



УДК 622.24.05

ОДНОВИНТОВЫЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МАШИНЫ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ



SINGLE-SCREW HYDRAULIC MACHINES IN THE OIL AND GAS INDUSTRY: FIELDS OF APPLICATION AND DEVELOPMENT PROSPECTS

Балденко Д.Ф.

доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
ОАО «НПО Буровая техника»
dbaldenko@mail.ru

Балденко Ф.Д.

кандидат технических наук, доцент,
РГУ нефти и газа имени И.М.Губкина
fbaldenko@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности конструкции, преимущества, характеристики и области применения одновинтовых гидравлических машин в различных отраслях промышленности и нефтегазовом комплексе. Представлен исторический обзор развития одновинтовых насосов и гидродвигателей в нашей стране и за рубежом, обозначены перспективные направления совершенствования этого вида оборудования для современных технологий бурения и нефтедобычи.

Ключевые слова: Муано, циклоидальное зацепление, одновинтовой насос, винтовой забойный двигатель, ротор, статор.

Baldenko D.F.

Ph.D. in Technical Sciences,
Chief scientist,
OJSC «NPO Drilling Techniques»
dbaldenko@mail.ru

Baldenko F.D.

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Russian state university of oil and gas
named after I.M. Gubkin
fbaldenko@mail.ru

Annotation. Design features, advantages, characteristics and application areas of single screw hydraulic machines in various industries and oil and gas complex are considered. The historical review of development of single screw pumps and hydraulic motors in our country and abroad is presented, perspective directions for improvement of this type of equipment for modern drilling and oil production technologies are marked.

Keywords: Moineau, cycloidal gearing, progressive cavity pump, downhole displacement motor, rotor, stator.

Среди разнообразного оборудования, используемого как в общем машиностроении, так и в нефтегазовом комплексе видное место (по проектно-конструкторским решениям, научно-исследовательским подходам, номенклатуре производства, общим энергетическим затратам) занимают гидравлические машины, без которых было бы невозможно появление и развитие многих современных технологических процессов.

Одним из перспективных видов гидравлических машин, находящихся все большее распространение во многих отраслях промышленности, являются одновинтовые машины, относящиеся к классу роторных объемных машин.

В наши дни, когда во всех промышленно развитых странах широко применяются одновинтовые насосы и гидромоторы, немногие задумываются об истории появления и развития этих машин.

Прототипы винтовых насосов имеют давнюю историю, берущую свое начало еще в древней цивилизации Месопотамии. Примерно за 250 лет до нашей эры великий греческий ученый Архимед изобрел водоподъемную машину, вошедшую в историю техники как Архимедов винт. Ее действие основывается на использовании силы тяжести и свойств винтовой поверхности. Винт, находящийся в лотке, устанавливается наклонно и одним концом погружается в воду. Угол наклона винта выбирается меньше угла подъема винтовой линии. При этом условия забранная порция воды при вращении винта поступательно перемещается снизу вверх на 3–4 м.

Только спустя два тысячелетия принцип Архимедова винта был преобразован в объемный (гидростатический) насос. Это удалось выполнить французскому инженеру Rene Moineau (1887–1948 гг.), который предложил принципиально новую схему роторной объемной гидравлической машины, заложив в нее основополагающий принцип «капсулизма» [1].

Этот принцип, ставший новшеством в теории и практике винтовых машин, заключается в применении в качестве рабочих органов (РО) только двух винтовых деталей с циклоидальным зацеплением – ротора и статора, выполняющего функции замыкателя (который в других устройствах выполнен как обязательная дополнительная деталь) и радиальной опоры. Это существенно упростило конструкцию РО и позволило создавать разнообразные схемы гидромашин и компрессоров с различным



кинематическим отношением (числом заходов) и компоновкой (с неподвижным статором, с неподвижным ротором, с подвижностью обеих деталей и др.). Кроме того, такое исполнение РО позволяет выполнять одну из сопряженных деталей (статор) с эластичным покрытием, что значительно расширяет область применения таких машин при использовании практически любых жидкостей и смесей.

Сочетание нового принципа действия (капсулизма) и конструктивного новшества (выполнение внутренней винтовой поверхности статора из эластомера) обеспечило универсальность применения гидромашин в различных рабочих средах и условиях эксплуатации. Кроме того, такая конструктивная особенность упрощает технологию изготовления статора, компенсирует погрешности в зацеплении РО и позволяет регулировать уплотнительную способность РО за счет создания натяга в паре.

