

МЕХАТРОННЫЕ ПРУЖИННЫЕ ПРИВОДЫ ДЛЯ ШТАНГОВЫХ ГЛУБИННЫХ НАСОСОВ

Белогур В.П.¹, Жавнер В.Л., Жавнер М.В.², Чжао Вэнь

¹ООО ФИРМА «СПРИНГ-ЦЕНТР»;

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург

Ключевые слова: энергосбережение; мехатронный привод; пружинный привод; рекуперация энергии; рабочие операции циклического действия; штанговые глубинные насосы, инерционные силы; уравнивающие устройства; производительность; быстрдействие.

Аннотация. При разработке теоретических основ проектирования технологического оборудования совершающих возвратно-поступательные перемещения, особенно перспективным, с точки зрения снижения энергопотребления, является разработка принципиально нового вида привода для штанговых глубинных насосов, что позволит снизить массу, габариты и стоимость фундаментов для их установки. Разработка теоретических основ проектирования оборудования с минимальными затратами энергии позволит разработать как алгоритмы проектирования, так и оценки технологического оборудования с позиций энергетических затрат. Актуальность задачи снижения энергетических затрат в технологическом оборудовании заключается в том, что в настоящее время отсутствует системный подход к выявлению и оценке составляющих энергопотребления. Снижение энергетических затрат при нефтедобыче и при осуществлении погрузочно-разгрузочных операций в различных отраслях промышленности, например, в 3 раза, позволит понизить требуемую мощность приводов в 9 раз.

MECHATRONIC SPRING DRIVES FOR ROD DEPTH PUMPS

Belogur V.P.¹, Zhavner V.L., Zhavner M.V.², Zhao Wen

¹LLC firm «SPRING-CENTER»;

²Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg

Keywords: energy saving; mechatronic drive; spring drive; energy recovery; cyclic operation; rod deep pumps, inertial forces; balancing devices; performance; speed.

Abstract. When developing the theoretical foundations for the design of process equipment performing reciprocating movements, especially promising, from the point of view of reducing energy consumption, is the development of a fundamentally new type of drive for rod deep pumps, which will reduce the weight, dimensions and cost of foundations for their installation. The development of theoretical foundations for designing equipment with minimal energy costs will allow developing both design algorithms and evaluation of process equipment from the standpoint of energy costs. The urgency of the task of reducing energy costs in process equipment lies in the fact that at present there is no systematic approach to identifying and evaluating the components of energy costs. Reducing energy costs in oil production and in the implementation of loading and unloading operations in various industries, for example, by 3 times, will reduce the required drive power by 9 times.

При обсуждении энергетических проблем основное внимание уделяется разработке и использованию альтернативных источников энергии, а понятие «возобновляемые» источники вообще недопустимо. На взгляд авторов наиболее важным направлением является снижение потребления до такого уровня, когда промышленность увеличивает производство без увеличения потребления энергии.

Рассматривая жизненный цикл технологического оборудования и инфраструктуру, которая обеспечивает его функционирование, можно отметить, что основными характеристиками, определяющими затраты энергии на стадии изготовления является масса оборудования. В процессе эксплуатации масса оборудования определяет затраты энергии на строительство зданий и поддержание их рабочем состоянии. Масса его подвижных частей, габаритные размеры, система приводов и установочная мощность определяют текущие затраты энергии. При сравнительном анализе различных видов технологического оборудования одного функционального назначения все вышеперечисленные характеристики, отнесенные к единице продукции, могут служить критериями оценки их энергетической эффективности [1-7].

Разработка теоретических основ проектирования оборудования с минимальными затратами энергии позволит разработать как алгоритмы проектирования, так и оценки технологического оборудования с позиций энергетических затрат. Актуальность задачи снижения энергопотребления технологическим оборудованием состоит в том, что в настоящее время отсутствует системный подход к выявлению и оценке составляющих энергетических затрат. Снижение энергетических затрат, например, в три раза, позволит снизить необходимую мощность приводов в девять раз. Это касается нефтедобычи прежде всего и грузозачно-разгрузочных операций в большинстве отраслей промышленности.

