

К.Ю. Зерщиков, ООО «Константа-2»
А.С. Елкин, Сколковский институт науки и технологий

РАСЧЁТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ УПЛОТНЕНИЙ

Как известно, под уплотнением понимают элемент или совокупность элементов, обеспечивающих разделение различных сред. Уплотнения, занимая малую часть физического объема оборудования и составляя незначительную часть стоимости (как правило, несколько процентов), играют ключевую роль в обеспечении параметров его работы.

Основными характеристиками, определяющими работоспособность уплотнений, являются их прочность под воздействием внешних силовых факторов, в первую очередь давления среды, герметизирующая способность, задаваемая величиной пропуска в единицу времени, и долговечность – способность сохранять прочность и герметичность в течение заданного периода времени. Наличие большого количества классов и типов уплотнений, применение различных материалов, сложность и многофакторность процессов, происходящих в уплотнительных узлах, обуславливают необходимость алгоритмизации этих процессов и применения математического моделирования для их описания. На **рис. 1** представлен один из алгоритмов, используемый при выборе материалов в процессе проектирования уплотнительных узлов. Он подразумевает расчет напряженно-деформированного состояния

уплотнения и определение наиболее опасных сечений. Выбор материала, кроме того, обусловлен условиями эксплуатации и требованиями к герметичности.

В настоящее время существуют или активно разрабатываются методики расчета напряжений и деформаций различных типов уплотнений [1, 2]. Чаще для этих целей применяют программные продукты с использованием метода конечных элементов. Использование приведенного алгоритма и метода конечных элементов для расчета напряженно-деформированного состояния позволяют существенно ускорить проектирование и в то же время обеспечить достаточную для инженерных задач точность. В сочетании с экспериментальными исследованиями это гарантирует адекватность решений в условиях многофакторности процессов, происходящих в уплотнительных узлах. Данный метод позволяет не только рассчитывать напряженно-деформированное состояние уплотнения, но и производить моделирование различных состояний в режиме параметризации.

Манжета с подпружинивающим элементом (МПЭ) представляет собой сочетание полимерной оболочки, как правило U-образной формы, выполняющей функцию контактного уплотнения, и установленного в нее подпружинивающего компонента, создающего начальное контактное давление на кромках оболочки и поддерживающего его при изменяющихся условиях. Поскольку для различных условий эксплуатации и давлений требуется создавать разное начальное контактное давление, конфигурации и геометрия используемых оболочек и подпружинивающих элементов могут быть разнообразными (**рис. 2**). Поэтому рассмотренный подход был применен при разработке метода проектирования манжет с подпружинивающим элементом (МПЭ).

В арматуростроении манжеты начинают находить все большее применение. Так, они применяются для уплотнения подвижных седел в корпусах шаровых кранов с пробкой

