

УДК 622.23

В. И. Пилипец, А. А. Украинцев

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», Донецк, Украина

Совершенствование технических средств для откачки жидкости из скважин

Разработана конструкция пакера УКР-1 для установки в скважине погружного гидроприводного насоса, а также математическая модель работы пакера и технология его использования. С использованием программы АРМ WinMachine v9.7. получена, конечно-элементная модель сил действующих на золотник и резиновую манжету пакера, по которой можно судить о напряжениях, вызванных нагружением этих деталей, а также дать предварительную оценку рабочего давления внутри деформированной резиновой манжеты.

Ключевые слова: скважина, пакер, гидроприводной насос, откачка, динамический уровень.

Повышение благосостояния людей и развитие народного хозяйства требует увеличения промышленного, сельскохозяйственного и бытового водоснабжения, одним из основных источников которого являются подземные воды. В последнее время в связи с сокращением ресурсов поверхностных вод использование подземных вод, добываемых через скважины, значительно возросло. Для искусственного подъема жидкости из скважин используется много разнообразных технических средств, разработанных для различных условий эксплуатации, отличающихся конструктивно и по принципу действия.

Одними из надежных подъемников жидкости, удовлетворяющих различным условиям эксплуатации, являются погружные насосы с гидравлическим приводом (гидропоршневые, винтовые, эжекторные), важной особенностью которых является способность передавать большое количество энергии с потоком жидкости, имеющим сравнительно небольшой расход, но высокое давление. Эта особенность позволяет создавать мощные агрегаты небольших габаритов для скважин малых диаметров.

Однако из-за необходимости оборудования скважины двойной колонной труб использование таких насосов ограничено. Проведенный анализ различных схем установки в скважине погружных насосов с гидроприводом показал, что наиболее перспективными являются схемы, в которых в качестве подъемного трубопровода используется колонна обсадных труб, которой закреплена скважина или незакрепленные трубами стенки скважины, а погружной насос устанавливается в специальном пакере. Использование таких схем позволяет снизить металлоемкость оборудования, поскольку в скважину на большую глубину опускаются только силовые трубы, что позволяет использовать насосы с гидроприводом не только при добыче жидких полезных ископаемых (воды или нефти) с глубины 1000 м и более, а и при гидрогеологических исследованиях в скважинах, например при разведке угольных месторождений.

Однако известные механические и гидравлические пакеры, разработаны в основном для цементации затрубного пространства и не могут без изменения конструкции применяться при проведении откачек жидкости из скважин погружными насосами.

Поэтому создание эффективной конструкции гидравлического пакера, который позволяет разделить операции по раскрытию пакера и удержанию его гидравлической обоймы в раскрытом положении при работе гидронасоса является весьма актуальной проблемой.

С целью устранения существующих недостатков, присущих известным пакерам, предлагается универсальный гидравлический пакер УКР-1 (рис.1), а также методика расчета его рабочих и технологических параметров.

Конструкция пакера простая и позволяет изготовить его в мастерских геологоразведочных предприятий.

