

УДК 621.313:622.23

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ В НЕФТЕДОБЫЧНЫХ АГРЕГАТАХ

Любимов Э.В., Шулаков Н.В., Шутемов С.В.

ГОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь,
e-mail: shutemsv@yandex.ru

Добыча нефти является главной отраслью экономики страны, поэтому ей необходимо уделять особое внимание. При этом следует отметить, что легкодоступные месторождения нефти практически исчерпаны. Новые залежи ископаемых находятся на больших глубинах, в труднодоступных местах. Основной на сегодня способ добычи нефти с помощью станков-качалок не удовлетворяет всем требованиям сегодняшнего дня из-за существенных недостатков. Для их удовлетворения необходимо разрабатывать оборудование нового поколения, которое позволило бы решить эти сложные технические задачи. Представленная статья посвящена проектированию нового класса приводов для нефтедобычи. Линейные вентильные электродвигатели (ЦЛВД), совместно с плунжерными насосами, помещаются непосредственно в скважину, что позволяет им работать на больших глубинах без подвода механической мощности через шток. ЦЛВД используют в составе погружного бесштангового электронасосного агрегата (ПБЭНА), для добычи нефти из мало- и среднедебитных скважин. В представленном проектируемом приводе нет жестких ограничений по глубине спуска плунжерного насоса в скважину, которая может достигать 3000 метров и более. Кроме этого, сам электродвигатель является источником нагрева нефтяного пласта, что позволяет разрабатывать запарафиненную нефть. Проектирование такого инновационного оборудования требует проведения научных исследований в этой области и разработки новых инженерных методик анализа и синтеза. Его использование позволяет вести бесштанговую добычу нефти из скважин, в качестве замены широко используемых в настоящее время станков-качалок. Главной особенностью проектируемого привода ПБЭНА на основе ЦЛВД является возможность работы в периодическом режиме. Такой режим наиболее благоприятен для повышения энергетического КПД. Использование периодического режима позволяет получить высокий КПД установки при различном числе двойных ходов плунжера насоса за счет частотно-импульсного регулирования добычи.

Ключевые слова: линейный двигатель, плунжерный насос, нефтедобычный агрегат, привод

JUSTIFICATION OF CYLINDRICAL LINEAR ELECTRIC MOTOR AS A PART OF OIL PRODUCTION UNIT

Lyubimov E.V., Shulakov N.V., Shutemov S.V.

Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: shutemsv@yandex.ru

Oil production is the main branch of the country's economy, so it needs to pay special attention. At the same time it should be noted that easily accessible oil fields are almost exhausted. New deposits of fossils are at great depths, in hard-to-reach places. The main way to produce oil with the help of rocking machines today does not meet all the requirements of today due to significant shortcomings. To meet them, it is necessary to develop a new generation of equipment that would solve these complex technical problems. The article is devoted to the design of a new class of drives for oil production. Linear valve motors (CLEM), together with plunger pumps are placed directly into the well, which allows them to work at great depths without supplying mechanical power through the rod. CLEM are included in the submersible scraping electric pump unit (PBENA), in order to extract oil from low- and medium-rate wells. In the presented projected drive there are no strict limitations on the depth of descent of the plunger pump into the well, which can reach 3000 meters or more. In addition, the electric motor itself is a source of heating of the oil reservoir, which makes it possible to develop quenched oil. The design of such innovative equipment requires conducting research in this area and developing new engineering techniques for analysis and synthesis. Its use makes it possible to carry out unrestricted production of oil from wells, as a replacement for the currently widely used rocking machines. The main feature of the projected drive PBENA on the basis of CLEM is the ability to work in the short-term period. Such a regime is most favorable for increasing the energy efficiency. The use of the short-period mode allows obtaining a high efficiency of the installation with a different number of double strokes of the pump plunger due to frequency-pulse production control.