Штанговые глубинные насосы используются в 65% всех установок по добыче нефти. При разработке теоретических основ проектирования технологического оборудования и его отдельных узлов, совершающих возвратно-поступательные перемещения, особенно перспективным, с точки зрения снижения энергопотребления, является разработка принципиально нового вида привода для штанговых глубинных насосов, что позволит снизить его массу, габаритные размеры и стоимость фундаментов для их установки.

Энергопотребление технологическим оборудованием, определяются работой, затрачиваемой на выполнение технологических операций, работой, связанной с диссипативными потерями, работой, обусловленной силами инерции, работой, затрачиваемой на преодоление сил тяжести и затратами энергии на системы управления [7].

На рисунке 1 представлена схема потребления энергии в современном технологическом оборудовании.

Мехатронные пружинные приводы с рекуперацией энергии обладают наименьшими затратами энергии по сравнению со всеми другими типами приводов, имеют наилучшие показатели по удельной мощности (мощность, развиваемая приводом, отнесенная к его весу – Вт/Н). Кроме того, они обладают следующими преимуществами:

- 1) высокая надежность;
- 2) высокий срок службы;
- 3) низкий уровень шума;
- 4) пожароустойчивость и взрывобезопасность.
- 5) нечувствительность к перепаду температур;
- 6) благоприятные динамические режимы.



Рис. 1. Схема потребления энергии в современном технологическом оборудовании

По максимальному габаритному размеру, вдоль направления перемещений, они могут соперничать с электромеханическими модулями для прямолинейных перемещений с использованием винтовой передачи.

Линейные пружинные приводы с рекуперацией энергии имеют меньший линейный габарит в направлении движения по сравнению с актюаторами, пневматическими и гидравлическими цилиндрами, и имеют равные показатели с модулями для линейных перемещений с подвижными столами с электроприводом.

В работе поставлена задача разработки технической идеологии проектирования мехатронного пружинного привода при перемещении рабочих органов в вертикальной плоскости с величиной перемещения до 2-х метров и перемещаемой массой имеют штанговые глубинные насосы, которых в мире эксплуатируется не менее 10 000 штук.

Рассматривая режимы работы штангового глубинного насоса необходимо отметить, что рабочие движения происходят в вертикальной плоскости, как правило, в пределах до 2м и с массой нагрузки до 8000кг. Количество циклов в минуту ориентировочно равно 15. В штанговом глубинном насосе основными нагрузками являются силы тяжести и инерционные нагрузки.

Классическим вариантом привода штангового глубинного насоса является привод, имеющий выходное звено, совершающее возвратно-качательное движение, причем с одной стороны, на этом звене закреплен сегмент блока с гибким элементом, который в свою очередь соединен со штангой насоса. С другой стороны, выходное звено соединено с противовесом. По такой схеме выполнено подавляющее большинство нефтяных станков-качалок. В последние годы появились другие виды приводов штанговых глубинных насосов, из которых выделим следующие типы:

- 1) приводы с пневматическими системами уравнивания;
- 2) приводы с использованием гидравлических цилиндров без системы уравнивания;
- 3) приводы с электроприводом и грузовым уравниванием;
- 4) приводы с линейными электродвигателями с грузовым уравниванием [8, 9].

В работе рассматривается мехатронный пружинный привод с рекуперацией энергии, структурная схема которого представлена на рисунке 2. Привод состоит из пружинного аккумулятора, двигателя для компенсации диссипативных потерь,

уравновешивающего устройства и системы управления с информационно-измерительными компонентами.



Рис. 2. Схема мехатронного пружинного привода с рекуперацией энергии

На рисунке 3 представлена схема пружинного привода для нефтяного станка-качалки с центральным расположением штанги и грузовым уравновешиванием.

Первым мехатронным пружинным приводом с рекуперацией энергии можно считать устройство, запатентованное в СССР в 1977 году шведской фирмой Electrolux [10].

