрегатов обусловлено его низкими адгезионными свойствами и способностью образовывать на поверхности контртела пленки с низкими адсорбирующими свойствами. В то же время, наличие известных недостатков, среди которых невысокая прочность, низкая теплопроводность, высокий коэффициент термического линейного расширения снижает эффективность его применения и стимулирует поиск вариантов модификации его свойств.

Известны фторопластовые композиты с различными наполнителями неорганического происхождения, однако, для компрессоров без смазки лучшие эксплуатационные характеристики показали композиты фторопласта с углеволокном. Согласно данным



[1] композиция фторопласта Ф-4 с 20% углеволокна имеет наименьшую интенсивность износа среди всех фторопластовых композитов и может работать при перепаде давления до 20 МПа, при большем в 2 раза давлении, чем наиболее распространенная композиция с коксом Ф4К20.

Введение жестких наполнителей во фторопласт увеличивает его прочность и жесткость, повышая рабочие характеристики, в первую очередь, температуру и давление, но одновременно их введение снижает эластичность уплотнений и их герметизирующую способность, а также увеличивает износ сопрягаемых поверхностей. Кроме того, жесткие наполнители, располагаясь на поверхности, являются каналами утечек. Известно также, что снижение пластичности материала уплотнения отрицательно сказывается на эксплуатации при низких температурах.

Компромисс между прочностью и пластичностью видится в модификации фторопластовой матрицы полимерами, обладающими высокими прочностными показателями, но имеющими меньшую твердость и жесткость. Имеющиеся данные позволяют предполагать, что они усилят фторопластовую матрицу за счет межмолекулярного взаимодействия или взаимодиффузии макромолекул и их высокой гибкости, и в то же время не будут снижать эластичность композиции, не будут образовывать на поверхности каналов утечек и, обладая значительно меньшей по сравнению с неорганическими наполнителями твердостью, увеличат показатели герметичности и снизят износ поверхности контртела.

Возможности такой модификации обозначились с появлением на рынке термостойких полимеров, таких как полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), полифениленсульфид (ПФС), полиимид (ПИ), полисульфон (ПСФ) [3]. Эти полимеры, обладают высокой прочностью и модулем упругости, но невысокой пластичностью и высокой твердостью, что снижает их герметизирующие возможности. Их применение в качестве материалов для уплотнений позволяет поднять параметры работы оборудования, в первую очередь, давление и температуру, но требует специальных мер для обеспечения надлежащих показателей герметичности. Кроме того, они обладают высоким коэффициентом трения скольжения. Поэтому представляется логичной разработка композиционных материалов на основе фторопласта в сочетании с этими полимерами, тем более, что сопоставимые теплофизические характеристики этих материалов позволяют совместно перерабатывать их для получения композитов с новыми свойствами.

Поскольку фторопластовые материалы с полимерными наполнителями не применяли в компрессорной технике, представляет интерес исследовать

их свойства, определяющие работоспособность агрегатов. Данная работа посвящена разработке и исследованию новых композиционных материалов на основе фторопласта с полимерным и комплексным наполнением для применения в компрессорах и насосах без смазки. В качестве модификаторов свойств использовали порошковый полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) и измельченное углеволокно (УВ).

Как было показано ранее, лучшие характеристики в компрессорах без смазки наблюдали при использовании уплотнений из Ф-4+20% УВ, поэтому для адекватной оценки свойств новых композиций Ф-4+ПЭЭК провели сравнение физико-механических свойств этих композитов. На рисунках 2 и 3 показаны кривые растяжения композитов Ф-4 с углеволокном и полиэфирэфиркетонном при разных соотношениях компонентов. Анализ графиков на рис. 2 показывает, что замена УВ на ПЭЭК в композитах с 10% объемным содержанием наполнителей приводит к некоторому снижению модуля упругости, прочности и относительного удлинения при разрыве. Результаты испытаний показывают, что максимальной прочностью 28 МПа обладают композиты, содержащие 10% УВ, тогда как прочность композитов с комплексным наполнением ПЭЭК и УВ находится на уровне 24 МПа, а композиция с 10% полиэфирэфиркетона показывает чуть меньшую прочность - 22 МПа. Величина относительного удлинения при разрыве находится в пределах 270-300%, что ниже показателя для ненаполненного материала — 350-400%, однако, показывает, что пластичность материала остается высокой.

Несколько иная тенденция наблюдается при увеличенном до 20% содержании наполнителей (рис.3). Видно, что при суммарном содержании 20% композиты с разными наполнителями имеют, практически, одинаковые деформационно-прочностные характеристики: прочность при растяжении в пределах 18-19 МПа, предел текучести — 12-13 МПа и относительное удлинение при разрыве 230-240%.