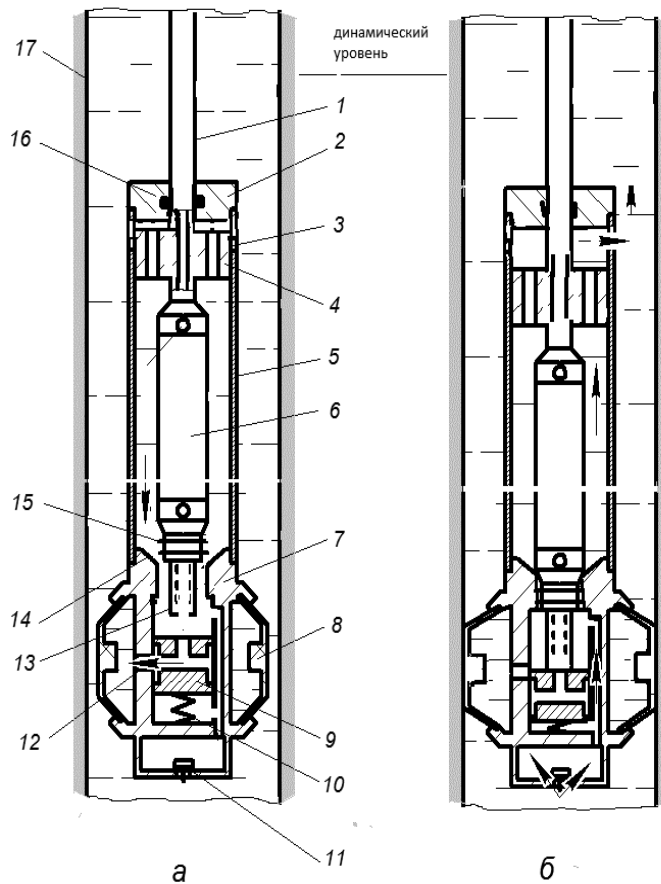


Рис.1. Схема установки гидропоршневого насоса и пакера в скважине:
а – при спуске оборудования в скважину; *б* – в рабочем положении.

При откачке жидкости гидропоршневой насос *б* опускается в скважину *17* на силовых трубах *1* ниже динамического уровня не менее чем на *10* м и устанавливается в специальное седло *15* пакера. В качестве подъемного трубопровода можно использовать имеющиеся обсадные трубы или ствол незакрепленной скважины *17*.

В процессе спуска кожух пакера *7* с укрепленным на нем пакером под действием собственного веса опускаются вниз и удерживаются на колонне силовых труб верхним золотником *4*, который находясь в верхнем положении, перекрывает отверстия *3*. При этом хвостовик *13* насоса освобождает золотник пакера *9*, который возвратной пружиной *10* поднимается вверх и открывает боковые окна *12*. Таким образом, в процессе спуска жидкость из скважины *17* не попадает в пакер и не засоряет его.

После установки пакера заданной глубине наземным приводным насосом по силовым трубам *1* подается жидкость, которая, пройдя через погружной насос *6*, выходит в пространство между насосом *6* и кожухом *5*, а оттуда через седло *15* пакера, отверстия в золотнике *9* и боковые окна *12* в полость резиновой манжеты пакера *8*.

Под действием давления жидкости уплотнительный элемент *8* пакера раскрывается и разделяет скважину *17* на надпакерную и подпакерную зоны.

Давление жидкости рассчитывается таким образом, чтобы резиновая манжета пакера плотно прижался к стенкам скважины, но насос не включился в работу. Величина давления жидкости контролируется по манометру приводного насоса и после достижения определенного его значения силовые трубы *1* с насосом *6* и золотником *4* опускаются на величину длины хвостовика *13*. Хвостовик насоса заходит в центральный канал седла *14* и перемещает золотник *9* пакера в нижнее положение. При этом золотник *9* перекрывает боковые окна *12*, тем самым запирая жидкость внутри уплотнительного элемента пакера,

После чего наземный насос переводится в рабочее положение обеспечивающее включение в работу погружного гидронасоса. При работе погружного насоса жидкость из скважины

засасывается через обратный клапан 11 и через каналы в пакере попадает в пространство между насосом 6 и кожухом 5, а оттуда через отверстия 3 в надпакерную зону скважины и далее на поверхность.

После окончания откачки жидкости силовые трубы приподнимаются, хвостовик погружного насоса выходит из седла пакера, освобождая золотник 9, который открывает боковые окна 12 и резиновая манжета пакера закрывается. После этого пакер с погружным насосом извлекаются на поверхность.

Для определения рабочих, конструктивных и технологических параметров насосной установки в целом предлагается упрощенная методика расчетов.

При выборе параметров возвратной пружины золотника необходимо учитывать, что усилие пружины должно компенсировать вес золотника и силу трения золотника о стенки корпуса пакера.

Уравнение сил действующих на золотник при спуске можно записать в следующем виде:

$$S_1 \gamma H_1 + G_3 - T - S_2 \gamma H_1 - z(h_0 + h) = 0, \quad (1)$$

где S_1 и S_2 – площадь верхней и нижней части золотника, м²; γ – плотность жидкости, кг/м³; H_1 – высота столба жидкости в кожухе, м; G_3 – вес золотника. $G_3 = m g$, Н; m – масса золотника, кг; g – ускорение свободного падения, м/с; T – силы трения в золотнике. Можно принять $T = \frac{G_3}{2}$, Н; z – жесткость пружины, кг/м; h_0 – предварительное сжатие пружины, м; h – рабочий ход пружины, м.

