

УДК 622.24.05:620.193/.197

Разработка методики проектирования и реализация магнитного исполнительного механизма скважинных клапанов для компоновок низа бурильной колонны

P.A. Gasanov, D.T.N.¹, I.Y. Shirali, D.T.N.²,V.Yu. Tsvilitsin, K.T.N.³,I.B. Bondar, K.T.N.³, F.A. Ramazanov²¹Azerbaydzhanskiy gosudarstvennyy universitet nefti i promyshlennosti,²Gosudarstvennaya neftyanaya kompaniya Azerbaydzhanskoj Respublikı,³Institut problem materialovedeniya im. I.M. Frantsevicha NAN Ukrainy

e-mail: ramizhasanov52@hotmail.com

Ключевые слова: магнитная пружина, постоянный магнит, магнитопровод, сила втягивания, остаточная магнитная индукция, коэффициент размагничивания, коэрцитивная сила, обратный клапан, компоновка низа бурильной колонны.

DOI.10.37474/0365-8554/2020-2-38-44

Qazma kəmərinin aşağı hissəsi yığımları üçün maqnit icraedici mexanizmlərə malik əks klapınların layihələndirilməsi metodikasının işlənməsi və tətbiqi

R.Ə. Həsənov, t.e.d.¹, İ.Y. Şirəli, t.e.d.², V.Y. Tsvilitsin, t.e.n.³, İ.B. Bondar, t.e.n.³, F.A. Ramazanov²¹Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti,²Azərbaycan Respublikası Dövlət Neft Şirkəti,³Ukrayna Milli Elmlər Akademiyasının İ.M. Frantseviç adına Materialşünaslıq Problemləri İnstitutu

Açar sözlər: maqnit yayı, daimi maqnit, maqnit dövrə, geri çəkmə qüvvəsi, qalıq maqnit induksiya, demaqnetizasiya əmsali, məcburetmə qüvvəsi, yoxlama klapını, qazma kəmərinin aşağı hissəsi yığımları.

Məqalədə iki növ maqnit mexanizmləri təklif olunmuş və onların güc xarakteristikalarının əsas hissəsində dartma gücünün hesablanması üçün araşdırmalar aparılmış və müvafiq üsullar təklif olunmuşdur. Hər iki tip mexanizmin işlək hissələri modelləşdirilərək sınaq qurğularında aidyyəti təcrübələr aparılmış onların nəticələrinin hesabi xarakteristikalar ilə uzlaşdığı müəyyən edilmişdir. Araşdırılan maqnit mexanizmlərin güc xarakteristikalarının qurğuların konstruktiv icralarından və metrik ölçülərindən asılı olaraq tənzimləmə bilməsi müəyyən edilmiş, müvafiq metodika işlənməmiş və birgəlik şərtlərinin sintez olunması əsasında yaradıla biləcək maqnit mexanizmlərinin müxtəlif texniki təyinatlı tətbiqi ilə əlaqədar layihələndirmə və təcrübi tədqiqatlar aparılmışdır. Xüsusi tətbiqlərin tələblərinə uyğun olaraq maqnit mexanizmlərin güc xüsusiyyətlərinin dəyişdirmə yolları göstərilmişdir. SOCAR-ın müxtəlif neft və qaz sahələrində quyu qazılması təcrübəsində istifadə olunan qazma kəmərinin aşağı hissəsi yığımları üçün aparılmış tədqiqatlar əsasında maqnit əks klapınlarının konstruksiyaları yaradılmış və SOCAR-ın müxtəlif neft və qazlı sahələrində müvəffəqiyyətlə və böyük iqtisadi səmərə ilə tətbiq edilmişdir.

Development of designing and implementation method of magnetic execution unit of downhole valve for the bottomhole assembly

R.A. Hasanov, Dr. in Tech. Sc.¹, I.Y. Shirali, Dr. in Tech. Sc.², V.Yu. Tsvilitsin, Cand. in Tech. Sc.³, I.B. Bondar, Cand. in Tech. Sc.³, F.A. Ramazanov²¹Azerbaijan State University of Oil and Industry,²State Oil Company of Azerbaijan Republic,³Institute for Problems of Material Sciences named after I.M. Frantsevich of NAA, Ukraine

Keywords: magnetic valve, constant magnet, magnetic conductor, pull-in force, residual Br magnetic induction, demagnetization factor N, coercive force, reverse valve, bottomhole assembly.