Keywords: linear motor, plunger pump, oil production unit, drive

Увеличение добычи нефти на существующих скважинах РФ является важной государственной задачей. Основной на сегодня способ добычи нефти с помощью станков-качалок не удовлетворяет всем требованиям сегодняшнего дня из-за существенных недостатков. В еще большей степени он не удовлетворяет требованиям стратегических перспектив развития отрасли. Налицо серьезная проблемная ситуация. Проблема добычи

нефти на средне- и малodeбитных скважинах, а также на скважинах глубиной от 2000–3000 м и более не имеет пока практического разрешения. Установленная невозможность использования станков-качалок для глубоких скважин привела к тому, что возникла необходимость разработки принципиально новых конструкций электропривода.

Цилиндрический линейный вентильный электродвигатель (ЦЛВД) разработан

для погружного бесштангового электронасосного агрегата (ПБЭНА), с целью добычи нефти из средне- и малodeбитных скважин. ПБЭНА выполняет функцию, аналогичную функции станка-качалки, в качестве привода глубинного штангового плунжерного насоса. Принцип действия плунжерного насоса основан на возвратно-поступательном движении поршня, который соединен коротким штоком с электродвигателем типа ЦЛВД. При использовании агрегата исчезает потребность подготовки фундамента под станок-качалку, а также нет необходимости использовать колонну штанг, так как привод ЦЛВД находится непосредственно в забое скважины. Такое решение позволяет получить существенные преимущества в сравнении со станком-качалкой. Это позволит более тщательно производить добычу нефти из месторождений и, соответственно, повысить эффективность извлечения нефти. Использование ПБЭНА должно снизить затраты на энергопотребление, так как отсутствуют потери на трение между колонной штанг и обсадными насосно-компрессионными трубами (НКТ).

Обоснование

В практике нефтедобычи используются следующие добычные агрегаты:

1. Скважинные штанговые насосные установки (СШНУ).

2. Установки погружных центробежных насосов с электроприводом (УЦН).

В мировой практике нефтедобычи наибольшее распространение по количеству эксплуатируемых скважин получили СШНУ, а по объемному количеству добычи – УЦН. При этом такое распространение СШНУ связано с тем, что они предназначены для эксплуатации низко- и среднедебитных скважин. Установки УЦН менее распространены по количеству, так как предназначены для эксплуатации средне- и высокодебитных скважин, но именно они добывают более половины валового количества нефти.

При дебите 100 м³/сут и более скважины относятся к высокодебитным, вне зависимости от высоты подъема. Скважины с дебитом 5,0 м³/сут относятся к низкодебитным. К среднедебитным относятся скважины, которые не попадают в группы высоко- и низкодебитных.

Длительная практика применения СШНУ и УЦН, а также технико-экономические расчеты показали, что приведенные

области применения глубиннонасосного оборудования являются достаточно обоснованными [1].

Привод насосного агрегата СШНУ находится на устье скважины и называется станком-качалкой. Станок-качалка работает за счет перемещения плунжера посредством длинной колонны насосных штанг. При этом рабочий режим соответствует 3–10 качаний в минуту. Такой агрегат обеспечивает высокий напор в ограниченном диапазоне подач от 5 до 50 м³/сут. Станки-качалки имеют высокий КПД в области добычи от 1 до 40 м³/сут. При подаче, равной 40 м³/сут он достигает значения 42%. При этом необходимо учитывать, что чем меньше подача, тем меньше и КПД.

Насосные агрегаты УЦН имеют КПД добычи нефти более 40%. Такой высокий КПД возможен только в области больших подач (более 280 м³/сут). Однако следует учитывать, что при добыче менее 80 м³/сут их КПД резко падает. УЦН невозможно использовать эффективно при добыче менее 45 м³/сут. Это связано с тем, что при меньших дебитах резко падает их КПД, не достигая величины даже в 20%. Из вышеизложенного следует, что такие установки имеют смысл использовать только на высокодебитных скважинах.

Таким образом, приходим к выводу: при высоком дебите скважин наиболее эффективными являются центробежные насосы, а для средне- и малodeбитных скважин наиболее рационально использовать насосы объемного типа, например плунжерные [1].