Таким образом, принцип капсулизма, предложенный Муано и реализованный им в винтовом героторном механизме с внутренним циклоидальным зацеплением, заключается в создании герметичных винтообразных объемов (капсул), образованных между поверхностями ротора и статора, теоретически герметично отделенных от всасывающей и нагнетательной камеры.

В современной трактовке реализация принципа капсулизма Муано достигается при выполнении пяти условий, которые превращают простейший шнековый насос, например Архимедов винт, в объемную гидромашину:

- 1) числа заходов статора и ротора должны отличаться на единицу: $z_1 = z_2 + 1$;
 - 2) винтовые поверхности статора и ротора должны иметь одинаковое направление (правое или левое);
 - 3) отношение шагов винтовых поверхностей ротора t и статора T должно быть пропорционально отношению их чисел зубьев: $t/T = z_2/z_1$;
 - 4) длина РО L должна быть не менее одного шага статора: $L \geq T$;
- профили ротора и статора должны быть взаимно огибаемыми и находиться в непрерывном контакте во время зацепления.

Первый патент Р. Муано (рис. 1) имел приоритет 13 мая 1930 г. и защищал устройство, которое может быть использовано как насос, мотор, компрессор или механическая передача [2]. Этот патент знаменует собой рождение нового принципа объемных гидравлических машин.

На рисунке 1 представлены РО насоса с однозаходным ротором ($z_2 = 1$) в продольном и поперечном разрезах. Между винтовыми поверхностями РО образуются три типа камер: всасывающие камеры, шлюзы (капсулы) и нагнетательные камеры. При вращении ротора по часовой стрелке жидкость движется слева направо, при вращении ротора в обратную сторону – справа налево.

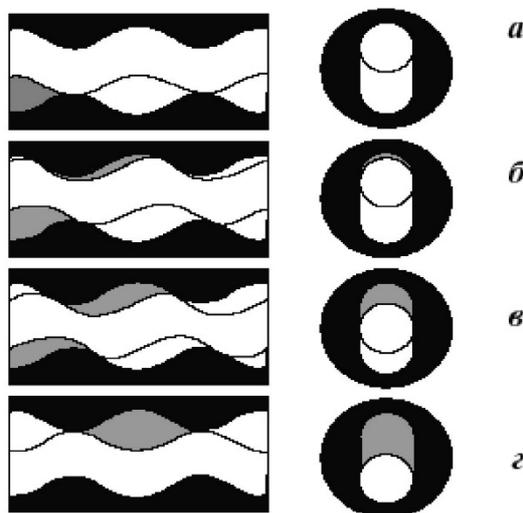


Рисунок 1 – Рабочие органы одновинтового насоса Муано (в различных фазах положения ротора в статоре при повороте на угол 180°)

Рабочий процесс объемного насоса состоит в том, что при повороте ротора открытые на одном конце РО камеры расширяются, замыкаются (становясь изолированными) и переносятся на другой конец, уменьшаясь в объеме и исчезая.

В фиксированный момент времени (при условно остановленном роторе) положение камер и их площадь изменяются вдоль длины РО (см. рис. 1).

Благодаря указанным конструктивным и кинематическим особенностям *одновинтовые насосы* (ОВН), называемые в технической литературе как progressive cavity pump (PCP), объединяют в себе положительные качества динамических и объемных гидромашин, обладая важными эксплуатационными преимуществами, выделяющими их среди других типов насосов.



По сравнению с динамическими насосами:

- независимость создаваемого напора от частоты вращения приводного вала, что расширяет диапазон использования ОВН по скорости привода;
- сравнительно невысокая скорость жидкости в проточной части насоса (в 2–3 раза меньше, чем в центробежном насосе тех же габаритов), что увеличивает долговечность проточной части ОВН, поскольку интенсивность гидроабразивного износа пропорциональна кубу скорости;
- высокая всасывающая способность.