The structure of two types of magnetic valve is offered and the calculation methods of their pull-in force developed as well. The formulas of calculation of pull-in force in the main area of valves' power characteristics are obtained. Experimental data are in alignment with theoretical calculations. Power characteristics of offered structures of magnetic valves may be changed in terms of the offered structural execution of magnetic valves. Experimental test of obtained formulas has been carried out. The ways of changing the power characteristics of magnetic valves in accordance with the requirements of certain applications are presented. The structures of magnetic reversing valves for drilling tools used in well drilling in various oil-gas bearing areas of SOCAR have been developed.

Постановка задачи

Существует много типов магнитных пружин. Подавляющее большинство их имеет степенную зависимость силы втягивания от перемещения. Но наибольший практический интерес представляют пружины, усилия которых мало зависят от перемещения взаимодействующих конструктивных элементов [1, 2].

На протяжении последних лет авторами статьи были детально исследованы два типа магнитных пружин с почти постоянной силой втягивания (с изменением величины в пределах 15 %) на длине рабочего хода пружины и проводился поиск для их применения в нефтегазовых технологиях. Эти типы пружин подтвердили свою перспективность для большинства конкретных приложений.

Первый тип магнитной пружины можно условно назвать "постоянный магнит – магнитопровод" (рис. 1). В этом типе пружин используется взаимодействие постоянного магнита (как правило, с большим энергетическим производением) с магнитопроводом, изготовленным из магнитно-мягкого материала.

Второй тип магнитной пружины можно условно назвать "два постоянных магнита". Она состоит из трубчатого постоянного магнита с аксиальной намагниченностью, внутри которого может перемещаться другой цилиндрический или кольцевой магнит с намагниченностью, являющейся антипараллельной намагниченности внешнего магнита. Эта конструкция допускает применение торцевых дисковых магнитопроводов для изменения формы силовой характеристики.

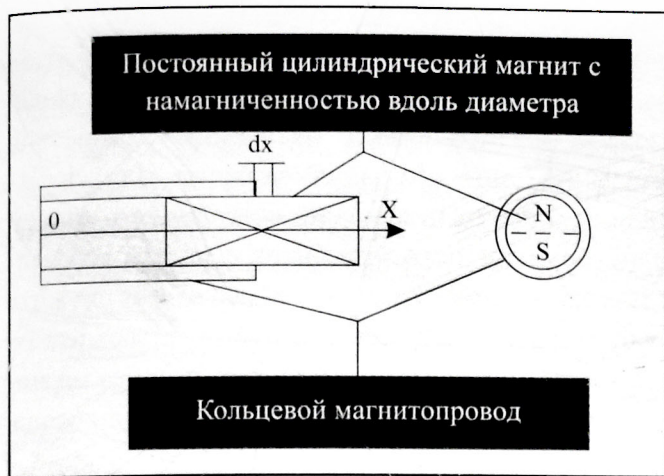


Рис. 1. Принципиальная схема работы магнитной пружины с цилиндрическим магнитом с диаметральной намагниченностью

Разработаны методы расчета и получены формулы для определения величины силы втягивания на основном участке силовых характеристик, построены модели обоих типов магнитных пружин, а также предложены пути изменения формы силовой характеристики на начальном и конечном участках. Полученные результаты экспериментально проверены на автоматизированной установке для механических испытаний Р 5.

Построение физической модели и вывод формулы для определения силы втягивания магнитной пружины первого типа

На рис. 1 дана принципиальная схема работы магнитной пружины первого типа "постоянный магнит – магнитопровод". Постоянный магнит может быть цилиндром с диаметральной намагниченностью или прямоугольной призмой с намагниченностью, перпендикулярной направлению перемещения.

Сечение магнита, перпендикулярное направлению перемещения пружины, может быть также эллипсом, ромбом или трапецией: во всех случаях пружина будет работать, правда, с меньшей силой втягивания (из-за уменьшения размагничивающего фактора). Требование к форме магнитопровода – наличие в нем полости с поперечным сечением, соответствующим поперечному сечению постоянного магнита (желательно, чтобы магнит заходил в нее по скользящей посадке). Для наибольшей эффективности пружины магнитопровод должен пропускать весь магнитный поток, создаваемый постоянным магнитом. Чем меньше промежуток между полюсами магнита и магнитопровода, тем меньше рассеяние магнитного потока и тем больше сила втягивания магнитной пружины. Расстояние между боковы-

ми сторонами (не полюсами) постоянного магнита и магнитопровода может быть произвольным – оно практически не влияет на силовые характеристики магнитной пружины данного типа.