Как видно, композиты с одинаковым объемным содержанием наполнителей обладают примерно одинаковыми свойствами, однако, наблюдается четкая тенденция к снижению прочности и относительного удлинения при разрыве с увеличением количества наполнителя. Прочность снижается с ростом величины наполнения с 28 до 24 и затем до 20 МПа при увеличении наполнения от 0 до 10 и затем 20%, причем, независимо от природы и свойств наполнителя. Аналогичное поведение наблюдается у относительного удлинения при разрыве: оно снижается с 380 до 230% при изменении наполнения от 0 до 20%. Это вызвано слабым адгезионным взаимодействием матрицы и наполнителей, что объясняется низкой адгезионной активностью фторопласта. В то же вре-



мя, предел текучести растёт с 8 до 10-11 и затем до 12-13 МПа с увеличением содержания наполнителей от 0 до 20%. Модуль упругости увеличивается со 130 до 220 МПа с ростом содержания наполнителей в результате снижения подвижности макромолекул вблизи поверхности наполнителя.

Таким образом, наблюдается, практически, одинаковое изменение свойств композитов при введении УВ или ПЭЭК во фторопластовую матрицу: несколько снижаются прочность и пластичность, ввиду снижения ее сечения, воспринимающего нагрузку при возрастании модуля упругости и предела текучести при растяжении в результате упрочнения при введении жестких наполнителей. При этом композиты фторопласта с ПЭЭК, практически, не уступают по прочностным показателям лучшим по эксплуатационным характеристикам композитам с углеволокном.

Наличие углеродных материалов во фторопластовой матрице приводит к появлению зависимости рабочих характеристик композитов – коэффициента трения, износостойкости от влажности перекачиваемой среды [1]. Это обусловлено физико-химическими свойствами углеродных наполнителей и характером их взаимодействия с матрицей. Композиты с ПЭЭК отличаются от УВ не только меньшей жесткостью, но и инертностью к влаге и газам. Это вызвано тем, что в процессе спекания может наблюдаться взаимодиффузия Ф-4 и ПЭЭК, которая увеличивает взаимодействие между компонентами даже в отсутствие химических связей. Эти факторы приводят к снижению водопоглощения по сравнению с композитами, содержащими УВ в несколько раз. Так величина водопоглощения за 24 ч при 25°C композитов, содержащих 20% УВ находится на уровне 0,2-0,3%, тогда как композиты с 20% ПЭЭК имеют нулевое водопоглощение. С увеличением температуры испытаний до 90°C водопоглощение угленаполненных композитов возрастает до 0,4-0,5%, в то время у композитов с ПЭЭК оно остается нулевым. Поэтому введение ПЭЭК во фторопластовую матрицу, в отличие от углеродных материалов, не приводит к влиянию влажности на поведение уплотнений: износ и коэффициент трения.

Как было отмечено выше, коэффициент трения скольжения является одним из основных показателей, определяющих работоспособность уплотнений. Поскольку динамические коэффициенты трения скольжения находятся в соответствии со статическими, кроме того, на их величину влияет большое количество эксплуатационных и конструктивных факторов, чтобы получить некоторые начальные оценки определяли статические коэффициенты трения скольжения всех исследованных материалов. Коэффициенты трения покоя всех исследованных матери-

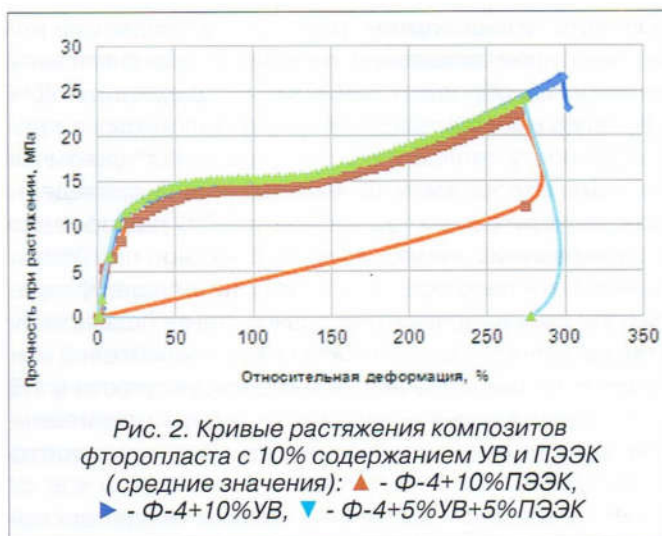


Рис. 2. Кривые растяжения композитов фторопласта с 10% содержанием УВ и ПЭЭК (средние значения): ▲ - Ф-4+10%ПЭЭК, ▶ - Ф-4+10%УВ, ▼ - Ф-4+5%УВ+5%ПЭЭК