По сравнению с возвратно-поступательными насосами:

- отсутствие клапанов или других распределительных устройств, поскольку распределение жидкости обеспечивается автоматически за счет основополагающих соотношений между геометрическими параметрами винтовых поверхностей РО;
- отсутствие мертвого пространства рабочих камер;
- практически равномерная (без пульсации) подача, пропорциональная частоте вращения;
- возможность изменения направления движения жидкости путем простого реверсирования приводного вала;
- непрерывное изменение положения контактных линий РО;
- снижение металлоемкости конструкции и габаритов насоса;
- высокая быстроходность ОВН с однозаходным ротором, что позволяет (как и для центробежных насосов) соединять их напрямую (без редуцирующих устройств) с электродвигателями, имеющими частоту вращения 1000–3000 об/мин.

Основным преимуществом ОВН, определившим их широкое распространение в различных областях техники, является способность перекачивать практически любые виды жидкости, в том числе высоковязкие, содержащие газовые и твердые включения, а также многофазные смеси.

По сравнению с наиболее близкими по конструктивному исполнению и принципу действия двух- и трехвинтовыми насосами ОВН отличаются: минимальными диаметральными габаритами РО (вследствие внутреннего зацепления и отсутствия замыкателей); простотой конструкции корпусных деталей; отсутствием синхронизирующей зубчатой передачи; наличием в составе РО эластичного элемента (что расширяет возможности регулирования напорных характеристик за счет изменения диаметрального натяга в паре и снижает требования к точности изготовления РО).

Область применения любого типа насосов характеризуется полями подачи и давления, свойствами перекачиваемой жидкости (плотность, вязкость, температура, химическая агрессивность, содержание газа и твердых частиц), конструктивно-эксплуатационными особенностями (насосы стационарные, передвижные, наземные, скважинные и т.д.).

Поля подачи и давления одновинтовых насосов общего и специального назначения распространяются по подачам от 0,001 до 140 л/с, по давлению до 30 МПа.

Область применения насосов общего назначения регламентируется по обобщенному параметру – удельной быстроходности:

$$n_s = 3,65 \frac{n\sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H^3}},$$

где n – частота вращения (об/мин); Q – подача (м³/с); H – напор (м).

Одновинтовые насосы находятся в области $n_s = 2–20$, это означает, что ОВН имеют наибольшую удельную быстроходность среди насосов объемного типа (у трехпоршневых насосов $n_s = 0,05–2,0$) и наряду с вихревыми насосами ($n_s = 13–40$) занимают по быстроходности пограничную область между объемными и динамическими ($n_s = 40–170$) насосами.

Для динамических и роторных насосов существует одна и та же закономерность изменения конструкции при увеличении n_s : радиальное направление потока (у центробежных, пластинчатых и шестеренных насосов) переходит в осевое (осевые, винтовые насосы).

В сопоставимом поле $Q–H$ одновинтовые насосы обладают более высоким КПД, чем вихревые или многоступенчатые центробежные насосы. По сравнению с поршневыми насосами ОВН имеют меньшие габариты и массу.

Одним из главных преимуществ ОВН является способность перекачивать практически любые жидкости в широком диапазоне изменения их плотности и вязкости (до 12000 сП). Только поршневые насосы, значительно более сложные по конструкции, дорогие в изготовлении и металлоемкие, выдерживают сравнение с ОВН по универсальности применения.

Наличие эластичной обоймы позволяет широко применять ОВН для перекачивания загрязненных жидкостей, в то время как центробежные и поршневые насосы для перекачивания жидкостей со взвесями имеют специальные конструктивные модификации.

В промышленных каталогах ведущих машиностроительных компаний, (Netzsch, PCM, Seerex, Ливгидромаш и др.) указывается до 300 видов жидкостей, эмульсий, паст и других сред, которые эффективно перекачиваются ОВН.



Основные области применения ОВН:

- подъем нефти и пластовых жидкостей из скважин с использованием бесштанговых и штанговых насосных установок;
- внутривнепромысловая перекачка жидкостей и нефтегазовых смесей;
- технологические процессы в различных отраслях промышленности;
- водоподъем, мелиорация и орошение в сельском хозяйстве;
- водоснабжение в коммунальном хозяйстве;
- перекачка различных продуктов в пищевой и винодельческой промышленности;
- опорожнение резервуаров, цистерн и других емкостей;
- откачка воды из шахт и горных выработок;
- транспортировка строительных растворов и красок;
- инновационные энергетические и экологические технологии.

В Европе первые насосы для добычи нефти были внедрены в 1980-х годах Французским Нефтяным Институтом (IFP) и нефтяной компанией Total. Простота в управлении и комплектации, низкие затраты и широкий диапазон применения являются основой успеха применения насосов Муано на месторождениях сверхвязкой нефти Канады, Венесуэлы и других стран.