Уравнение сил действующих на золотник при раскрытии резиновой манжеты пакера можно представить в виде:

$$S_1 \gamma H_2 + G_3 - T - S_2 \gamma H_2 - z(h_0 + h) = 0, \quad (2)$$

где H_2 – высота столба жидкости в силовых трубах, м.

Из уравнения сил действующих на золотник по известной методике можно подобрать золотниковую пружину.

Резиновая манжета данного пакера представляет собой раздуваемую резиновую камеру, для раскрытия которой необходимо создать давление P_0 , которое является суммой давления предварительного расширения резиновой манжеты пакера до ее соприкосновения со стенками скважины P_1 и давления необходимого для прижатия к стенкам скважины резиновой манжеты целью удержания пакера P_2 в процессе работы погружного насоса.

С учетом запаса прочности резиновой манжеты результирующее давление в пакере можно определить из выражения:

$$P_p = P_0 k, \text{ МПа}, \quad (3)$$

где k – коэффициент запаса прочности резиновой манжеты пакера.

Давление необходимое, для предварительного расширения резиновой манжеты пакера до ее соприкосновения со стенками скважины определяется из выражения:

$$p_1 = p + \frac{4aSE}{D_c(D_c - 2S)}, \text{ МПа}, \quad (4)$$

где p – давление на манжету со стороны скважины. $p = \gamma H_3$, Па; H_3 – высота столба жидкости от динамического уровня до пакера, м; D_c – диаметр скважины, м; a – величина кольцевого зазора. $a = D_c - D_n$; D_n – наружный диаметр резиновой манжеты, исходный, м; S – толщина стенки резиновой манжеты (исходная), м; E – модуль упругости резины при сжатии. Принимаем 20 МПа.

Давление жидкости, необходимое для создания удерживающей силы определяется из выражения:

$$p_2 = \frac{Q}{\pi D_c l \mu}, \text{ МПа}, \quad (5)$$

где l – длина контакта резиновой манжеты со стенками скважины в рабочем положении, м; Q – сдвигающая пакер сила. Из опыта установки пакеров при сооружении нефтяных скважин

принимаем $Q = 3$ МПа; μ – коэффициент трения резины о металл обсадных труб или стенки скважины.

Общее давление наземного насоса P_n на установку пакера и включение в работу погружного гидронасоса определяются по формуле:

$$P_n = K_3 (P_p + P_{nn}) \quad (6)$$

где K_3 – коэффициент утечек жидкости в силовом и подъемном трубопроводах. Принимаем $1,1 \div 1,2$; P_{nn} – давление силовой жидкости, необходимое для работы погружного гидронасоса, Па.

Давление силовой жидкости, необходимое для работы погружного гидронасоса в данном случае представлено для поршневого насоса с гидроприводом, конструкции ДонНТУ [4]:

$$P_{nn} = \frac{2 S (P_n F_n - P_e F_u + T)}{Q_p t_u} - P_a + \gamma_{cm} H + \frac{V_c \gamma_c \lambda_c L_c}{2 g d_c}, \quad (7)$$

где P_n, P_a – давление жидкости в подъемных трубах и атмосферное давление соответственно, Па; P_e – давление жидкости на поршни гидронасоса со стороны всасывания погружного гидронасоса, Па; P_n – давление жидкости на поршни гидронасоса со стороны подъемных труб, Па; F_n – площадь поперечного сечения поршня гидронасоса, м²; F_u – площадь поперечного сечения штока гидронасоса, м²; T – сила трения между поршнем и цилиндром гидронасоса, Н. $T = G_n / 2$; G_n – вес поршневой группы гидронасоса, Н. $G_n = m_n g$; m_n – масса поршневой группы гидронасоса, кг; H – глубина откачки, м; γ_{cm} – удельный вес смешанной жидкости в подъемном трубопроводе, Н/м³;

V_c – скорость течения жидкости в силовом трубопроводе, м/с. $V_c = \frac{4 Q_p}{d_c^2}$; γ_c – удельный вес жидкости в силовом трубопроводе, Н/м³; λ_c – коэффициент гидравлических сопротивлений в