В работе [3] показано, что сила втягивания взаимодействующих тел может быть рассчитана по формуле:

$$F = N^2 (B_r^2 / 2\mu_0) S, \quad (1)$$

где N – размагничивающий фактор, зависящий только от геометрической формы магнита; B_r – остаточная индукция материала, из которого изготовлен постоянный магнит; S – площадь поперечного сечения постоянного магнита.

Формула (1) получена с использованием метода виртуальных перемещений. При втягивании магнита на расстояние dx осуществляется работа:

$$dA = F dx, \quad (2)$$

где F – сила втягивания.

С другой стороны, внутри постоянного магнита до введения его в магнитопровод было размагничивающее поле B , обусловленное существованием полюсов магнита [3]:

$$B = -NB_r, \quad (3)$$

где N – размагничивающий фактор, B_r – остаточная индукция магнитно-твердого материала.

После введения магнита в магнитопровод это поле уменьшается почти до нуля и размагничивающий фактор можно условно также считать равным нулю. Поэтому, в нашем приближении, можно считать, что вся энергия поля размагничивания идет на выполнение работы по перемещению постоянного магнита. Плотность энергии магнитного поля w :

$$w = B^2 / 2\mu_0 = N^2 B_r^2 / 2\mu_0, \quad (4)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – универсальная магнитная постоянная. При перемещении магнита на расстояние dx происходит изменение энергии W магнитного поля:

$$dW = w dV, \quad (5)$$

где V – объем, в котором произошло изменение поля.

В нашем случае

$$dV = S dx, \quad (6)$$

где S – площадь сечения магнита перпендикулярно оси цилиндра.

Подставляя (4) и (6) в (5), получаем

$$dW = N^2 (B_r^2 / 2\mu_0) S dx. \quad (7)$$

Приравнявая (2) и (7) $dA = dW$ и сокращая на dx , получаем простое выражение для силы втягивания F постоянного магнита в магнитопровод (1). Сила втягивания, полученная в соответствии

с формулой (1), находится в хорошем соответствии с экспериментальными данными. Типичная экспериментальная силовая характеристика такой пружины приведена на рис. 2. Отличие силовых характеристик, полученных при вытягивании и выжимании, обусловлено наличием силы трения между постоянным магнитом и магнитопроводом: при вытягивании сила трения добавляется в силу вытягивания (верхняя кривая), а при выжимании – вычитается (нижняя кривая) (рис. 2).

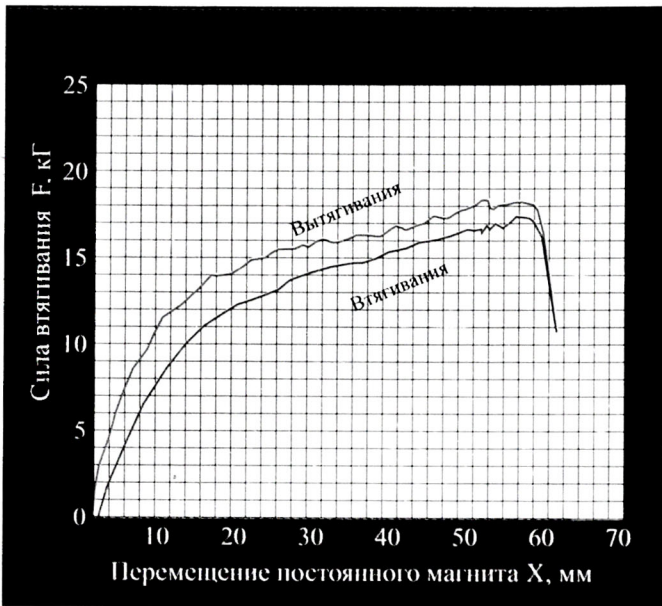


Рис. 2. Кривая зависимости силы вытягивания цилиндрического магнита $\varnothing 30$ мм с диаметальной намагниченностью из сплава $Nd - Fe - B$ с остаточной индукцией $B_r = 1.25$ Тл от перемещения магнита внутри трубчатого магнитопровода

Экспериментально также было доказано влияние на силу вытягивания размагничивающего фактора N на магнитных пружинах с использованием постоянных магнитов в форме прямоугольных параллелепипедов с одинаковой площадью поперечного сечения, но с разным расстоянием между полюсами. Усилие отличалось в 1.7 раза в соответствии с формулой (1) [3].