Среди новых технологических достижений стоит обратить внимание на запатентованный цельнометаллический насос Vulcaïn для добычи вязкой нефти методом теплового воздействия на пласт (CSS, SAGD). Созданная уникальная технология позволяет изготавливать статоры из металла, при этом сохраняя все нужные геометрические и гидравлические характеристики для достижения высоких показателей по эффективности эксплуатации и качеству насоса. Насосы типа Vulcaïn успешно применяются в ряде стран Америки и Европы, в частности при эксплуатации месторождений высоковязкой нефти и природных.

В России большой объем опытно-конструкторских работ был выполнен в 1960–70-х годах в Особом конструкторском бюро по бесштанговым насосам (ОКБ БН), где впервые в мировой практике были разработаны и внедрены погружные винтовые электронасосы для добычи нефти и водоподъема [3]. В 1980–90-е годы во ВНИИБТ и РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина были разработаны ОВН с многозаходными рабочими органами, что позволило повысить эффективность применения ОВН в различных технологиях перекачки жидкостей и газожидкостных смесей [4].

На протяжении последних 30–40 лет многие специалисты в разных странах проводили теоретические и экспериментальные исследования, которые заложили основы теории рабочего процесса одновинтовых насосов, методов их конструирования и эксплуатации [4–8].

Особенно интенсивное развитие ОВН получили в нефтяной промышленности, что связано с ростом объема добычи нефти и осложнением условий эксплуатации месторождений (увеличение доли механизированного способа добычи, снижение среднего дебита скважин, увеличение вязкости пластовой жидкости, а также содержания в ней свободного газа и механических примесей).

Новая страница в развитии одновинтовых гидравлических машин открылась в связи с распространением технологий бурения с использованием *гидравлических забойных двигателей*. Работы по созданию объемных гидравлических двигателей на базе рабочих органов, спроектированных по принципу Муано (на Западе они обозначаются как PDM – Positive Displacement Motors), начались практически одновременно в США (Smith Tool) и СССР (ВНИИБТ) в 60-е годы прошлого века [9].

Первоначально обозначился различный подход к назначению этих машин: в СССР разрабатывали двигатель как замену низкооборотному роторному способу привода породоразрушающего инструмента, в то время как в США как альтернативу турбинному способу бурения. Отсюда наметилось принципиальное различие в конструкции рабочих органов двигателя. В СССР была взята на вооружение схема с многозаходными РО (рис. 2), а в США использовали типовую схему с однозаходным ротором. Фактически такие рабочие органы не отличались от традиционных РО винтовых насосов.

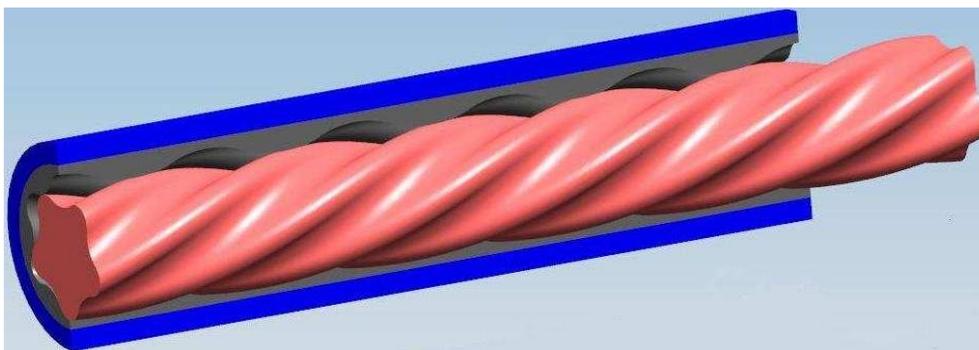


Рисунок 2 – Многозаходные рабочие органы ВЗД



Оказалось, что помимо создания мощности на выходном валу, многозаходный героторный механизм с циклоидальным зацеплением также выполняет функции понижающего редуктора, передаточное число которого равно числу заходов ротора (рис. 3), что позволило сконструировать гамму двигателей с различным моментом и частотой вращения.

