

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕМБРАНЫ КЛАПАНА ПЕРЕЛИВНОГО НЕПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ

И. В. Поздняков, В. Н. Сызранцев, А. А. Двинин
(Тюменский государственный нефтегазовый университет)

Ключевые слова: электроцентробежный насос, мембрана, переливной клапан
Key word: an electric pump, membrane, relief valve

Сущность способа регулирования подачи электроцентробежного насоса (ЭЦН) с помощью переливного клапана непрямого действия [1,2] (далее - клапана) заключается в автоматическом приведении в соответствие отбора пластовой жидкости из скважины и ее притока. Соответствие отбора и притока пластовой жидкости характеризуется постоянством ее динамического уровня в межтрубном пространстве скважины. Поэтому за основу разработанного способа регулирования принято условие сохранения стабильного столба между насосно-компрессорной трубой (НКТ) и эксплуатационной колонной, необходимого для нормальной работы скважинного насоса. Это условие выполняется, если при понижении столба, когда отбор превышает приток, часть жидкости, выходящей из ЭЦН в НКТ, сбрасывать в межтрубное пространство. Для сброса части жидкости из НКТ предлагается установить клапан непрямого действия между модуль-секцией и НКТ, причем управление клапаном осуществляется силой гидростатического столба жидкости в межтрубном пространстве независимо от того, какое давление в насосно-компрессорных трубах.

Главным рабочим органом клапана является эластичная мембрана. Мембрана (рис.1) состоит из двух основных элементов: тела мембраны, то есть части мембраны, расположенной внутри закрепленного контура, и одного или двух фланцев для закрепления мембраны в корпусе и на штоке [3].

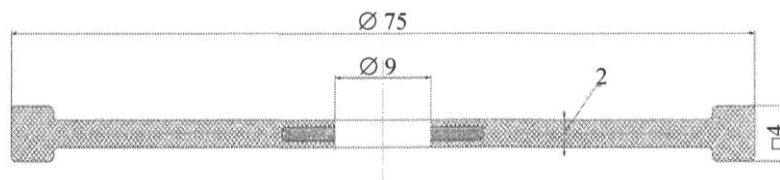


Рис.1. Геометрические характеристики мембраны клапана переливного

Для закрепления мембраны в корпусе фланец выполнен с отформованным кольцевым буртом квадратного сечения. Бурт предназначен для более надежного закрепления мембран по контуру и обеспечения повышенной герметизации соединения. Крепление центра мембраны может быть так же осуществлено при помощи бурта, но лучшие результаты дает приваривание жесткого центра мембраны при ее вулканизации, когда слои резины охватывают жесткий центр с обеих сторон [4]. Поэтому данное конструкторское решение принято и для описываемой мембраны.

На рис. 2 а изображено устройство переливного клапана, состоит из корпуса 2, верхнего и нижнего седла 3 и 7 соответственно, винта 4, прижимной шайбы 5, мембраны 6 и штока 8. В конечном этапе сборки в переливной клапан закачивается газ 1 с давлением зарядки, выбранным из расчета поддержания необходимого динамического уровня во время работы насоса в скважине.

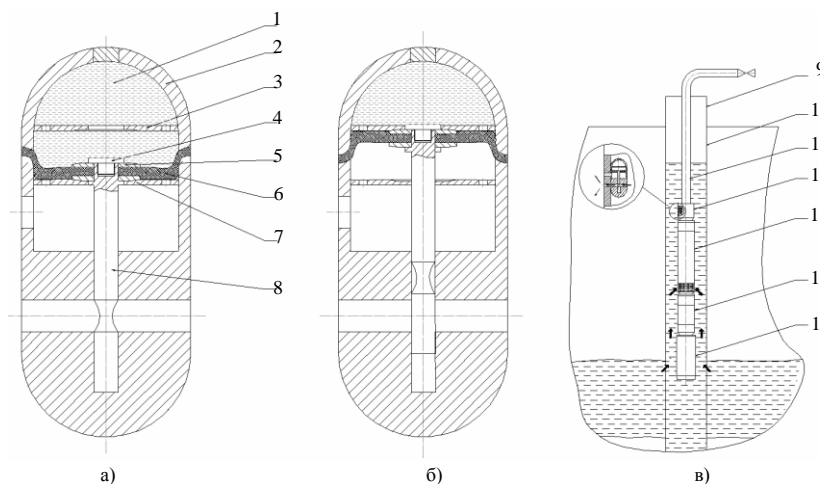


Рис. 2. Устройство и схема расположения клапана переливного:

а – клапан переливной в открытом состоянии; б – клапан переливной в закрытом состоянии; в – схема расположения переливного клапана в скважине

Схема расположения клапана переливного в скважине (см. рис. 2 в), где 9 – устьевое оборудование, 10 – обсадная колонна, 11 – труба НКТ, 12 – адаптер с клапаном переливным, 13 – модуль-секция, 14 – гидрозащита, 15 – погружной электродвигатель (ПЭД).

Известные методики аналитического расчета основных характеристик эластичных мембран и уплотнительных элементов мембран [4,5] имеют ряд допущений и приближений, вследствие чего возможно значительное расхождение результатов расчетов с реальными данными, например, в случае использования мембран сложной геометрической формы либо во время исследования распределения контактного давления по уплотняющей поверхности при оценке герметичности

уплотнения. Расчет НДС мембраны клапана переливного представляет сложную исследовательскую задачу, имеющую в своей постановке тройную нелинейность, вызываемую пространственным характером контактного взаимодействия мембраны со штоком и элементами корпуса камеры, гиперупругими нелинейными свойствами материала мембраны, а также сложной геометрией рассматриваемого образца. Однако использование численных методов теории упругости, в частности, метода конечных элементов позволяет решать данный класс задач, о чем говорится в работах [6,7].

Исследуем напряженно-деформированное состояние мембраны до монтажа клапана переливного в скважину, так как в этом случае она будет подвержена максимальному перепаду давления – давлению зарядки. Это давление принимается с учетом глубины погружения электроцентробежного насоса под динамический уровень, а также необходимого усилия для преодоления штоком-перегородкой силы трения покоя. По предварительным подсчетам для случая, когда погружение под динамический уровень составляет 550 метров столба жидкости (воды), а давление на выходе насоса 14 МПа, давление газа в камере должно составлять не менее 6 МПа.

Описание конечно-элементной (КЭ) модели

Используемые модели поведения материалов.

Поведение гиперупругого материала (резина), который можно с достаточным приближением считать несжимаемым, описывается с помощью функции удельной потенциальной энергии деформации, которая в этом случае является функцией только первых двух главных инвариантов [6]:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2, \quad (1)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2, \quad (2)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1, \quad (3)$$

$$W = W(I_1, I_2, I_3) = W(I_1, I_2), \quad (4)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – главные удлинения; I_1, I_2, I_3 – инварианты мер деформации.

Для различных материалов предложен ряд аппроксимаций функции $W(I_1, I_2)$. Полиномиальные аппроксимации в общем случае можно записать в виде

$$W = \sum_{r=0}^{\infty} \sum_{s=0}^{\infty} C_{rs} (I_1 - 3)^r (I_2 - 3)^s, \quad C_{00} = 0. \quad (5)$$

Для описания поведения материала мембраны клапана выбрана модель, заданная в виде полиномиальной аппроксимации Муни-Ривлина, которая получается при сохранении лишь линейных, относительно I_1 и I_2 членов:

$$W = C_1 (I_1 - 3) + C_2 (I_2 - 3), \quad (6)$$

где C_1 и C_2 – константы материала.

Здесь $C_1 = C_{10}$, $C_2 = C_{01}$. Обнаружено, что этот закон Муни позволяет удовлетворительно описывать деформации некоторых натуральных и вулканизированных резин в довольно широком диапазоне (450-500%).

На основе экспериментальных данных одноосного растяжения образца эластомера HNBR, используя опцию «Material Curve Fitting» программного конечно-элементного комплекса ANSYS, получены необходимые константы материала: $C_{10} = 2,1026$ МПа и $C_{01} = 1,8696$ МПа.