Пружинный аккумулятор в этом устройстве аналогичен пружинному аккумулятору, приведенному в описании к патенту Германии, полученному Л. Сциллардом и А.Эйнштейном «Электромеханическое устройство для получения колебательных движений» [11]. Устройство предназначалось для холодильных компрессоров, и в нем использовался линейный электродвигатель и линейный пружинный аккумулятор.

В мехатронном пружинном приводе с рекуперацией энергии основным двигателем является пружинный аккумулятор, который за счет запасенной энергии разгоняет рабочие массы, а затем их тормозит, накапливая потенциальную энергию. При таком построении мехатронного привода пружины определяют режимы работы, а вспомогательный привод обеспечивают компенсацию диссипативных потерь.

Для мехатронных пружинных приводов с рекуперацией энергии используются стандартные винтовые цилиндрические пружины.

Пружинный привод с гибким элементом предлагается использовать в системах уравновешивания штанговых глубинных насосов для нефтедобычи. Для повышения быстродействия, уравновешивание постоянной статической нагрузки можно осуществить за счет использования кривошипно-ползунного механизма, в котором длина шатуна равна длине (радиусу) кривошипа, а кривошип снабжен пружинным аккумулятором с моментной характеристикой, изменяющейся по синусоидальному закону.

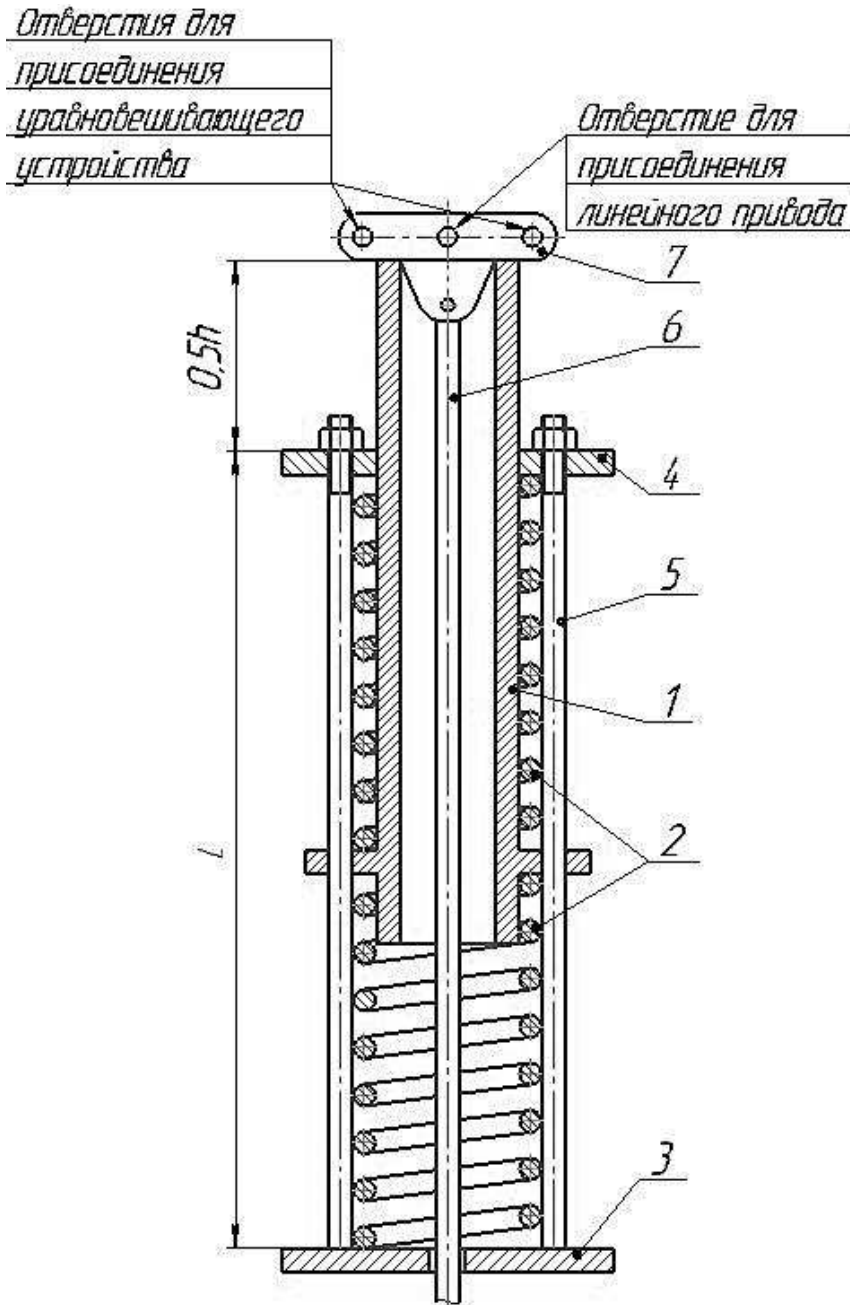


Рис. 3. Схема пружинного привода с центральным расположением штанги и уравниванием: 1 – выходное звено, 2 – пружины, 3 – основание, 4 – плита, 5 – стяжки, 6 – штанга, 7 – траверса

Динамическая модель привода представлена на рисунке 4.