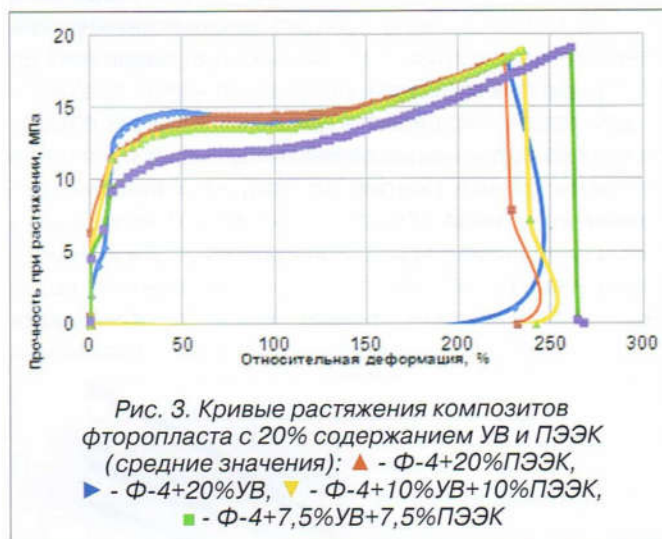


Рис. 3. Кривые растяжения композитов фторопласта с 20% содержанием УВ и ПЭЭК (средние значения): ▲ - Ф-4+20%ПЭЭК, ▶ - Ф-4+20%УВ, ▼ - Ф-4+10%УВ+10%ПЭЭК, ■ - Ф-4+7,5%УВ+7,5%ПЭЭК

алов находятся в пределах 0,08-0,12 при содержании наполнителей 10% и 0,11-0,15 при 20% наполнении. Это свидетельствует о высоких антифрикционных показателях, разработанных композиций и их потенциально высоком ресурсе в поршневых машинах.

Ввиду отмеченных ранее особенностей эксплуатации уплотнений в поршневых машинах, важно понимать поведение материалов при повышенных температурах и нагрузках. Для этого исследовали прочность при сжатии композитов при температуре 200°C. На рис. 4-6 представлены кривые сжатия композитов фторопласта с углеволокном и полиэфирэфиркетонам.

Как видно из рисунка 4 прочность при сжатии неоднозначно изменяется при введении полимерного наполнителя. Наибольшим сопротивлением деформации сжатия характеризуется композит с 10% содержанием ПЭЭК, тогда как увеличение содержания наполнителя до 20% приводит к разупрочнению фторопластовой матрицы. При модификации фто-



ропласта углеволокном (рис. 5) наблюдается несколько иное поведение композита: максимальной прочностью обладают композиты, содержащие 20% УВ, тогда как 10% наполнение углеволокном не привело к росту теплостойкости и материал идентичен чистому фторопласту Ф-4. В таблице 2 приведены модули упругости и прочность при 5% деформации исследованных композитов. Как видно, при повышенной температуре композиты на основе фторопласта имеют невысокие прочностные показатели. Тем не менее, введение жестких наполнителей позволяет поднять прочность и модуль упругости в 1,5 раза. Как и в испытаниях на растяжение максимальные значения прочности наблюдаются у композитов Ф-4+10%ПЭЭК и Ф-4+20%УВ.

На основании полученных данных можно заключить, что композиты, содержащие 10% ПЭЭК или 20% УВ могут применяться для изготовления уплотнений компрессоров, работающих при давлениях до 4 МПа при температурах внутри цилиндров до 200°C.

Для сравнения свойств новых композиций с некоторыми из применяемых в настоящее время, на рис.6 показаны кривые сжатия, исследуемых материалов, а также композита «Констафтор 300С», содержащего стекловолокно и графит общим количеством 20% объемных и импортной композиции фторопласта с полиэфирными волокнами фирмы «Polis» [4]. Как видно,