Материал приваренного жесткого центра мембраны задан как эластичный изотропный материал с модулем упругости, равным 210 ГПа и коэффициентом Пуассона, равным 0,29.

Построение конечно-элементной модели клапана переливного.

Конечно-элементная модель клапана задана в осесимметричной постановке; ось y является осью симметрии; верхняя и нижняя части корпуса клапана переливного заданы как абсолютно жесткие тела; нижняя часть корпуса закреплена неподвижно.

В конечно-элементной модели использовались элементы PLANE183, которые могут применяться в расчетах на прочность нелинейных гиперэластичных материалов.

Для решения контактной задачи использовались контактные элементы типа «поверхность-поверхность», в данном случае это контакты жестких поверхностей верхнего и нижнего корпусов клапана, части штока и деформируемой поверхности мембраны. Соответственно для контактной поверхности мембраны выбран элемент CONTA172, а для контактных поверхностей корпусов клапана – элемент TARGET169.

Граничные условия.

Коэффициент трения между контактирующими поверхностями мембраны и стального корпуса при наличии граничной смазки возьмем равным 0,15 [8].

Во время первой ступени нагружения мембрана предварительно поджимается для закрепления в жестком центре и корпусе клапана, а так же для герметизации камеры с газом. Деформация фланца в центре мембраны выбрана из условия создания необходимого контактного давления и составляет 4% деформации мембраны в осевом направлении. Деформация фланца с буртом должна находиться в пределах 15-35% [3,8], мы остановимся на 15%.

В течение второй и третьей ступеней нагружений шток мембраны перемещается вниз на величину хода, и с верхней стороны мембраны прикладывается давление, равное 6 МПа, с помощью опции «Fluid Pressure-Penetration Loads». Эта опция позволяет моделировать давление газа, проникающего между контактными поверхностями, и зависит от статуса контакта между сопрягаемыми поверхностями.

КЭ модель представлена на рис. 3.

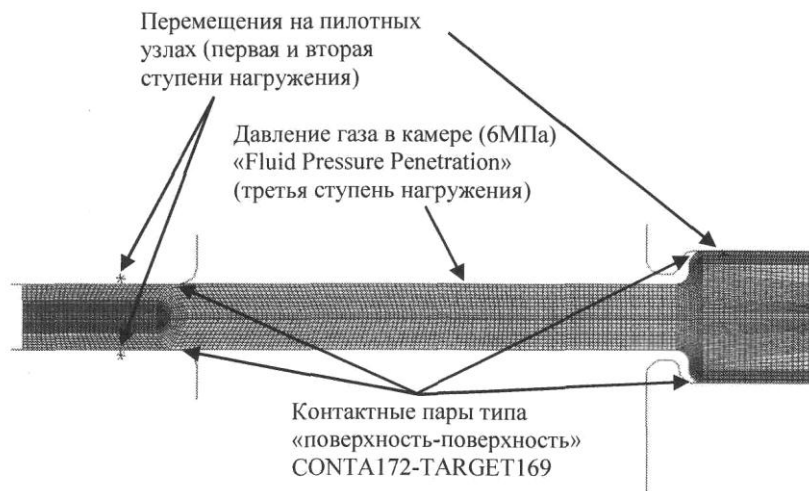


Рис. 3. Конечно-элементная модель клапана переливного с заданными граничными условиями

Результаты расчета оригинальной конструкции клапана.

Распределение напряжений в приваренном жестком центре учитывать не будем, так как эта часть обладает значительно большей жесткостью по сравнению с мембраной.

На рис. 4 представлено поле распределения эквивалентных напряжений в мембране.

Видно, что максимальный уровень эквивалентных напряжений составляет 33,3 МПа. Этот максимум приходится на зону концентрации напряжений на периферии мембранного полотна в области крепления фланца, значения напряжений в этих местах превышают прочность материала при разрыве (15 МПа) примерно в два раза. Следовательно, можно предполагать, что уже во время заправки газа в клапан существующей конструкции, мембрана порвется в отмеченном нами месте, что недопустимо. В этом случае необходима доработка конструкции мембраны либо камеры корпуса клапана переливного.