силовом трубопроводе. $\lambda_c = a \left[\frac{d_1^2}{d_2^2} - 1 \right]^2$; L_c – длина силового трубопровода, м; g – ускорение

свободного падения, м/с²; Q_p – подача погружного насоса, м³/с; a – опытный коэффициент. Для ниппельного соединения труб $a = 1,5$; d_1, d_2 – соответственно внутренний диаметр труб и соединений, м; t_u – время рабочего цикла движения поршневой группы гидронасоса, с. $t_u = \frac{2 S}{V_{cp}}$.

$$P_n = P_u + \gamma_{cm} H + \frac{\lambda_n \gamma_{cm} L V_n^2}{(D_n^6 - d_c^6) 2 g}, \quad (8)$$

где P_u – давление откачиваемой жидкости на изливе. Принимаем $P_u = P_a = 10^5$ Па; λ_n – коэффициент гидравлических сопротивлений в подъемном трубопроводе; D_n^6 и d_c^6 – соответственно внутренний диаметр подъемных труб (или скважины) и наружный диаметр силовых труб, м; L – длина подъемных труб, м; V_n – скорость течения жидкости в подъемном трубопроводе, м/с.

$$V_n = \frac{4 Q_p}{\pi (d_n^2 - D_c^2)}; \quad \lambda_n = a \left[\frac{d_1^2}{d_2^2} - 1 \right]^2 \quad (9)$$

$$P_e = P_a + \gamma_d H_3 - \frac{\gamma_d V_e^2 (1 + K_e)}{2 g}, \quad (10)$$

где γ_d – удельный вес откачиваемой жидкости, Н/м³; K_e – коэффициент сопротивления жидкости во всасывающем трубопроводе; V_e – скорость течения жидкости во всасывающем трубопроводе, м/с; $V_e = \frac{4 Q_p}{\pi d_{ec}^2}$; d_{ec} – диаметр всасывающего трубопровода гидронасоса, м.

Напряжение в поперечном сечении резиновой манжеты пакера определяется из выражения:

$$\sigma = (p_p - p) \frac{D_n^2 - d^2}{D_c^2 - D_n^2} \leq \frac{\sigma_6}{3} \quad (11)$$

где σ_6 – предел прочности материала резины манжеты, МПа; d – внутренний диаметр манжеты, м.

Элементы пакера, в частности резиновая манжета и золотник испытывают сложное сочетание нагрузок, поэтому аналитически определить наиболее нагруженные участки этих деталей и подобрать их оптимальные параметры, используя стандартные методы или способы расчета довольно сложно.

Поэтому для расчета прочностных значений элементов пакера (золотника и резинового элемента) на ЭВМ выбрана программа APM WinMachine v9.7., которая применяется для расчета напряжений и деформаций в деталях.

При создании расчетной модели золотника учитывалось следующее:

- при раскрытии манжеты золотник находится в верхнем положении, поскольку находится под действием усилия пружины направленного вверх, а сверху на золотник действует давление жидкости, которое создает в нем сминающие напряжения;
- при подаче рабочей жидкости на верхней плоскости золотника создается усилие направленное вниз;
- пройдя по внутренним каналам золотника, рабочая жидкость создает разрывные усилия в нижней части золотника, поскольку давление в золотнике перерастает в силу векторно-направленную в противоположные стороны.

На основании уравнений сил (1 и 2) составлена схема нагружения золотника (рис.2).

Расчетная модель сил действующих на золотник, составленная ЭВМ представлена на рис. 3.

По построенной модели можно визуально оценить напряжения, возникающие в различных частях золотника. Увеличение степени затемнения на рисунке (или изменение цвета) в различных местах золотника свидетельствует об увеличении значения возникающих напряжений, что позволяет выявить наиболее слабые места золотника.

Анализируя данные, полученные в ходе исследований на ЭВМ напряжений, возникающих в области золотника можно сделать вывод, что максимальные напряжения составляют 3,7 МПа и сосредоточены они в горизонтальной плоскости перепускающих отверстий, образуя опасное сечение в детали. Эти выводы основаны на анализе 21323 конечных элементов и 6074 узлов.