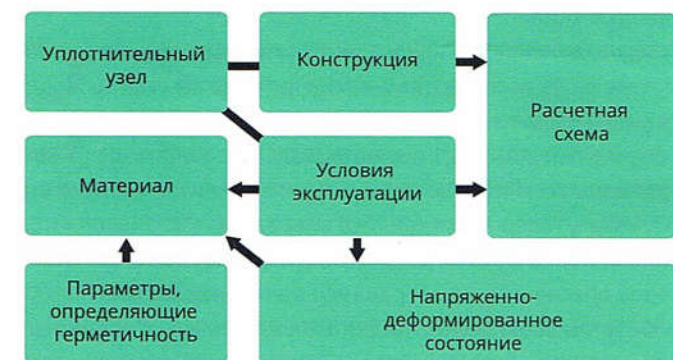


Рис. 1. Алгоритм подбора материала для уплотнения



Рис. 2. Варианты исполнения МПЭ

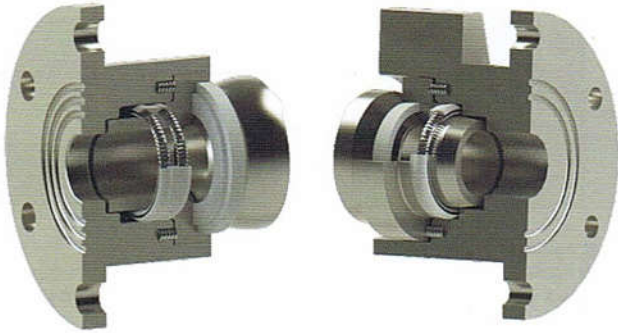


Рис. 3. Применение МПЭ для герметизации седел шаровых кранов

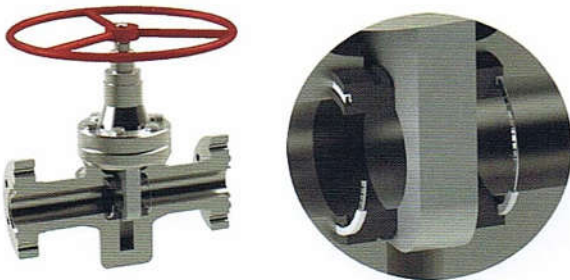


Рис. 4. Применение МПЭ в конструкции шиберного затвора

в опоре, в том числе двойного действия (рис. 3), для уплотнения седел шиберных затворов (рис. 4), для уплотнения штоков, отвечающих самым строгим требованиям безопасности в различных типах арматуры (рис. 5), уплотнений поршня и цилиндра в гидро- и пневмоприводах, в качестве неподвижных уплотнений крышек клапанов и затворов. Есть примеры их использования в качестве основного уплотнителя в шаровых кранах и дисковых затворах с эксцентриситетом. Широкое применение они находят в уплотнении подвижных соединений насосного и компрессорного оборудования. Это обусловлено их малыми габаритными размерами, высокой стойкостью против коррозионных сред, возможностью в широких пределах варьировать их свойства, применяя различные материалы оболочек и подпружинивающие элементы, реализацией в конструкции эффекта самоуплотнения, стойкостью в экстремальных условиях эксплуатации: при высоких и криогенных температурах, давлениях, скоростях взаимного перемещения.

В работах [3, 4] были экспериментально установлены некоторые закономерности, определяющие свойства МПЭ. Так, было показано влияние свойств материала и подпружинивающего элемента на контактное давление. В данном исследовании рассмотрены возможности расчетного определения напряженно-деформированного состояния как основной характеристики, определяющей прочность манжет. Исследуется

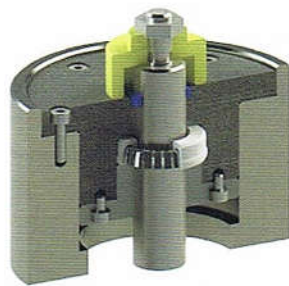


Рис. 5. Уплотнение штоков с использованием МПЭ

также одна из ключевых характеристик, от которой зависит герметичность сопряжения, – контактное давление.

Расчеты выполняли методом конечных элементов в программном комплексе Abaqus. Было принято, что все материалы – идеально упруго-пластичные, т.е. нет упрочнения, максимальные напряжения ограничены пределом текучести. Расчет представляет собой контактную задачу, выполненную методом конечных элементов в двумерной постановке. Общий вид модели представлен на рис. 6. Модель состоит из оболочки манжеты, пружины, прямоугольных блоков, имитирующих глубину канавки. Между поверхностями задан контакт, исключающий взаимное проникновение элементов модели друг в друга. Расчет задачи – нелинейный, минимальный размер конечных элементов (сетки) составляет 0,025 мм для пружин и 0,1 мм для оболочки. Оболочка манжет изготовлена из фторопласта или полиэфирэфиркетона, пружина – из стали. Поскольку контактное давление и напряженно-деформированное состояние являются основными показателями, определяющими герметичность и прочность уплотнения, расчет методом конечных элементов производили для этих характеристик.

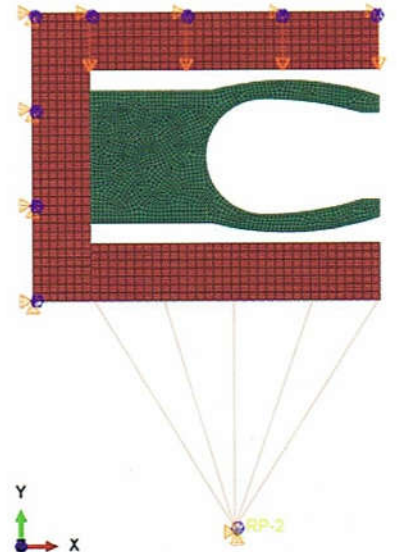


Рис. 6. Общий вид расчетной модели

На рис. 7, а, 7, в приведены расчеты контактных давлений, на рис. 7, б, 7, г – эквивалентных напряжений по Мизесу в манжетах при варьировании толщины оболочки с 0,3 до 0,6 мм. Как видно, контактное давление немного увеличивается с ростом толщины оболочки – с 15,9 МПа до 17,3 МПа. Это свидетельствует о незначительном влиянии этой геометрической характеристики на контактное давление в соединении. Эквивалентные напряжения практически не меняются при изме-