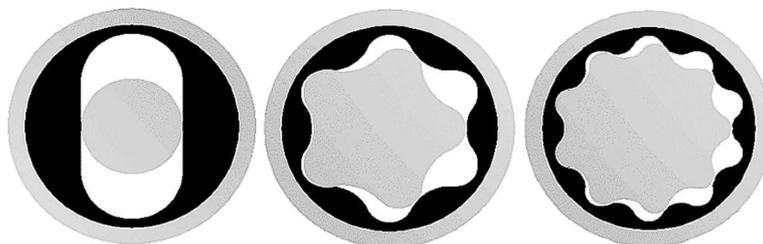


Рисунок 3 – Поперечные сечения ВЗД с различным кинематическим отношением (1:2; 5:6; 9:10)

Проведенные фундаментальные теоретические и экспериментальные исследования рабочего процесса ВЗД [9–11] и создание комплекса технологического оборудования для изготовления многозаходных рабочих органов обеспечили получение оптимальных энергетических и эксплуатационных характеристик этих гидромашин для различных условий их работы в бурении и капитальном ремонте нефтяных и газовых скважин.

Ввиду давности изобретения оптимальной геометрии многозаходных рабочих органов, как и самого принципа Муано, винтовые гидромашин являются достоянием всего человечества и в настоящее время взяты на вооружение многими нефтяными машиностроительными компаниями мира.

В настоящее время ВЗД превратился в одно из основных технических средств для привода породоразрушающего инструмента и является базовой конструкцией для инновационных технологий буровых работ, таких как наклонно направленное и горизонтальное бурение скважин, проводка боковых стволов, моторизованные системы управляемого роторного отклонителя, бурение на обсадной колонне и др.

Какие факторы способствовали столь широкому внедрению ВЗД:

во-первых, ввиду особых трибологических характеристик рабочих органов (сочетание скольжения и качения) и наличия эластичной обкладки статора появляется возможность применения в качестве рабочей жидкости практически всех применяемых в бурении растворов;

во-вторых, уникальные энергетические и эксплуатационные характеристики ВЗД (высокий крутящий момент при пониженной частоте вращения, линейная связь крутящего момента и перепада давления, минимальный осевой габарит, возможность регулирования технических показателей за счет изменения натяга в паре и свойств эластомера, упрощенная схема сборки и регулировки по сравнению с забойными двигателями другого типа).

Подводя итоги развития техники и технологии бурения, авторитетный международный журнал «Oil & Gas» отнес многозаходные ВЗД, к одним из выдающихся достижений буровой техники второй половины XX века.

О значении ВЗД для современной нефтегазовой промышленности можно судить хотя бы по тому, что, например, в России ВЗД обеспечивают более 75 % объема буровых работ при строительстве скважин и практически 100 % работ в капитальном ремонте нефтяных и газовых скважин.

Кроме того, циклоидальное зацепление, заложенное в винтовом героторном механизме, учитывая широкий диапазон регулирования передаточного отношения и чисел зубьев (начиная от 1–3, что недостижимо для других типов зубчатых передач), может рассматриваться как весьма перспективное направление развития *зубчатых механизмов* (с внутренним и внешним зацеплением, а также планетарного типа, рис. 4) для различных отраслей машиностроения [12].

Таким образом, основные принципы, заложенные при создании одновинтовых гидравлических машин, воплотились во всех отраслях промышленности и в том числе в наиболее важных сферах нефтегазового комплекса, связанных с механизированной добычей нефти и бурением нефтяных и газовых скважин.

Можно предположить, что и в дальнейшем по мере развития нефтегазовой промышленности и усложнения условий разработки месторождений одновинтовые гидромашин будут продолжать совершенствоваться и оставаться незаменимым техническим средством, обеспечивающим прогресс нефтегазового и энергетического комплекса.

Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы показывают, что помимо традиционных областей применения одновинтовых гидромашин существуют следующие перспективные направления по созданию машин на базе циклоидальных винтовых рабочих органов для буровой и нефтепромысловой техники:



в бурении: двигатели-вращатели низа бурильной колонны, забойные осцилляторы, мобильные буровые насосы, планетарные редукторы силовых приводов буровых установок и забойных двигателей;

в нефтедобыче: гидроприводные скважинные винтовые насосные агрегаты, наземные мультифазные насосы.