В мехатронном пружинном приводе с рекуперацией энергии основным двигателем является пружинный аккумулятор, который за счет запасенной энергии разгоняет рабочие массы, а затем их тормозит, накапливая потенциальную энергию. При таком построении мехатронного привода пружины определяют режимы работы, а вспомогательный привод обеспечивают компенсацию диссипативных потерь.

Для мехатронных пружинных приводов с рекуперацией энергии используются стандартные винтовые цилиндрические пружины.

Пружинный привод с гибким элементом предлагается использовать в системах уравнивания штанговых глубинных насосов для нефтедобычи. Для

повышения быстродействия, уравнивание постоянной статической нагрузки можно осуществить за счет использования кривошипно-ползунного механизма, в котором длина шатуна равна длине (радиусу) кривошипа, а кривошип снабжен пружинным аккумулятором с моментной характеристикой, изменяющейся по синусоидальному закону.

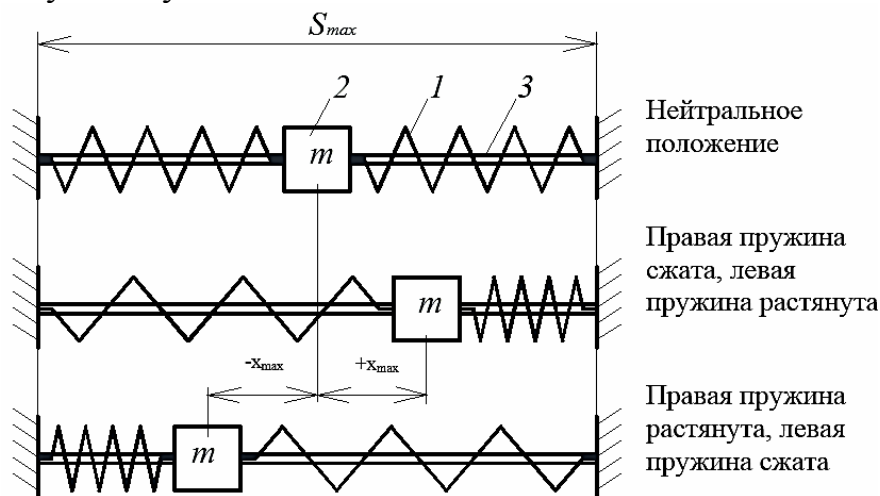


Рис. 4. Динамическая модель пружинного привода

Уравнивание постоянной статической нагрузки обеспечивается последовательным соединением кривошипно-ползунного механизма с кривошипно-кулисным механизмом, причем кривошип является их общим элементом, а длина кривошипа равна длине шатуна и расстоянию между осями шарнирных соединений кулисного механизма с основанием. Этот размер обозначен l . Кроме того кулиса выполнена в виде гибкого элемента, огибающего два блока, один из которых установлен на оси кривошипа, а второй на основании, причем расстояние между осью блока и осью соединения кривошипа с основанием, равно длине кривошипа (рис. 4) [12].