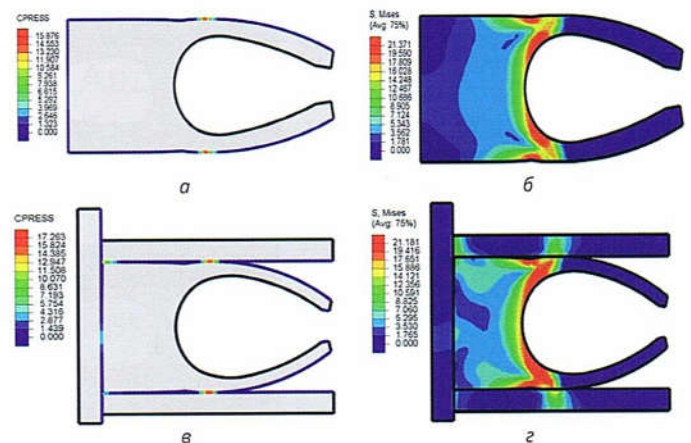


Рис. 7. Контактные давления (а, в) и эквивалентные напряжения (б, г) при изменении толщины оболочки из фторопласта от 0,3 мм (а, б) до 0,6 мм (в, г)

нении толщины оболочки. Максимум напряжений расположен в области перехода к кромкам и несколько превышает предел текучести материала манжеты, что может благоприятно сказываться на герметичности.

На рис. 8, а показано контактное давление, на рис. 8, б – эквивалентное напряжение в оболочке из полиэфирэфиркетона. Сравнение рис. 7, а, б и 8, а, б показывает, что и контактные давления, и эквивалентные напряжения существенно растут с увеличением физико-механических свойств материала оболочки, в первую очередь жесткости. Очевидно, что рост контактного давления приведет к улучшению герметичности, но одновременно интенсифицируется изнашивание, поэтому требуется аккуратно подходить к выбору материала для оболочки.

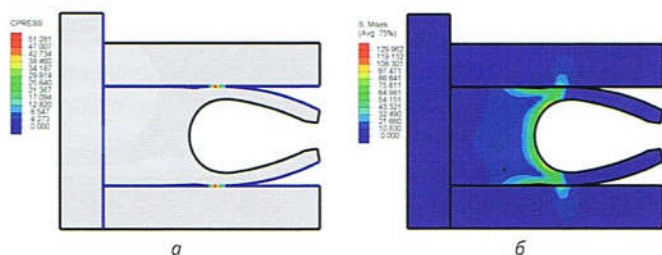


Рис. 8. Контактное давление (а) и эквивалентное напряжение (б) в манжете с оболочкой из полиэфирэфиркетона

До этого мы рассмотрели влияние геометрии и свойств материала оболочки на контактное давление, создаваемое манжетой в канавке, и возникающие в материале манжеты внутренние напряжения. При установке пружины в оболочку из фторопласта, как видно при сравнении рис. 7, а, и рис. 9, а, максимальное контактное давление несколько увеличивается, а эквивалентное напряжение (рис. 7, б и 9, б) практически не изменяется. По-видимому, это вызвано недостаточной жесткостью использованной пружины, что подтверждается при установке пружины, жесткость которой в 2 раза больше. Как видно на рис. 9, а и 9, в, контактное давление увеличивается в 4 раза – с 18 МПа до 71 МПа. При этом эквивалентное напря-