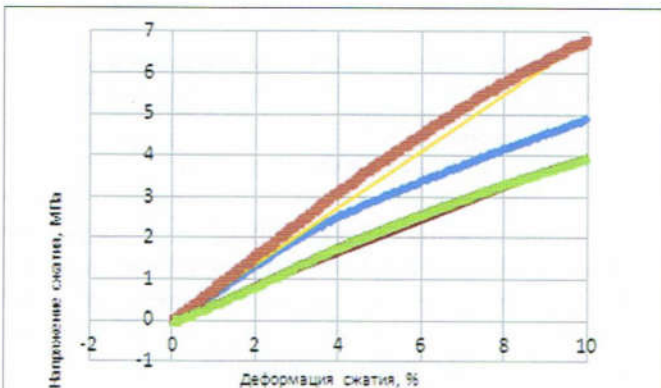


Рис. 4. Кривые сжатия композитов фторопласта с полиэфирэфиркетонном при 200°C (средние значения):  
 ► - Ф-4+20% ПЭЭК, ▼ - Ф-4+10% ПЭЭК, ▲ - Ф-4

Характеристики сжатия композиционных материалов при 200°C Таблица 1

Характеристика	Ф-4 +10% ПЭЭК	Ф-4 +20% ПЭЭК	Ф-4 +10% УВ	Ф-4 +20% УВ	Ф-4
Модуль упругости, МПа	80	45	60	90	60
Прочность при 5%-ой деформации, МПа	4	2,3	3	4,5	3

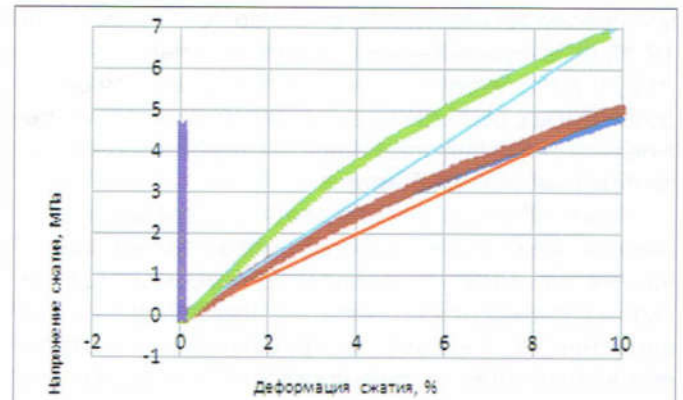


Рис. 5. Кривые сжатия композитов фторопласта с углеволокном при 200°C (средние значения):  
 ► - Ф-4, ▲ - Ф-4+10% УВ, ◀ - Ф-4+20%УВ

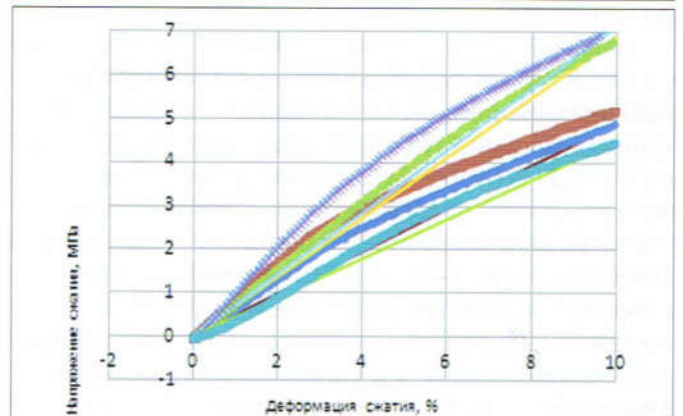


Рис. 6. Кривые сжатия композитов фторопласта с углеволокном при 200°C: ► - Ф-4, ▼ - Ф-4+10% ПЭЭК, ▲ - Констафтор 300С, ◀ - Ф-4+20%УВ, ● - композиция фирмы «Polis»

композиции с углеволокном и полиэфирэфиркетонном имеют лучшие показатели прочности при повышенной температуре и сохраняют большую жесткость, то есть могут работать при больших давлениях.

На основе проведенных исследований можно утверждать, что полная или частичная замена углеволокна на ПЭЭК во фторопластовых композитах не снижает их рабочие характеристики, в то же время, нивелируя зависимость ресурса уплотнения от характеристик перекачиваемых сред, следовательно, позволит создавать более эффективные компрессорные и насосные агрегаты. Проведенные исследования позволили разработать новый композиционный материал «Констафтор ИП», предназначенный для использования в уплотнительных узлах с возвратно-поступательным или вращательным движением.