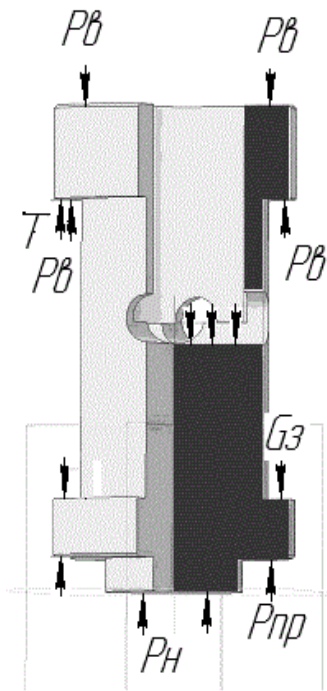


Рис. 2. Схема нагружения золотника:
 P_v – давление на золотник сверху; P_n – давление на золотник снизу; $P_{пр}$ – сила пружины; G_z – вес золотника; T – сила трения в золотнике.

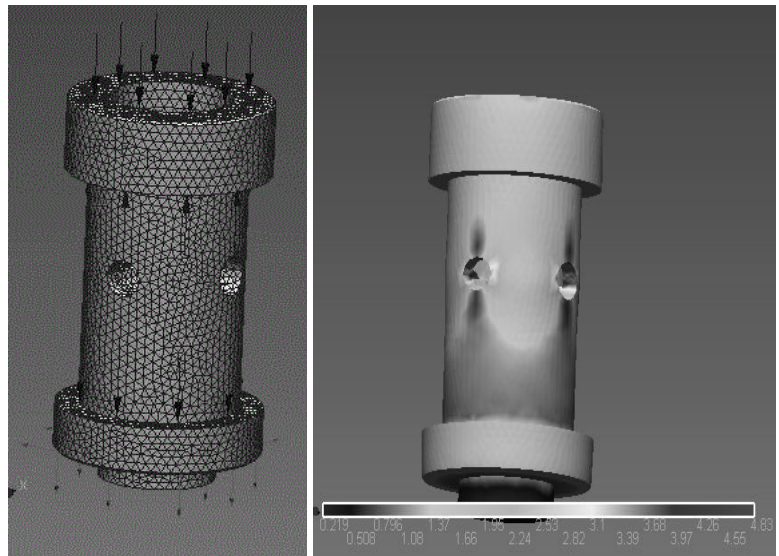


Рис. 3. Конечно-элементная модель сил действующих на золотник

Основным элементом пакера является резиновая манжета, которая в процессе деформации осуществляет главную задачу пакера – герметизацию затрубного пространства.

Оценить качество контакта манжеты со стенками скважины можно по контактному давлению и размерам площадки контакта.

На рис. 4. показана расчетная модель резиновой манжеты пакера, установленного в скважине.

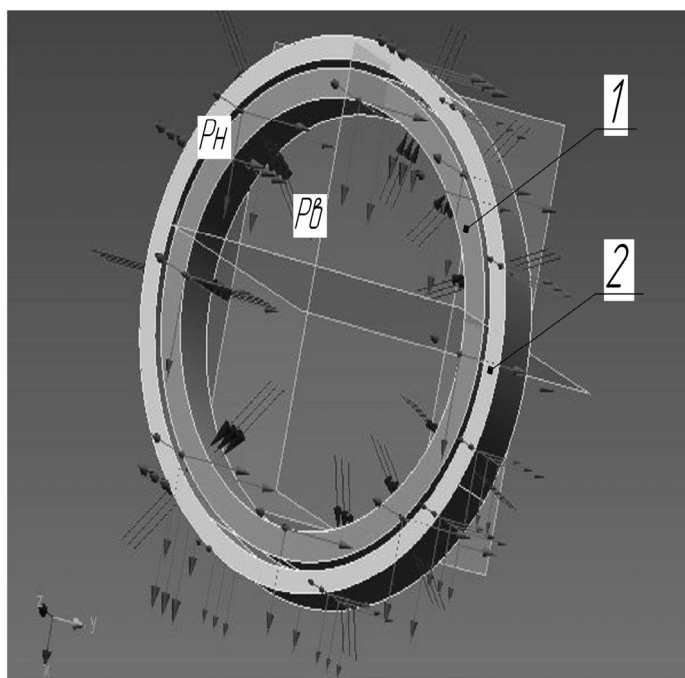


Рис.4. Расчетная модель уплотнительного элемента и скважины: 1 – манжета; 2 - скважина

Полученная расчетная модель дает возможность судить о напряжениях, вызванных нагружением резиновой манжеты, а также предварительной оценки рабочего давления внутри резиновой манжеты.