На текущий момент СШНУ в неполной мере отвечают современным требованиям эксплуатации нефтяных скважин. Такое проблемное состояние связано с особенностями их конструкции, когда передача усилия к плунжерному насосу осуществляется с помощью промежуточных механических звеньев (станок-качалка и колонна штанг). При этом существенными недостатками СШНУ являются:

1) потеря длины плунжера насоса из-за деформации колонны штанг при ходе вверх и вниз;

2) усилие на плунжер насоса передается от станка-качалки с помощью колонны штанг, которые изготавливают из дорогих легированных сталей;

3) при работе колонна штанг подвергается усилиям сжатия и растяжения, поэтому ход плунжера насоса и коэффициент его заполнения уменьшается, что существенно снижает эффективность его работы;

4) разрушение колонны штанг из-за коррозионно-усталостных напряжений;

5) ограничение добычи нефти глубиной в 1800–2000 м, что связано с возможностью обрыва штанг под собственным весом;

6) механическое истирание колонны штанг и насосно-компрессорных труб (НКТ) в результате их совместного трения;

7) значительные ограничения регулировочных свойства станков-качалок из-за применения асинхронного нерегулируемого привода;

8) необходимость создания бетонного основания станка-качалки и большая металлоемкость конструкции, что осложняет строительство в условиях вечной мерзлоты.