К преимуществам этого типа магнитной пружины можно отнести легко регулируемую длину хода. Рабочий ход пружины зависит от длины используемого магнита. Если нужен больший ход – используется длиннее магнит. Сила вытягивания при этом не меняется.

К недостаткам этой конструкции можно отнести большую силу притяжения полюсов постоянного магнита к магнитопроводу. Она может составлять 30–40 % от силы вытягивания при плохой центровке магнита в магнитопроводе. Оба полюса магнита должны находиться на одинаковом расстоянии от магнитопровода для уменьшения силы трения, которая может приводить к замет-

ному гистерезису на силовой характеристике пружины (см. рис. 2). В наших экспериментах использовались шлифованные магниты, входящие в магнитопровод из электротехнической стали E12 по скользящей посадке. Для уменьшения силы трения можно использовать тонкий слой немагнитного материала с малым коэффициентом трения. Этот слой также может служить коррозионной защитой постоянного магнита от влажного воздуха и центрировать полюса магнита на одинаковом расстоянии от магнитопровода.

Построение физической модели и вывод формулы для определения силы вытягивания магнитной пружины второго типа

Более широкие возможности, на наш взгляд, в конструкции магнитной пружины, которую можно назвать "два постоянных магнита". В конструкции этого типа используются внешний кольцевой магнит и внутренний цилиндрический магнит (или сложной формы, но с цилиндрической симметрией, например усеченный конус). Намагниченность обоих магнитов – аксиальная и антипараллельная. Принципиальная схема такой пружины представлена на рис. 3.

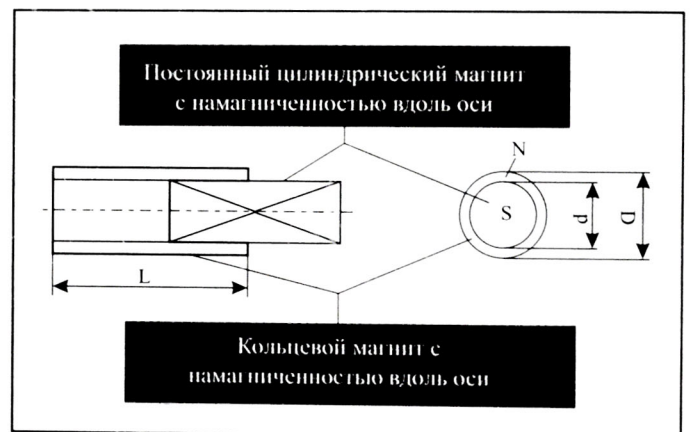


Рис. 3. Принципиальная схема работы магнитной пружины "два постоянных магнита"

Внутренний магнит сложной формы может пригодиться для изменения силовой характеристики магнитной пружины. В этой конструкции между магнитами может присутствовать тонкое немагнитное кольцо для обеспечения некоторых необходимых изменений в силовой характеристике пружины. Присутствие такого кольца несколько снижает силу вытягивания на основном участке из-за уменьшения площади поперечного сечения магнита. Это снижение легко может быть оценено по выведенной формуле (11). Силу вытягивания можно менять, уменьшая площадь полюса внутреннего магнита. Можно

уменьшать диаметр внутреннего магнита, а можно сделать в нем осевое отверстие, которое оказывается очень полезным для прикрепления магнита к тяге. Дело в том, что постоянные магниты системы $Nd - Fe - B$ имеют твердость раскаленной стали, и довольно хрупкие, что делает практически невозможным нарезание на них любой резьбы.

Рассмотрим детально вывод формулы для величины силы втягивания конструкции этого типа.