Для оценки работоспособности полученного материала в реальных уплотнительных узлах были изготовлены манжетные уплотнения поршня, аналогичные, показанным на рис. 1б, для установки в компрессорный бесшмазочный агрегат. Для сравнения ис-



пытавали манжеты, изготовленные из композиции фторопласта со стекловолокном и графитом «Констафтор 300С». Средняя скорость поршня с манжетой составила 1,87 м/с (материал цилиндра – латунь ЛС-59). Максимальная температура сжатого воздуха при верхнем пределе температуры в процессе испытаний была  $T=179$  °С. Провели ресурсные испытания компрессорного агрегата в нормальных условиях при повторно-кратковременном режиме работы (ПВ 50%) в течение 1226 часов (данная наработка расчётно соответствует 2 годам эксплуатации). При этом манжета сохраняла работоспособность и компрессор выдавал нормативное давление 7 атм. Измерения размеров и веса манжеты после испытаний показали отсутствие износа: размеры, измеренные с точностью 0,02 мм, не изменились, вес манжеты, измеренный с точностью до 0,01г - также без изменений. Дополнительно проводились испытания работоспособности манжет в климатической камере при температуре от -50 до +65 °С. Они показали, что компрессор с манжетой из «Констафтор ИП» при отрицательных температурах набирает давление в течение регламентируемого времени, тогда как с манжетой из «Констафтор 300С» не набирает давление. По-видимому, из-за уменьшения размеров, низкой эластичности и малого коэффициента трения манжета не обеспечивает достаточное контактное давление, не разогревается, не становится эластичной и не обеспечивает герметичности соединения. Таким образом, результаты натурных испытаний подтверждают, полученные в экспериментах, данные о высоких эксплуатационных характеристиках материалов, содержащих ПЭЭК.

Специальных исследований коррозионной стойкости композитов не проводили, однако, поскольку, все входящие в исследованные композиты материалы химически стойки, практически, во всех коррозионноактивных средах, можно с большой степенью достоверности утверждать, что полученные композиционные материалы также обладают высокой устойчивостью к различным агрессивным агентам, следовательно, могут применяться вне зависимости от перекачиваемых сред. Это важное заключение, поскольку агрессивность является одним из важнейших требований, предъявляемых к уплотнительным материалам.

Помимо поршневых уплотнителей в насосных и компрессорных агрегатах используются уплотнения штока, упругие элементы для поддержания контактного давления, уплотнения крышек. Традиционно для герметизации этих соединений использовались кольца круглого сечения, манжеты, прокладки из резины. В настоящее время появились новые решения, которые позволяют реализовать, недостижимые ранее, характеристики по температуре эксплуатации, агрессивностойкости, коэффициенту трения, сроку

службы. На рисунке 7 показаны примеры уплотнений, которые призваны заменить резиновые уплотнители и рекомендуются к применению при температурах до 250°С, давлениях до 50 МПа, работающие, практически, во всех средах.

Например, в торцевых уплотнениях насосов, при воздействии агрессивных сред и высоких температур до 250°С, хорошо зарекомендовали себя комбинированные уплотнения - резино-фторопластовые кольца РФК (рис. 7а), которые позволяют сохранять высокий и стабильный уровень контактного давления в сопряжении, наряду, за счет резинового сердечника, с низким коэффициентом трения за счет сплошной фторопластовой оболочки. Это позволяет применять их при скоростях взаимного перемещения до 3-5 м/сек при отсутствии смазки и давлении до 25 МПа. Помимо этого, они могут применяться как эспандеры в различных комбинированных уплотнениях.

По оценкам западных экспертов, хорошо зарекомендовали себя при эксплуатации в агрессивных средах, в условиях декомпрессии, при эксплуатации в средах с большими концентрациями сероводорода при давлении до 50 МПа манжеты с подпружинивающим элементом МПЭ [5] (рис. 7б). Манжеты успешно применяются в пищевой и фармацевтической промышленности, поскольку, материалы, используемые в манжетах — фторопласт и нержавеющая сталь имеют соответствующие сертификаты.



Рис. 7. Уплотнения для экстремальных условий эксплуатации

Таким образом, за счет появления новых композиционных материалов и комбинированных уплотнителей, появились возможности для расширения областей применения и диапазонов эксплуатации, увеличения межремонтных периодов бессмазочных насосно-компрессорных агрегатов.

#### Список литературы

1. Новиков И.И., Захарченко В.П., Ландо Б.С. Бес-смазочные поршневые уплотнения в компрессорах. Л.: Машиностроение, 1981.- 238с.
2. Зерщиков К.Ю., Семенов Ю.В. и др. Полимерные уплотнения для экстремальных условий эксплуатации, Трубопроводная арматура и оборудование, №3 (30) 2007. - С. 55-56
3. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. М.: Профессия, 2012.- 480с.
4. www.polisweb.it
5. www.seals.saint-gobein.com