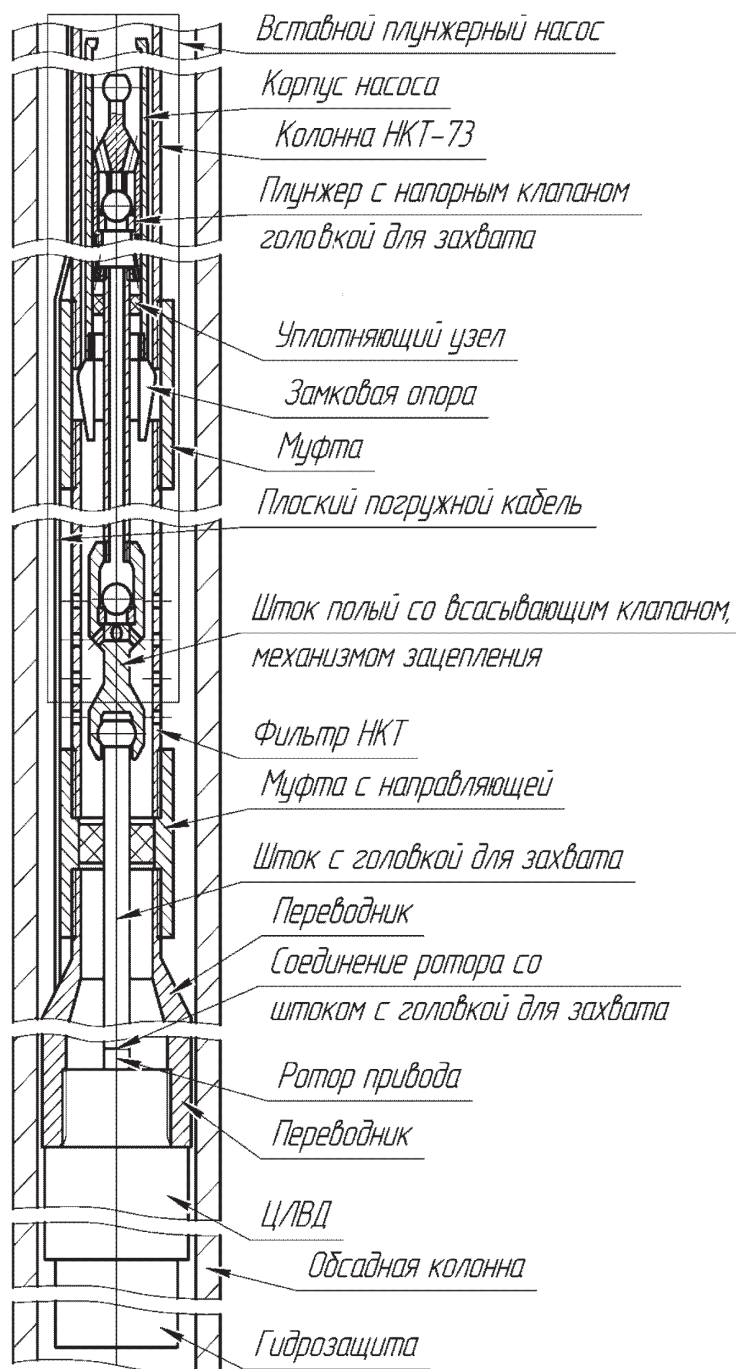


Рис. 1. Конструкция ПБЭНА

ПБНА лишен указанных выше недостатков. Он состоит из ЦЛВД и сочлененного с ним плунжерного насоса (рис. 1). ЦЛВД управляется от ПЧ с помощью микропроцессорной системы, которая обеспечивает необходимую длину хода плунжера и число качаний в минуту.

При работе системы в скважине создается возвратно-поступательное движение плунжера. ЦЛВД получает питание с поверхности в забой скважины с помощью кабеля от преобразователя частоты. В результате происходит исключение промежуточных звеньев привода, осуществляется приближение двигателя к насосу, что обеспечивает ПБЭНА, в сравнении с балансирным станком-качалкой, ряд преимуществ:

- увеличивается эффективность добычи нефти;
- сокращается площадь установки оборудования;
- снижается металлоемкость вследствие исключения части конструкций (станка-качалки, фундаментов, штанговых колонн);
- сокращаются затраты на строительные и монтажные работы;
- ПБЭНА позволяет существенно снизить затраты на обслуживание и ремонт скважины из-за отсутствия колонны штанг;
- позволяет снизить затраты на энергопотребление, так как отсутствуют потери на трение между колонной штанг и обсадными трубами;
- меньше влияют проблемы, связанные с эмульгированием нефти в НКТ;
- нет жестких ограничений по глубине спуска плунжерного насоса в скважину, так как нет опасности обрыва штанг под собственным весом. Глубина добычи может составлять 3000 м и более.

При эксплуатации станков-качалок необходимо учитывать, что с увеличением глубин добычи возрастает трение между колонной штанг и обсадными насосно-компрессионными трубами. Использование колонны штанг при работе станка-качалки приводит к низкому КПД, которое из-за трения об НКТ оказывается в пределах 20–45%.

В качестве альтернативы станку-качалке соответственно представляется более целесообразным использовать насосный агрегат ПБЭНА. Он основан на плунжерном насосе, зарекомендовавшем себя надежностью и характеристиками, в связке с ЦЛВД возвратно-поступательного движения. Использование ЦЛВД, сочлененного с плунжерным насосом, позволяет устранить эффект

трения колонны штанг об НКТ, использовать насосный агрегат в криволинейных скважинах, повысить общий КПД агрегата в целом, по сравнению со стандартным станком-качалкой.

Основной проблемой ЦЛВД является КПД в 55–65%. Это связано с питанием двигателя частотой ПЧ, равной 5–7 Гц, из-за требования низкой скорости хода плунжера насоса. Понижение частоты питания нерационально из-за снижения энергетического КПД ЦЛВД, так что частоту ПЧ ниже 5–7 Гц лучше не применять. Дальнейшее понижение частоты необходимо для уменьшения количества ходов при добыче нефти и регулирования дебита, но от него необходимо отказаться, и лучше выполнять регулирование дебита другими способами, не связанными с понижением рабочей частоты сети [2].