Ранее в работе [4] было показано, что сила втягивания подобной магнитной системы F хорошо описывается формулой:

$$F = B_r H S / \mu_0, \quad (8)$$

где S – площадь поперечного сечения внутреннего магнита, B_r – остаточная индукция материала, из которого изготовлены постоянные магниты, μ_0 – универсальная магнитная постоянная, H – поле внутри внешнего кольцевого магнита, которое определяется по формуле (9) [3]:

$$H = B_r [(1 + D^2/L^2)^{-0.5} - (1 + d^2/L^2)^{-0.5}], \quad (9)$$

где D , d , L – внешний, внутренний диаметры и длина трубчатого магнита.

Если остаточная индукция обоих постоянных магнитов одинакова, то из формул (8) и (9) получаем:

$$F = B_r^2 [(1 + D^2/L^2)^{-0.5} - (1 + d^2/L^2)^{-0.5}] S / \mu_0. \quad (10)$$

В данном случае:

$$S = \pi d^2 / 4. \quad (11)$$

Подставляя (11) в (10) получаем:

$$F = B_r^2 [(1 + D^2/L^2)^{-0.5} - (1 + d^2/L^2)^{-0.5}] \pi d^2 / 4 \mu_0. \quad (12)$$

Итак, получено выражение для зависимости величины силы втягивания пружины от геометрических размеров используемых магнитов.

Если проводить сравнение с магнитной пружиной первого типа, то при одинаковых диаметрах вторая пружина обеспечивает силу втягивания на 40–100 % больше. К преимуществам этой магнитной пружины можно отнести незначительное притяжение внутреннего магнита к внешнему (значительного гистерезиса в силовой характеристике, обусловленного присутствием силы трения, в экспериментах не выявлено). Типичная экспериментальная силовая характеристика пружины такого типа с $D = 40$ мм и $L = 35$ мм приведена на рис. 4.

Пожалуй, единственным недостатком этой конструкции можно считать такое простое увеличение длины хода пружины, как в случае первой конструкции. Дело в том, что при увеличении длины хода (без соответствующего увеличения внешнего диаметра пружины) сила втягивания заметно снижается в соответствии с формулой (12).

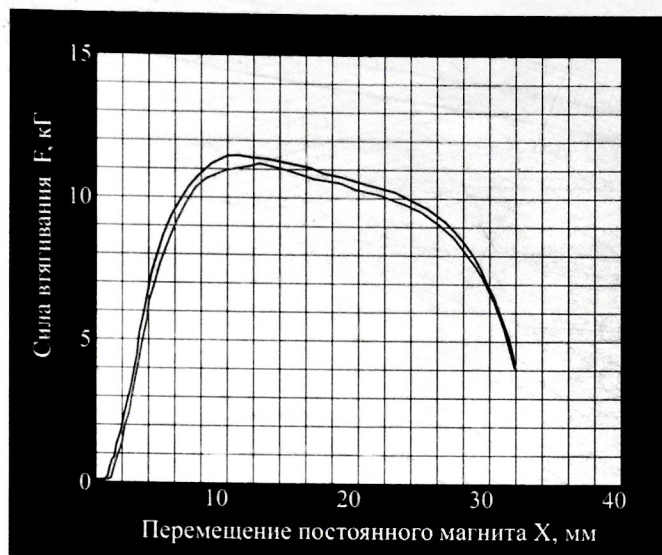


Рис. 4. Зависимость силы втягивания F от смещения сердечника X для магнитной цилиндрической пружины: внешний и внутренний диаметры трубчатого магнита 40 мм и 20 мм, его длина 30 мм, длина внутреннего магнита 35 мм, диаметр 19.7 мм

Преимущества второй конструкции магнитного механизма следующие:

- как говорилось ранее, она мощнее на 40–100 % при одинаковом диаметре внешнего магнита;

- ее можно оптимизировать до конкретного применения в зависимости от того, какой параметр в этом приложении является основным. Например, можно рассчитать диаметры магнитов, исходя из длины хода пружины и необходимого рабочего усилия;

- легко можно обеспечить усилия "доводки", которое может в 2–4 раза превышать рабочую силу пружины, причем это никак не повлияет на работу пружины на основном участке;

- участок нарастания силы пружины может быть практически полностью устранен (см. рис. 4, смещение до 10 мм);

- сила трения между, перемещаемыми магнитами незначительная, и не требуется точность центрирования магнитов, как в случае магнитной пружины первого типа.