При конфигурации уравнивающего устройства, когда оси O_1 и O_2 совпадают, усилие пружин должно быть равно нулю, а при конфигурации, когда расстояние между осями O_2 и O_3 максимально и равно $3l$ максимальное усилие двух пружин равно:

$$F_2 = 4mg, \quad (1)$$

причем суммарная жесткость двух пружин должна быть равна:

$$c = \frac{2mg}{l}. \quad (2)$$

При таких характеристиках пружин получаем синусоидальную моментную характеристику, обеспечивающую уравнивание массы штанги нефтяного станка-качалки (рис. 5).

Второй вариант пружинного привода для штанговых глубинных насосов представлен на рисунке 6. Пружинный привод глубинного скважинного насоса содержит штангу 1, подвижно смонтированную в направляющих 2 и пружинные двигатели 3 с пружинами сжатия. На штанге смонтирован блок 4. Кроме того имеется подвижный элемент 5, на котором по нормали к равновесному положению штанги смонтирован двойной блок 6, ось вращения которого расположена параллельно оси вращения блока 4. Подвижный элемент 5

выполнен винтовым с возможностью изменения расстояния между блоками 4 и 6. На одной прямой с блоком 4 штанги в ее равновесном положении и двумя блоками 6 смонтированы два отклоняющих блока 7, закрепленными на основании.

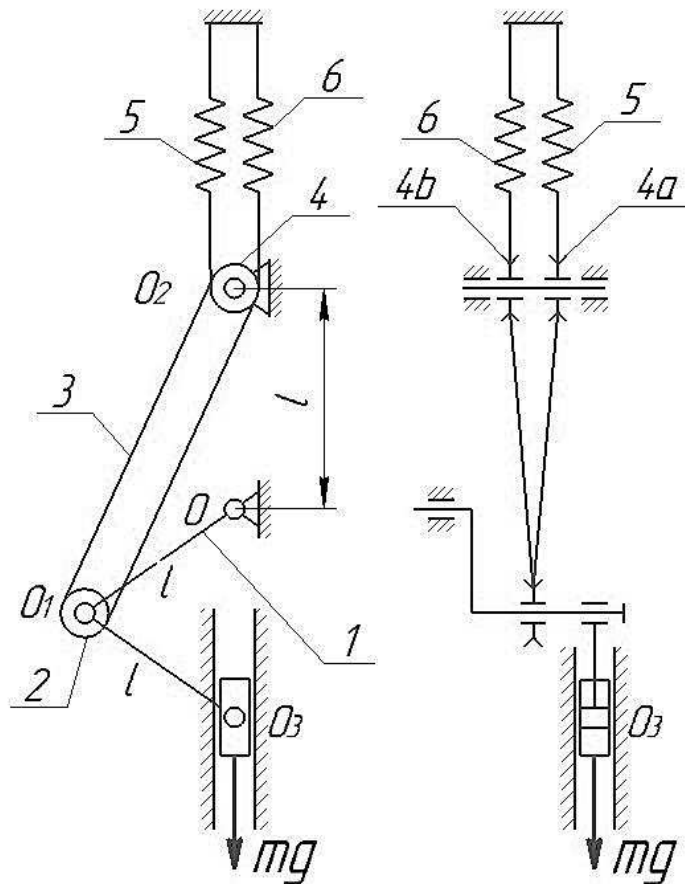


Рис. 4. Схема уравновешивающего устройства для привода штангового глубинного насоса: 1 – поворотный рычаг, 2 – блок, 3 – гибкий элемент, 4а, 4б – блоки, закрепленные на основании, 5,6 – пружины