Особенностью проектируемого насосного агрегата ПБЭНА на основе ЦЛВД является необходимость работы с максимальной частотой сети, а соответственно, и максимальной скоростью движения плунжера. Такое условие необходимо для получения максимального КПД двигателя. При этом дебит регулируется за счет изменения количества двойных ходов плунжера в минуту, то есть регулирование осуществляется исключительно за счет паузы в работе двигателя. Такой режим можно назвать периодическим. Высокий КПД при повышении частоты ПЧ связан с тем, что активные потери в двигателе не меняются в зависимости от частоты, а соответственно, и скорости движения вторичного элемента. Полезная же мощность двигателя пропорционально зависит от скорости движения плунжера, а соответственно, и частоты ПЧ. Такой режим позволяет поддерживать при любом дебите максимального агрегата. Периодический режим отличается тем, что даже после одного хода возвратно-поступательного движения может быть длительный период остановки ЦЛВД. Практически такой режим называется частотно-импульсным регулированием. Учитывая небольшое количество перекачиваемой нефти за один ход плунжера, можно представить такой режим как непрерывный, с малым регулируемым дебитом.

При работе насосного агрегата на основе ЦЛВД необходимо учитывать, что передача энергии в забой скважины в виде электрической энергии по кабелю значительно эффективнее, чем механическая передача энергии штангой (рис. 2). Наклон характе-

ристики КПД при передаче энергии показывает, что при использовании механической штанги (рис. 2, б) потери увеличиваются быстрее, чем при передаче электрической энергии по кабелю (рис. 2, а), с увеличением глубины. Значения потерь при использовании штанги взяты из практики эксплуатации СШНУ, а потери в кабеле – из практики эксплуатации УЦН.

Отсюда можно сделать вывод, что при возрастании глубин эксплуатации месторождений штанги становятся непригодными и ПБНА получает преимущество. Потери энергии в ЦЛВД происходят в забое скважины, это вызывает нагрев пластовой жидкости непосредственно в предзабойной зоне, что в результате приводит к уменьшению выделений отложений парафина на стенках насосно-компрессорных труб. Это дает дополнительное преимущество ПБНА на ряде месторождений, где происходит добыча вязкой нефти, нефти, имеющей высокое содержание парафинов. Это связано с тем, что не требуется установка дополнительных электрических нагревателей в забой. Именно при такой эксплуа-

тации погружной скважинный насосный агрегат становится наиболее эффективным.

При анализе преимуществ привода ПБНА необходимо учитывать, что оценка только по энергетическим параметрам на основе КПД не является полной. При проектировании привода был выбран вентильный двигатель с постоянными магнитами на вторичном элементе, что связано с его компактными размерами. Это обусловлено необходимостью устранения недостатков погружных приводов на основе асинхронных двигателей (АД). Постепенно осуществляется переход к регулируемым вентильным приводам с вытеснением из эксплуатации асинхронных. Такое решение позволило повысить удельные показатели привода. Повышение характеристик электродвигателей произошло за счет возбуждения мощного магнитного поля на вторичном элементе от редкоземельных магнитов. Это позволило увеличить удельные характеристики двигателей в 2–4 раза по сравнению с АД [3]. При этом важно отметить, что увеличивается именно показатель усилия электродвигателя.