Конструкция второго типа с торцевым магнитопроводом

На основе конструкции второго типа, например, легко изготовить различные варианты применения с повышенным ресурсом эксплуатации – они удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к этим устройствам: сила втягивания около 100–150 Н на основном участке и необходимой "доводкой" для окончательного зак-

рытия систем. "Доводка" обеспечивается введением цилиндрического магнитопровода на нерабочий торец пружины. Типичная силовая характеристика такой магнитной пружины с торцевым магнитопроводом приведена на рис. 5.

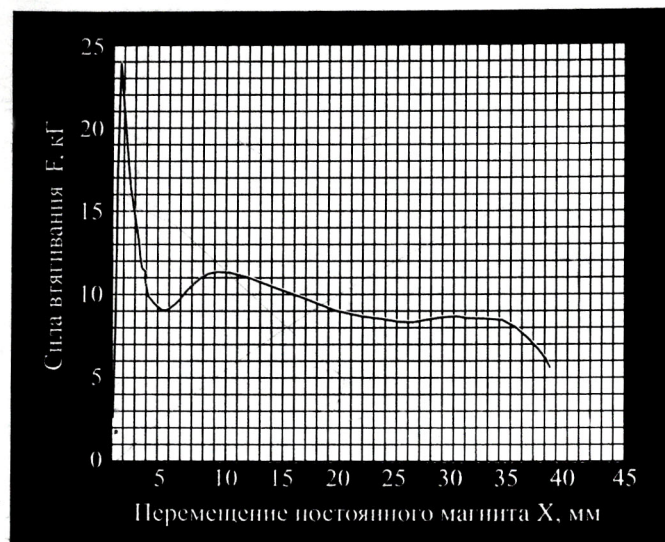


Рис. 5. Силовая характеристика пружины второго типа с торцевым магнитопроводом: внешний и внутренний диаметры трубчатого магнита 40 мм и 28 мм, длина внутреннего магнита 35 мм, диаметр 25 мм

Если нужно еще больше усилия "доводки", то на правый торец внутреннего магнита можно поместить торцевой дисковый магнитопровод.

Можно получить любое усилие "доводки" в интервале значений от нуля до максимального путем введения немагнитного слоя необходимой толщины между торцевым магнитопроводом и внутренним магнитом. То есть кривая на рис. 5 может начинаться с любой точки отрезка оси ординат от нуля до 25 кг. Также усилие "доводки" может регулироваться за счет изменения толщины торцевого магнитопровода.

Эта конструкция была успешно применена в разработанном нами обратном клапане, используемом для включения в компоновку бурового инструмента для бурения скважин. Клапан срабатывает при увеличении давления до 4 МПа и закрывается, когда давление падает менее 1 МПа. Такую силовую характеристику обеспечить с помощью обычных механических пружин не всегда представляется возможным.

Влияние торцов магнитов на силовую характеристику

В конструкции второго типа большую роль в формировании силовой характеристики играют торцы магнитов, причем их влияние увели-

чивается при увеличении отношения длины пружины к ее диаметру. На типичной силовой характеристике пружины обычно присутствует два максимума, причем первый всегда является больше второго (см. рис. 4), поскольку в его формировании участвуют оба полюса магнита. "Полка" силовой характеристики (на участке 30–60 мм) хорошо рассчитывается по формуле (12), а максимумы являются следствием влияния торцов.

Мы экспериментально доказали это, изготовив пружину удвоенной длины при неизменном диаметре. При этом максимумы стали резче, а "полочка" опустилась до усилия в 5.5 кгс (рис. 6).