По данной карте напряжений можно судить о напряжениях возникающих внутри деформированной резиновой манжеты. При раскрытии и удержании была взята ситуация с перепадом давления в 3 МПа, и плотность жидкости 1000 кг/м^3 , обуславливающая гидростатическое давление с высотой столба 1000 м.

Получившееся значение было максимальным по наружному контуру и составляло 3,5 МПа.

Эти выводы основаны на анализе 15620 конечных элементов и 5344 узлов.

Для оперативного без вычислений прогнозирования допустимой величины снижения уровня жидкости в скважине при проведении откачки разработаны графики зависимости давления приводного насоса от величины заглубления погружного гидронасоса ниже уровня откачиваемой жидкости. Величину снижения уровня жидкости в скважине в процессе откачки необходимо постоянно измерять равномерно.

Расчеты показывают, что при правильном выборе приводного насоса существует возможность с разработанным пакером откачивать жидкость из глубины до 1000 м в скважинах диаметром от 59 мм.

Библиографический список

1. Горгиджаниян С.Н. Погружные насосы для водоснабжения и водопонижения / С.Н. Горгиджаниян, А.И. Дягилев. – Л.: Машиностроение, 1968.
2. Казак А.С. Гидропоршневые насосные установки / А.С. Казак. – М: ГОСНИТИ, 1961.
3. Погружной бесштанговый насос для откачки жидкости из скважин / [Г.И. Неудачин, В.И. Пилипец, В.С. Фоменко, П.В. Зыбинский] // Разведка и охрана недр. – 1976. - № 9.
4. Неудачин Г.И. Погружной бесштанговый насос для подъема воды из буровых скважин / Г.И. Неудачин, В.И. Пилипец // Гидротехника и мелиорация. – 1981. - № 7.

5. Пилипец В.И. Насосы для подъема жидкости / В.И. Пилипец. – Донецк: РИА, 2000. - С. 241.
6. Пилипец В.И. Применение погружных насосов с гидроприводом для откачки жидкости из буровых скважин / В.И. Пилипец // Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твердые полезные ископаемые. – Свердловск: СПИ, 1981.
7. Пилипец В.И. Совершенствование конструкции погружных гидронасосов для откачки жидкости из скважин с глубоким залеганием динамического уровня / В.И. Пилипец // Сб. науч. тр. ДонГТУ. Серия горно-геологическая. - 2000. - Вып. 11.

Надійшла до редакції 18.05.2012.

В. І. Пилипець., А. А. Українцев

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Донецьк, Україна

Удосконалення технічних засобів для відкачки рідини із свердловин

Розроблена конструкція пакера УКР-1 для розміщення в свердловині зануреного гідроприводного насоса, а також математична модель роботи пакера та технологія його використання. З використанням програми АРМ WinMachine v9.7. отримана кінцево-елементна модель сил, що діють на золотник та резинову манжету пакера, за допомогою якої є можливість оцінити напруги, які виникають при навантаженні цих деталей, а також дати передчасну оцінку робочого тиску всередині деформованої резинової манжети.

Ключові слова: свердловина, пакер, гідропривідний насос, відкачка, динамічний рівень.

V. I. Pylypets , A. A. Ukraintsev

Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine

Improvement of Borehole Fluid Pumping Tools

We designed the packer UKR-1 to install a hydraulically driven submersible pump in a well. Besides we provide a mathematical model of the packer's operation and the technique of its application. APM WinMachine v9.7. helped to obtain a finite-element model of the forces influencing the valve and the packer's rubber sleeve. By this model we can estimate the stresses caused by the loading on these items and the operating pressure in the deformed rubber sleeve.

Key words: water borehole, packer, hydraulic driven pump, pumping, dynamic level.