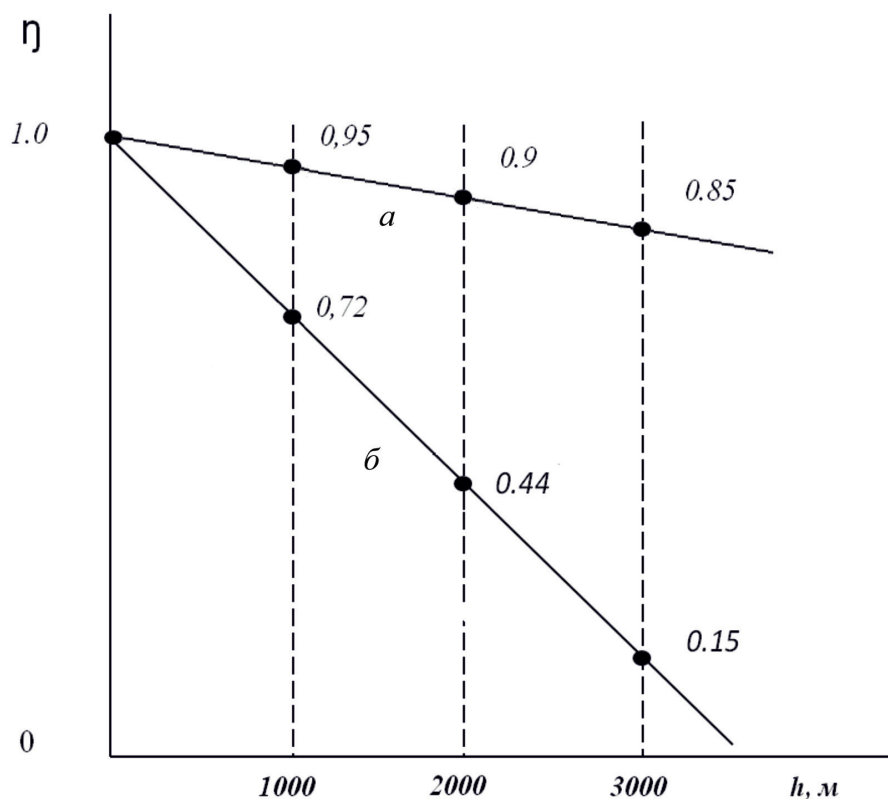


Рис. 2. КПД передачи энергии для двух вариантов добычных агрегатов: а – ЦЛВД, с передачей энергии по кабелю; б – станок-качалка, с передачей энергии штангой

Получение повышенных удельных энергетических показателей электродвигателей стало возможно только с началом применения в ВД новых магнитотвердых материалов с высоким значением удельной энергии. Эти высококоэрцитивные постоянные магниты были разработаны недавно на основе редкоземельных металлов системы неодим – железо – бор.

Рассмотрим основные требования, предъявляемые к модулю ЦЛВД, для проектируемого нефтедобычного агрегата ПБЭНА. На основании параметров эксплуатируемых СШНУ и УЦН были сформулированы требования к ЦЛВД и добычному агрегату ПБЭНА. В состав агрегата входит плунжерный насос, номограмма которого определяет основные требования к электроприводу:

1. Регулирование производительности плунжерного насоса производится изменением количества двойных ходов в минуту, что задается изменением частоты ПЧ. В более приемлемом, рассмотренном выше варианте, за счет изменения величины паузы в работе агрегата.

2. Раздельное и независимое регулирование частоты и длины хода плунжера насоса с помощью двигателя.

3. Необходимо плавно изменять движение плунжера, без рывков. Скорость плунжера должна плавно уменьшаться в конце хода и увеличиваться в начале.

4. Подача насоса и величина хода плунжера должны меняться, в зависимости от депрессии на пласт.

5. Обратный ход поршня может быть осуществлен при уменьшении рабочего тока ЦЛВД, то есть он является нерабочим.

6. Усилие с одного метра длины ЦЛВД должно быть примерно равно 4 кН, что позволяет обеспечивать добычу нефти с глубины не менее 3000 м, при этом используется не более 8 модулей ЦЛВД.

При проектировании ЦЛВД были проведены многовариантные расчеты, содержащие множества точек статических угловых характеристик различных конструкций ЦЛВД, и была выбрана наиболее рациональная конструкция, обеспечивающая максимальное усилие [4, 5]. Результаты были использованы при разработке и создании ЦЛВД в составе ПБЭНА на ПАО «Мотовилихинские заводы». Изготовленные образцы удовлетворяют поставленным требованиям технического задания. В настоящее время опытный образец ЦЛВД длиной 8 метров подготавливается к опытно-промышленным испытаниям.

Выводы

Условия работы и требования, предъявляемые к вновь проектируемому насосам скважинных установок, обуславливают применение новых конструктивных решений, которые направлены на исключение промежуточных звеньев привода. В результате осуществляется приближение электродвигателя к насосу, что обеспечивает ПБЭНА, в сравнении с балансирным станком-качалкой, существенные преимущества.

Одним из основных требований, определяющих эффективность применения новых добычных агрегатов, является общий энергетический КПД. Потери энергии в ЦЛВД происходят в забое скважины, это вызывает нагрев пластовой жидкости непосредственно в предзабойной зоне, что в результате приводит к уменьшению выделений отложений парафина на стенках насосно-компрессорных труб. Это дает дополнительное преимущество ПБЭНА на ряде месторождений, где происходит добыча вязкой нефти, нефти, имеющей высокое содержание парафинов.