Анализ НДС мембраны в случае возможной оптимизации геометрии камеры клапана переливного.

Изменим геометрию камеры клапана переливного, сделав ее более пологой с увеличенными радиусами скруглений, предполагается, что таким образом мы сможем обеспечить меньший перегиб мембраны и, как следствие, возможное снижение и перераспределение максимумов напряжений в ней.

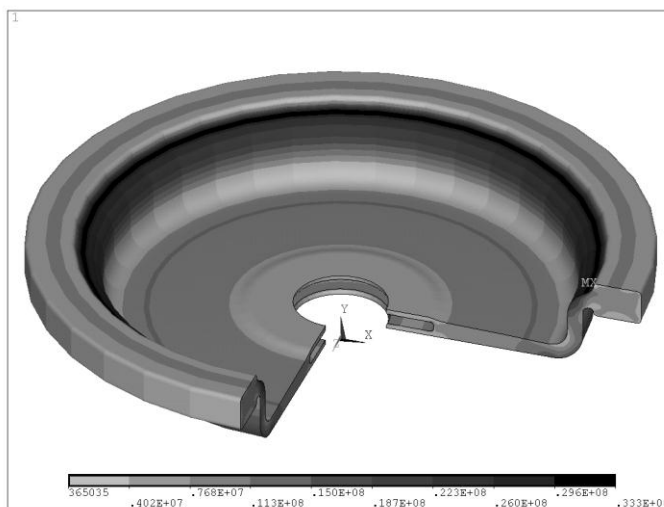


Рис. 4. Поле распределения эквивалентных напряжений в мембране, Па

На рис. 5 представлено поле распределения эквивалентных напряжений в мембране клапана с измененным профилем корпуса камеры, как и ожидалось, максимальное значение эквивалентных напряжений существенно снизилось и составляет 9,42 МПа.

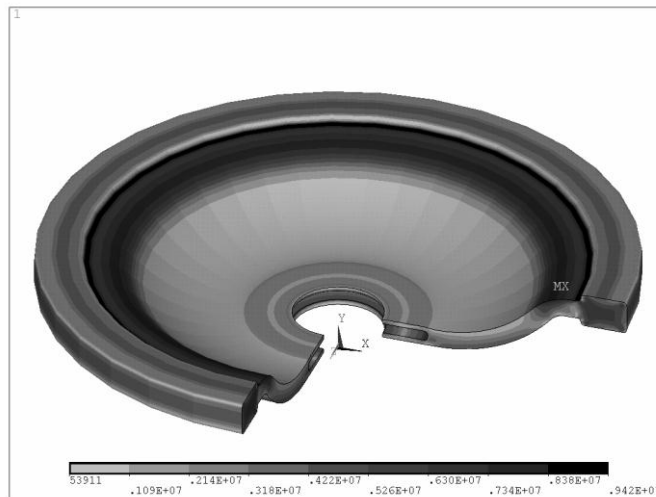


Рис.5. Поле распределения эквивалентных напряжений в мембране с измененной геометрией профиля камеры, Па

На рис. 6-7 представлены диаграммы распределения эквивалентных напряжений на верхней и нижней наружных поверхностях мембраны до и после изменения геометрии корпуса камеры. Глядя на полученные диаграммы, можно заметить общее снижение величин эквивалентных напряжений по всей поверхности мембраны в клапане с измененной геометрией корпуса камеры. Заметное снижение опасных напряжений отмечается в областях крепления фланца по корпусу на верхней наружной поверхности мембраны (см. рис. 6), а также в области перегиба на нижней наружной поверхности мембраны (см. рис. 7) – в измененной конструкции клапана эти напряжения примерно на 60-90% ниже, чем в оригинальной конструкции клапана.