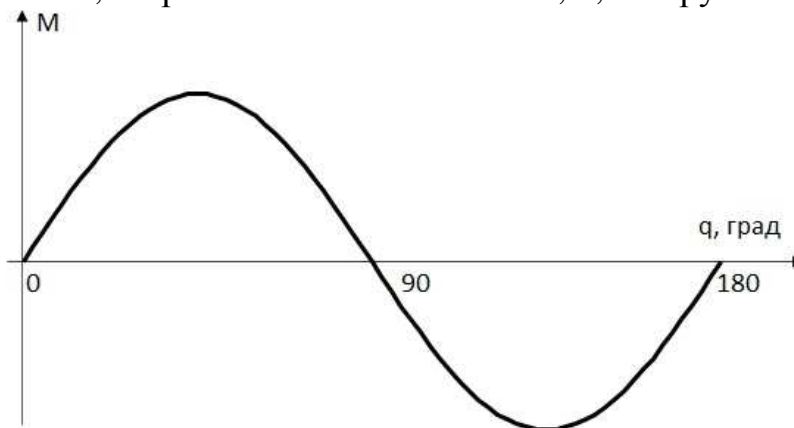


Рис. 5. Синусоидальная моментная характеристика уравновешивающего устройства

Штоки пружинных двигателей 3 соединены между собой гибким элементом 8, выполненным в виде троса или каната, при этом один конец гибкого элемента 8 прикреплен к штоку верхнего пружинного двигателя 3, последовательно огибает один из отклоняющих блоков 7 на 360 градусов один из двойных блоков 6, блок 4 штанги 1 и в обратной последовательности, огибает

второй из двойных блоков 6, и затем второй из отклоняющих блоков 7 и соединен со штоком второго пружинного двигателя 3 [13].