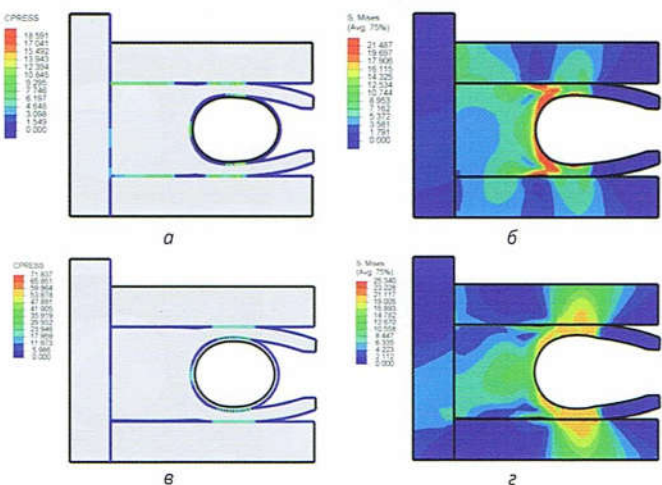


Рис. 9. Контактные давления (а, в) и эквивалентные напряжения (б, г) в манжетах с оболочкой из фторопласта с пружинами меньшей (а, б) и в 2 раза большей (в, г) жесткости

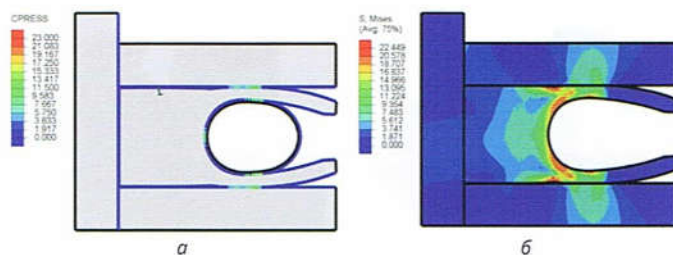


Рис. 10. Контактное давление (а) и эквивалентное напряжение (б) манжет из фторопласта после приложенного давления 10 МПа

жение незначительно увеличивается – с 21 до 25 МПа (рис. 9, б, 9, г). Таким образом, параметры пружин оказывают существенное значение на герметизирующие свойства манжет.

Принято считать [5], что пропуск среды в соединении отсутствует, т.е. герметичность обеспечивается при условии $p_k \geq k_p$ (здесь p_k – контактное давление в соединении; $k = 1 \dots 1,5$ – коэффициент, учитывающий несовершенства уплотнительного узла; p – давление среды).

В связи с этим представляет интерес исследовать влияние давления среды на герметичность и напряженное состояние манжет. Сравнение рис. 7, а и 7, б с рис. 10, а и 10, б показывает, что приложение давления 10 МПа вызывает рост контактного давления с 16 МПа до 23 МПа, но эквивалентное напряжение существенно не изменяется. Это значит, что манжета должна быть герметична при давлении 10 МПа, так как $p_k = 2,3p$. Кроме того, находит подтверждение более раннее утверждение [4], что для МПЭ характерен эффект самоуплотнения, т.е. увеличение контактного давления на сопрягаемых поверхностях при приложении внешнего давления.

Разработанная расчетная методика позволяет в режиме реального времени рассчитывать контактное давление, напряжение и деформацию манжеты в зависимости от конструктивно-технологических факторов и условий эксплуатации, следовательно, прогнозировать поведение манжеты во время эксплуатации. Выполненные прочностные расчеты не являются окончательными для принятия решения о применении. Не менее важным является экспериментальная оценка герметизирующих свойств уплотнения и основные параметры сопряжения с показателями герметичности и долговечности.

Литература:

1. S. Mezghani, I. Demirci, H. Zahouani, M. El Mansori The effect of groove texture patterns on piston-ring pack friction//Precision Engineering, 36 (2012), 210–217.
2. Kurt Miller, Axel Products, Inc Testing Elastomers for Hyperelastic Material Models in Finite Element Analysis.
3. Зерщиков К.Ю. Характеристики и особенности применения полимерных манжет с подпружинивающим элементом//ТПА. 2016. №3. С. 28–30.
4. Зерщиков К.Ю., Семенов Ю.В. Полимерные манжеты с подпружинивающим элементом для уплотнительных узлов насосного, компрессорного оборудования, запорной арматуры высоких параметров//Химическая техника. 2016. №9. С. 39–42.
5. Уплотнения и уплотнительная техника. Справочник/Под ред. Голубева А.И., Кондакова Л.А., М.: Машиностроение, 1986.