Рис. 6. Сравнительные кривые распределения эквивалентных напряжений на верхней наружной поверхности мембраны в оригинальной конструкции клапана и в конструкции с измененной геометрией клапана

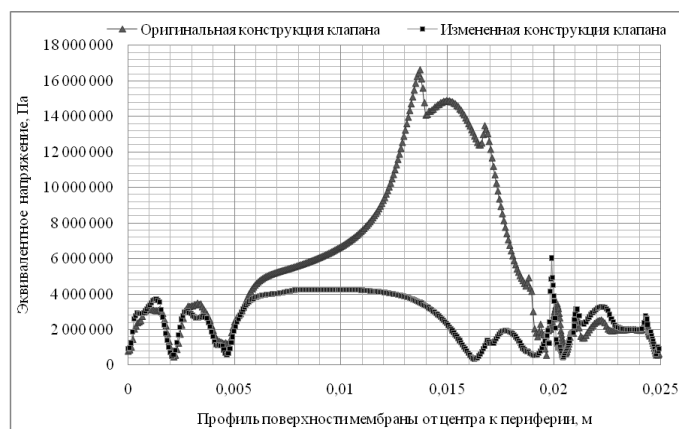


Рис.7. Сравнительные кривые распределения эквивалентных напряжений на нижней наружной поверхности мембраны в оригинальной конструкции клапана и в конструкции с измененной геометрией клапана

Мембрана, используемая в оригинальной конструкции клапана, не обладает достаточной прочностью и не работоспособна при заданных условиях эксплуатации. Рассмотренная возможная оптимизация геометрии камеры клапана переливного позволила значительно (20-90%) снизить величины эквивалентных напряжений по телу мембраны и повысить коэффициент запаса прочности (до 1,47), надежность клапана в целом. Проведенное нами исследование НДС мембраны клапана еще раз доказывает преимущество использования современных численных методов теории упругости на этапе проектирования конструкции.

Список литературы

1. Ерка Б. А. Анализ технологических режимов работы нефтяных скважин оборудованных ЭЦН по СГНДУ-1 Самотлорского месторождения / Ерка Б. А., Староносов М. Г., Двинин А. А. //Сборник научных трудов, посвященный 50-летию ТюмГНГУ. Тюмень: ТюмГНГУ, 2006. - 228 с.
2. Пат. 34629 РФ, 7 Е 21 В 43/00, 47/04. Устройство для поддержания динамического уровня в скважине / А.А. Двинин, Б.А. Ерка, М.Г. Староносов (Россия) - № 2003125418/20; Заявлено 18.08.2003; Опубл. 10.12.2003, Бюл. №34.
3. Аврущенко Б. Х. Резиновые уплотнители. - Л.: Химия, 1978. - 136 с.
4. Андреева Л. Е. Упругие элементы приборов. - М., Машгиз, 1962. - 456 с.
5. Водяник В. И. Эластичные мембраны. - М.: Машиностроение, 1974. - 136 с.
6. Дж. Оден Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. - М.: Мир, 1976. – 465 с.
7. Сызранцева К. В. Компьютерный анализ нагруженности и деформативности элементов нефтегазового оборудования. - Тюмень: ТюмГНГУ, 2009. - 124 с.
8. Кондаков Л. А. Уплотнения и уплотнительная техника. - М.: Машиностроение, 1986. - 464 с.

Сведения об авторах

Поздняков И. В., аспирант кафедры МОП, Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, e-mail: IPozdnyakov@slb.com

Сызранцев В. Н., д.т.н., профессор, кафедра МОП, заведующий, Тюменский государственный университет, г.Тюмень, тел.:+7 (3452) 48-45-63.

Двинин А. А., к.т.н., доцент, кафедра МОП, Тюменский государственный университет, г.Тюмень, тел.:+7 (3452) 41-46-46.

Pozdnyakov I. V., postgraduate student, Machines and Mechanisms of Oil and Gas Fields Department (MOGF), Tyumen State Oil and Gas University, e-mail: IPozdnyakov@slb.com

Syzrantsev V. N., PhD, professor, Head of Machines and Mechanisms of Oil and Gas Fields Department (MOGF), Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, phone: +7 (3452) 48-45-63

Dvinin A. A., PhD, associate professor, Machines and Mechanisms of Oil and Gas Fields Department (MOGF), Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, phone: 7 (3452) 41-46-46.