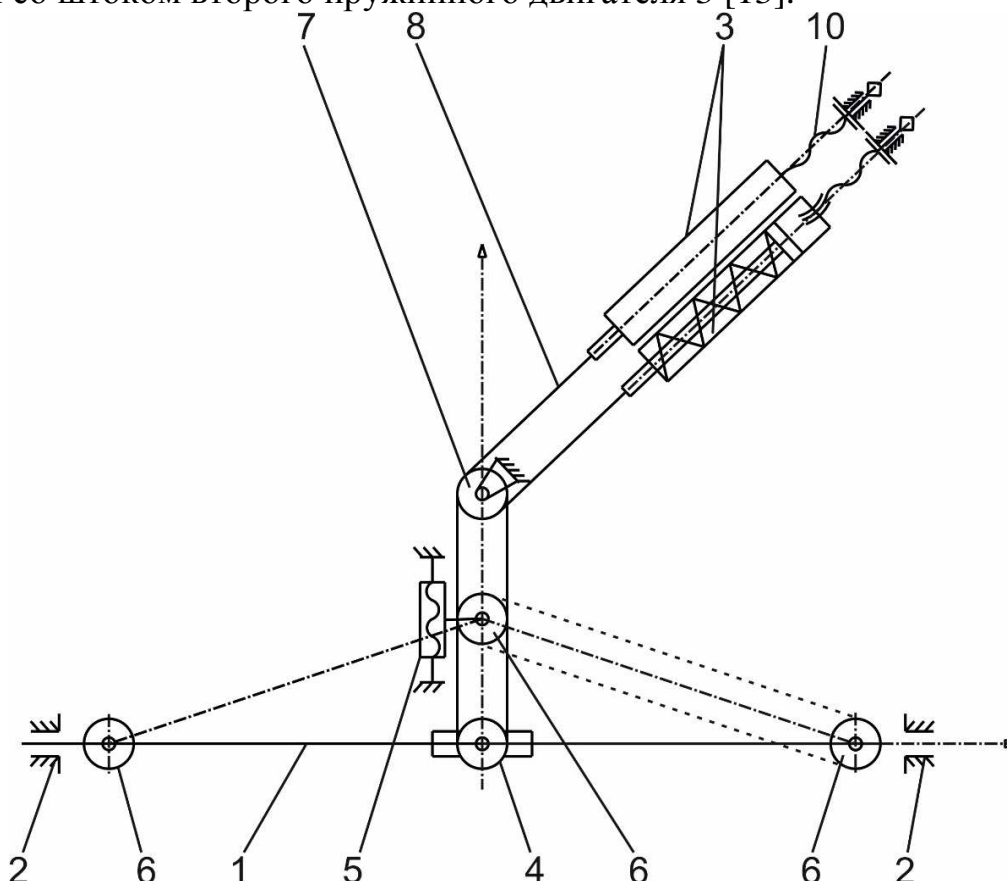


Рис. 6. Упрощенная схема пружинного привода глубинного скважинного насоса

Дальнейшим направлением исследования является разработка трех основных модулей, показанных выше и возможность компоновки привода в горизонтальной плоскости и его размещения в контейнерах. Это позволит перейти к заводской сборке и наладке и улучшить условия эксплуатации.

Список литературы

1. Патент №1006208 РФ. Механическая рука / Л.М.Болотин, А.И. Корендяев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес. – Заявка №3368826/25-08 от 24.12.81; опубл. 23.03.83, Бюл. №11.
2. Корендяев А.И., Саламандра Б.Л., Тывес Л.И. Теоретические основы робототехники. В 2 кн. – М.: Наука. – 2006.
3. Надеждин, И.В. Исполнительные механизмы цикловых машин-автоматов и мехатронных систем. – Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015.– 280 с.
4. Надеждин И.В., Мочанов А.А. Экспериментальные исследования динамики мехатронных грузочных устройств с рекуперацией энергии // Фундаментальные основы механики. – 2017. – №2. – С. 54-58.
5. Zhavner V.L., Matsko O.N. Spring drives for reciprocal motion // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2016, no. 1, pp. 1-5.
6. Zhao Wen, Zhavner V.L. The use of pneumatic cylinders with a return spring to compensate for balance losses in mechanical regenerative drives for reciprocating movements // 6-th international BAPT conference “POWER TRANSMISSIONS 2019”. VARNNA, 2019, vol. 1, pp. 107-112.
7. Zhavner V.L., Matsko O.N., Zhavner M.V. Comparative Analysis of Mechatronic Drives for Reciprocal Motion // International Review of Mechanical Engineering (I.RE.ME.). 2018, no. 12-9, pp. 784-789.

8. Patent No. CN 2284867 UY. Linear motor driven beam-pumping unit Shen Fengquan Sun Ping, Wang Tongbin. – 1998.06.24.
9. Patent No. CN 0561759. Submersible oil well pump set having underground drive conversion device / Zhang Ruiqi, Zhao Ksikhuan, Zhao Xihua. – 2015.09.07.
10. Патент №568346. Механическая рука / Геран Арвид Хеннинг Ридерстрам. – Заявка №2111127/08 от 18.02.75; опубл. 05.08.77, Бюл. №29.
11. Patentschrift №562040. Elertromagnetische Vorrichtung zur Erztugung einer oszillierenden Bewegungen / Dr. Leo Szilard und Dr. Albert Einstein. – 1933. – Prioritatsdatum 1 Juni 1928.
12. Патент № 2741187 РФ. Привод скважинного штангового насоса / В.П. Белогур, В.Л. Жавнер, М.В. Жавнер, Чжао Вэнь. – Заявка №2020135561 от 29.10.2020; опубл. 22.01.2021, Бюл. №3.
13. Патент № 2777174 РФ. Пружинный привод глубинного скважинного насоса / В.П. Белогур, В.Л. Жавнер, М.В. Жавнер, Чжао Вэнь. – Заявка №2021125841 от 01.09.2021; опубл. 01.08.2022, Бюл. №22.

Сведения об авторах:

Белогур Валентина Павловна – к.т.н., генеральный директор;

Жавнер Виктор Леонидович – д.т.н.;

Жавнер Милана Викторовна – к.т.н., доцент;

Чжао Вэнь – к.т.н.