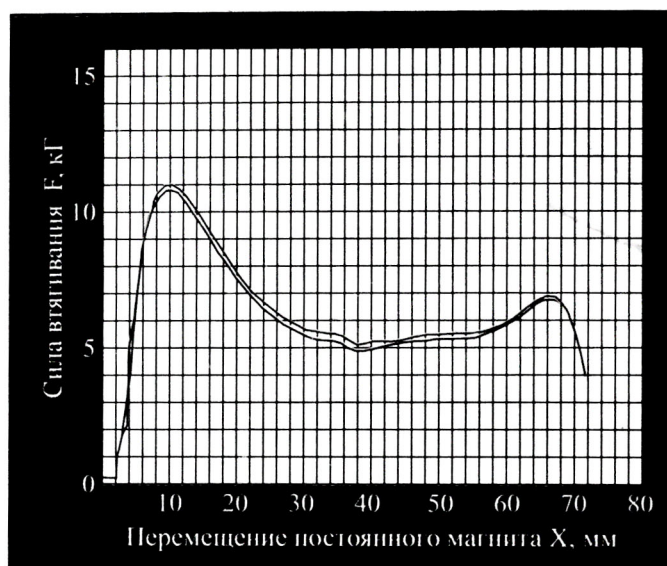


Рис. 6. Силовая характеристика магнитной пружины удвоенной длины: длина трубчатого магнита 70 мм, внешний диаметр 40 мм, внутренний диаметр 25 мм

Если необходимо получить плавную силовую характеристику пружины, то эти максимумы можно "срезать" за счет уменьшения площади сечения торцов. Заменяв центральный цилиндрический магнит на составной магнит, состоящий из двух усеченных конусов с общим основанием, можно получить практически постоянную силу втягивания при достаточно длинной пружине.

Учитывая результаты моделирования магнитных пружин по первой схеме были разработаны и изготовлены конструктивные исполнения обратных клапанов для бурового инструмента. Эти инструменты включаются в конструкцию компоновок буровых и обсадных труб (рис. 7).

Основной целью применения этих инструментов является предупреждение проникновения промывочной жидкости внутрь колонн

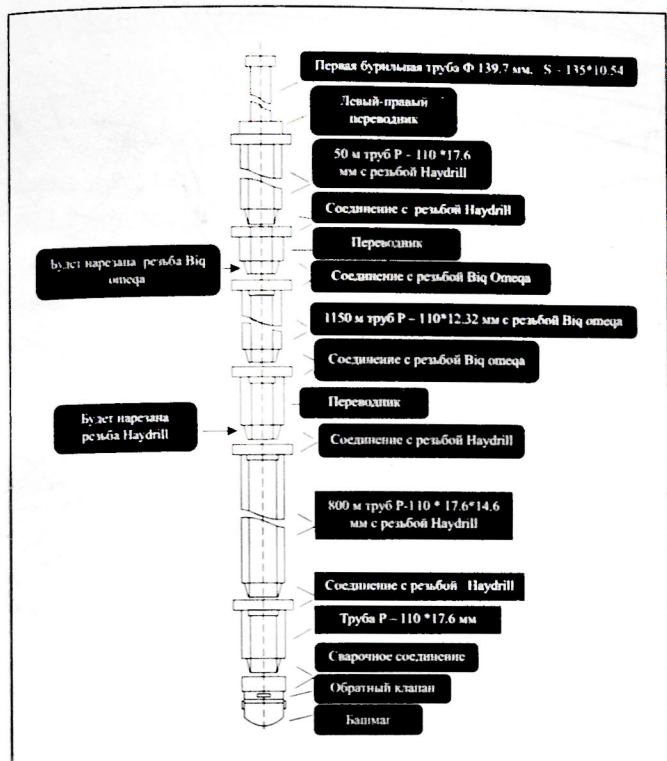


Рис. 7. Вариант компоновки низа буровой колонны с обратным клапаном

Таблица 1

Возможные диаметральные размеры труб, мм	Метрические характеристики магнитных механизмов, мм
406.4, 377.0, 351.0, 339.7, 323.9	305
298.5, 273.1, 244.5	227
219.1, 193.7, 177.8	160
168.3, 146.0, 139.7, 127.0, 114.3, 101.6	94
101.6, 89.0	75

при нефтегазоводопроявлениях и заполнение внутренней полости колонн тяжелой жидкостью. По результатам проектно-конструкторской проработки разработан и предложен для применения номенклатурный ряд магнитных механизмов и соответствующих клапанов в трубных соединениях нефтегазового сортамента (рис. 8, табл. 1).