В проектируемом добычном агрегате нет жестких ограничений по глубине спуска плунжерного насоса в скважину, которая может составлять 3000 метров и более.

Особенностью проектируемого насосного агрегата ПБЭНА на основе ЦЛВД является возможность работы в периодическом режиме, когда после одного хода возвратно-поступательного движения плунжера может быть длительный период остановки ЦЛВД. Практически такой режим называется частотно-импульсным регулированием. Учитывая небольшое количество перекачиваемой нефти, за один ход плунжера, можно представить такой режим как непрерывный, с малым регулируемым дебитом. Такой режим позволяет получить высокий КПД установки за счет частотно-импульсного регулирования добычи, что рационально в связи с необходимостью поддержания высокого энергетического КПД.

Список литературы

1. Кабиров М.М. Скважинная добыча нефти / М.М. Кабиров, Ш.А. Гафаров. – СПб.: Изд-во Недр, – 2010. – 416 с.
2. Окунева Н.А. Разработка и исследование электропривода для нефтедобывающих насосов с погружным магнитоэлектрическим двигателем: 05.09.03. – Электротехнические комплексы и системы: дис. ... канд. тех. наук / Н.А. Окунева, Моск. энергет. ин-т. – Москва, 2008. – 204 с.
3. Ганджа С.А. Методика инженерного расчета вентиляционных машин с аксиальным потоком / С.А. Ганджа, А.С. Мартынов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – Т. 13, № 2. – С. 85–87.

4. Ключников А.Т. Моделирование цилиндрического линейного вентильного двигателя / А.Т. Ключников, А.Д. Коротаев, С.В. Шугемов // Электротехника. – 2013. – № 11. – С. 14–17.

5. Бурмакин А.М. Низкоскоростной дугостаторный асинхронный двигатель для станков-качалок малодобитных нефтяных скважин: 05.09.01. – Электрические машины: дис. ... канд. тех. наук / А.М. Бурмакин, Ур. федер. ун-т имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2011. – 166 с.

References

1. Kabirov M.M., Gafarov Sh.A. Skvazhinnaia dobycha nefti [Downhole oil production]. St. Petersburg, Nedra, 2010, 416.

2. Okuneva N.A. Razrabotka i issledovanie elektroprivoda dlia nefteobryvayushchikh nasosov s pogruzhnym magnitoelektricheskim dvigatelom: 05.09.03. - Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy: Dissertatsiia kandidata tekhnicheskikh nauk [Development and investigation of electric drive for oil-producing pumps with submersible magnetoelectric engine: 05.09.03. - Electrotechnical complexes and systems: the Thesis

of the candidate of technical sciences]. Moscow, Moskovskii energeticheskii institut, 2008, 204.

3. Gandzha S.A., Mart'ianov A.S. Engineer Methodic for Calculation of Axial Gap Electric Machines [Metodika inzhenernogo rascheta ventil'nykh mashin s aksial'nym potokom]. Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika. – Bullitin of the South Ural State University Series Power Engineering, 2013, no. 2, pp. 85-87.

4. Kliuchnikov A.T., Korotaev A.D., Shutemov S.V. Modeling of a cylindrical linear valve motor [Modelirovanie tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatel'ia]. Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering, 2013, no. 11, pp. 14-17.

5. Burmakin A.M. Nizkoskorostnoi dugostatornyi asinkhronnyi dvigatel' dlia stankov-kachalok malodebitnykh neftiannykh skvazhin: 05.09.01. – Elektricheskie mashiny: Dissertatsiia kandidata tekhnicheskikh nauk [Low-speed douche-stator asynchronous motor for rocking machines of low-yield oil wells: 05.09.01. - Electric machines: the Thesis of the candidate of technical sciences]. Ekaterinburg, Ural'skii feder. un-t imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina, 2011, 166.