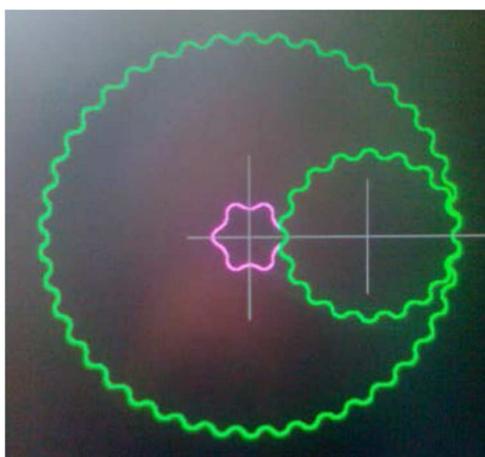


Рисунок 4 – Планетарный редуктор с циклоидальным профилем зубьев (схема 6-18-42)

Пути дальнейшего совершенствования одновинтовых машин связаны с усовершенствованием геометрии циклоидального зацепления, конструктивной оптимизацией нагруженных элементов и узлов на основе компьютерных технологий и трехмерного моделирования, подбором материалов и упрочнением рабочих поверхностей, повышением качества изготовления с использованием инновационных зубообрабатывающих центров.

Литература

1. Moineau J-L. Rene Moineau. Aviator and inventor Editions de, l officine Paris, 2009.
2. Moineau R.L.J. Pompe. France Patent № 695539, 13.05.1930.
3. Крылов А.В. Одновинтовые насосы. – М., Гостоптехиздат, 1962.
4. Балденко Д.Ф., Бидман М.Г., Калишевский В.Л. [и др.]. Винтовые насосы. – М. : Машиностроение, 1982.
5. Nosciewicz J. Vretenova Cerpadla. – Praha : SNTL, 1961.
6. Revard J.M. The progressing cavity pumps handbook. Penn Well Publishing Company, USA, Tulsa, 1995.
7. Cholet H. Progressing cavity pumps. Editions Technip, Paris, 1997.
8. Nelik L., Brennan J. Progressing Cavity Pumps and Mudmotors. Gulf Publishing Company, Houston, 2005.
9. Гусман М.Т., Балденко Д.Ф., Кочнев А.М., Никомаров С.С. Забойные винтовые двигатели для бурения скважин. – М. : Недра, 1981.
10. Балденко Д.Ф., Балденко Ф.Д., Гноевых А.Н. Одновинтовые гидравлические машины (в двух томах). – М. : ИРЦ Газпром, 2005–2007.
11. Samuel R., Baldenko D.F., Baldenko F.D. Positive Displacement Motors. Theory and Applications. Sigma Quadrant Publisher, 2015.
12. Балденко Д.Ф., Балденко Ф.Д. О выборе профиля зубьев механических передач и гидравлических двигателей // Бурение и нефть. – 2019. – № 3.

References

1. Moineau J-L. Rene Moineau. Aviator and inventor Editions de, l officine Paris, 2009.
2. Moineau R.L.J. R.L.J. Pompe. France Patent № 695539, 13.05.1930.
3. Krylov A.V. Single screw pumps. – М., Gostoptekhizdat, 1962.
4. Baldenko D.F., Bidman M.G., Kalishevsky V.L. [et al.]. Screw Pumps. – М. : Mashinostroyeniye, 1982.
5. Nosciewicz J. Nosciewicz J. Vretenova Cerpadla. – Praha : SNTL, 1961.
6. Revard J.M. The progressing cavity pumps handbook. Penn Well Publishing Company, USA, Tulsa, 1995.
7. Cholet H. Progressing cavity pumps. Editions Technip, Paris, 1997.
8. Nelik L., Brennan J. Progressing Cavity Pumps and Mudmotors. Gulf Publishing Company, Houston, 2005.
9. Gusman M.T., Baldenko D.F., Kochnev A.M., Nikomarov S.S. Bottomhole screw motors for well drilling. – М. : Nedra, 1981.
10. Baldenko D.F., Baldenko F.D., Gnoevykh A.N. Single screw hydraulic machines (in two volumes). – М. : Gazprom IRTS, 2005–2007.
11. Samuel R., Baldenko D.F., Baldenko F.D. Positive Displacement Motors. Theory and Applications. Sigma Quadrant Publisher, 2015.
12. Baldenko D.F., Baldenko F.D. About a profile choice of teeth of mechanical gears and hydraulic engines // Drilling and oil. – 2019. – № 3.