За последние два года свыше 20 комплектов разработанных клапанов согласно соответствующим договорам были приобретены Трестом "Комплексные буровые работы" и были использованы по результатам приемочных испытаний при бурении скважин на различных

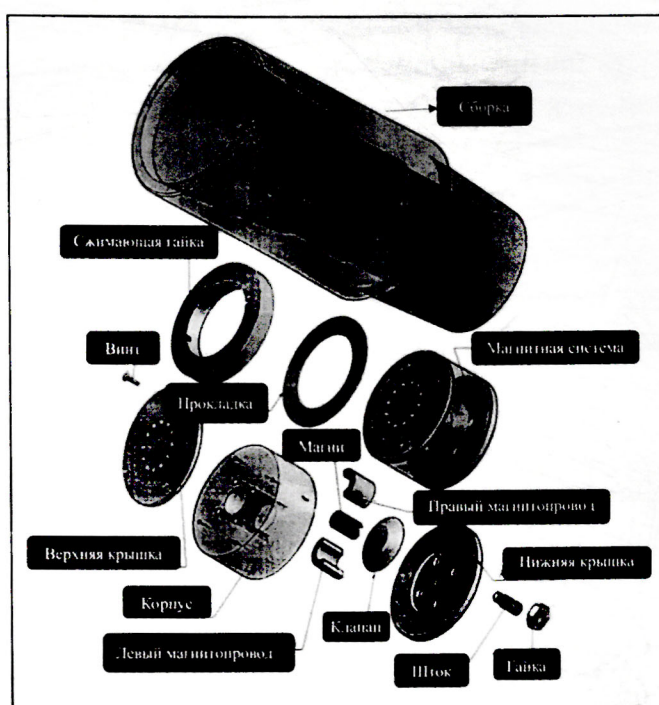


Рис. 8. Конструкция обратного клапана, включаемого в КНБК

площадях SOCAR (табл. 2).

Клапаны, показавшие свою работоспособность и надежность в эксплуатации были рекомендованы для применения в практике бурения скважин.

Выводы

1. Предложены конструкции магнитных пружин двух типов "магнит-магнитопровод" и "два постоянных магнита".
2. Выведены формулы зависимости величин

Таблица 2

Площадь	Номер скважины	Диаметры колонн, мм	Количество, штук
Нефт Дашлары	2628, 2588, 2672	114, 127	5
Гарби Абшерон	9	114, 127	5
Садан	1824, 1817, 1815	146, 168, 178	15

ны силы втягивания на основном участке перемещения. Эти формулы хорошо подтверждаются проведенными экспериментами.

3. На основании предложенных моделей можно рассчитывать параметры магнитных пружин, например, в зависимости от длины хода пружины и необходимого усилия.

4. На базе полученных формул можно провести оценки пригодности предлагаемых конструкций для их использования в конкретных приложениях.

5. Также можно провести оптимизацию магнитной пружины: например, при каких геометрических размерах может достигаться мак-

симальная сила втягивания или какой должна быть магнитная пружина, чтобы при одинаковой силе втягивания на ее изготовление потребовалось бы минимальное количество (по массе) магнитного материала.

6. Конструкция "два постоянных магнита" позволяет получить очень разнообразные формы силовой характеристики за счет использования магнитопроводов, удовлетворяющих

практически любым конкретным применениям.

7. Путем реализации второго типа магнитных пружин в конструкциях обратных клапанов разработан их номенклатурный ряд, некоторые из которых (с диаметрами колонн 114, 127, 146, 168, 178) были использованы в буровых инструментах для бурения скважин на различных нефтегазовых площадях SOCAR.

Список литературы

1. *Kun-Xi Qian, Pei Zeng, Wei-Min Ru, Hai-Yu Yuan*. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 39, 1 (2003).
2. <http://www.linmot.com/products/magnetic-spring/>
3. *Цивилицин В.Ю., Мильман Ю.В., Гончарук В.А., Бондарь И.Б.* Доклады национальной академии наук Украины, 1 (2011).
4. *Альтман А.Б., Герберги А.Н., Гладышев П.А. и др.* Постоянные магниты: справочник под ред. Ю.М.Пятина. – М.: Энергия, 1980.

References

1. *Kun-Xi Qian, Pei Zeng, Wei-Min Ru, Hai-Yu Yuan*. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 39, 1 (2003).
2. <http://www.linmot.com/products/magnetic-spring/>
3. *Tsivitsilin V.Y., Mil'man Y.V., Goncharuk V.A., Bondar' I.B.* Doklady natsionalnoy akademii nauk Ukrainy, 1 (2011).
4. *Al'tman A.B., Gerbergi A.N., Glodyshev P.A. i dr.* Postoyannye magnity: spravochnik pod red. Y.M. Pyatina. – M.: Energia, 1980.