

УДК 621.313.8

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ В КАЧЕСТВЕ ПРИВОДА ПЛУНЖЕРНЫХ НЕФТЕДОБЫЧНЫХ АГРЕГАТОВ

**Шулаков Н.В., Шутемов С.В.**

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

В статье представлены преимущества применения ЦЛВД в качестве привода плунжерных нефтедобычных агрегатов. Цилиндрический линейный вентильный электродвигатель (ЦЛВД) можно использовать в нефтедобывающей промышленности для бесштанговой добычи нефти из скважин, в качестве альтернативы широко распространенных в настоящее время станков-качалок. Для этого ЦЛВД включают в состав «Погружного бесштангового электронасосного агрегата», с целью добычи нефти из малодебитных скважин. С применением ПБЭНА становится возможна добыча нефти в скважинах глубиной более двух километров, с большой кривизной, а также в горизонтальных скважинах. При использовании агрегата исчезает потребность подготовки фундамента под станок-качалку, что существенно снижает риски консервации таких скважин. Это позволит более тщательно производить отбор нефти из стареющих месторождений и, соответственно, повысить коэффициент извлечения нефти. Также применение ПБЭНА должно снизить затраты электроэнергии, что обусловлено отсутствием трения при подъеме и опускании колонны штанг. Особенно перспективным проектируемого ПБЭНА на основе ЦЛВД является возможность работы в краткосрочно-периодическом режиме. Было показано, что такой режим наиболее рационален в связи с необходимостью поддержания высокого энергетического КПД добычи.

**Ключевые слова:** линейный двигатель, плунжерный насос, периодический режим работы, привод

## PROSPECTS OF CYLINDRICAL LINEAR VALVE ELECTRIC MOTOR AS A DRIVE PLUNGER OIL PRODUCTION UNITS

**Shulakov N.V., Shutemov S.V.**

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

The article presents the advantages of using CLEM as a drive plunger neftedobychnyh units. The cylindrical linear motor valve (CLEM) can be used in the oil industry for bezshtangovoy of oil wells, an alternative common currently pumping units. For this CLEM include in the «Immersion rodless electric pump unit», for the purpose of oil production from marginal wells. With wells deeper than two kilometers using PBENA becomes possible oil production, with a large curvature, as well as in horizontal wells. When using the unit eliminates the need for preparation of the foundation under the pumping unit, which significantly reduces the risk of preservation of such wells. This will produce a more careful selection of oil from aging fields and thus increase the oil recovery factor. Also, the use PBENA should reduce the cost of electricity, due to the absence of friction when lifting and lowering the rod string. A feature of the designed pump unit PBENA based CLEM is the ability to work in the short-batch mode. It has been shown that this mode is the most rational in view of the need to maintain a high energy recovery efficiency.

**Keywords:** cylindrical linear valve engine, permanent magnets, magnetic gap, secondary element, inductor, pulling force, the static characteristic, drive

**Цилиндрический линейный вентильный электродвигатель (ЦЛВД)** можно использовать в нефтедобывающей промышленности для бесштанговой добычи нефти из скважин, в качестве альтернативы широко распространенных в настоящее время станков-качалок. Для этого ЦЛВД включают в состав «Погружного бесштангового электронасосного агрегата» (ПБЭНА) с целью добычи нефти из малодебитных скважин (рис. 1). Основным принципом действия штангового насоса является возвратно-поступательное движение поршня, связанного посредством штока с электродвигателем типа ЦЛВД, что описано в [1, 2]. С применением ПБЭНА становится возможна добыча нефти в скважинах глубиной более двух километров, с большой кривизной,

а также в горизонтальных скважинах. При использовании агрегата исчезает потребность подготовки фундамента под станок-качалку, что существенно снижает риски консервации таких скважин. Это позволит более тщательно производить отбор нефти из стареющих месторождений и, соответственно, повысить коэффициент извлечения нефти. Также применение ПБЭНА должно снизить затраты электроэнергии, что обусловлено отсутствием трения при подъеме и опускании колонны штанг.

### Требования к ПБЭНА и ЦЛВД в его составе

Добыча пластовой жидкости происходит при создании дополнительного давления, противодействующего опусканию

жидкости под действием силы тяжести. Задачу создания дополнительного давления выполняют нефтедобычные агрегаты, представляющие из себя насосные установки с электроприводом. Главная задача электропривода – обеспечить преобразование электрической энергии в механическую для работы насоса нефтедобычного агрегата. Кроме того, важная функция электропривода состоит в регулировании процесса добычи пластовой жидкости, чтобы обеспечить максимально возможный рациональный дебит скважины. На основании известных параметров СШНУ и УЦН были разработаны требования к ПБЭНА и входящему в его состав ЦЛВД.

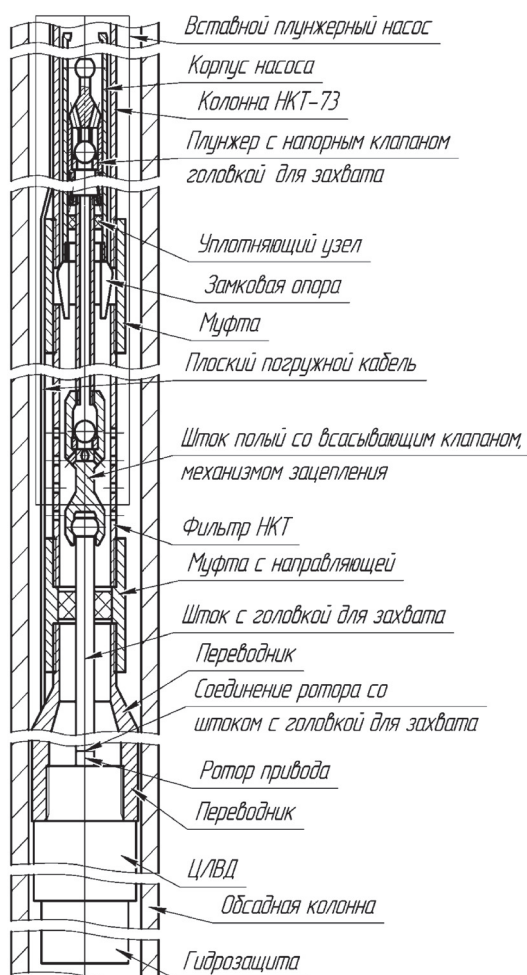


Рис. 1. ЦЛВД в составе ПБЭНА

Нефтедобычный агрегат для малодетных скважин представляет собой плунжерный насос, что и определило основные требования к электроприводу. ЦЛВД работает следующим образом: индуктор создает возвратно-поступательные движения штока

под управлением ПЧ, который находится на земной поверхности. Питание от ПЧ передается по длинному армированному кабелю. Движение штока прикладывается к плунжерному насосу, прокачивающему нефть в НКТ. В ходе исследований и разработки нового оборудования для нефтедобычи было установлено, что к электродвигателям возвратно-поступательного движения плунжерного насоса и системе управления должны предъявляться следующие требования, в зависимости от режима эксплуатации скважин:

1. Плавность движения подвижной части. При подъеме нефти или нефтегазовой смеси движение плунжера должно быть плавным, без скачков. В конце хода скорость плунжера должна плавно гаситься до нуля.

2. Обеспечение регулирования длины хода плунжера в широких пределах. В зависимости от депрессии на пласт и подачи насоса ход плунжера должен иметь самые различные значения.

3. Возможность плавного регулирования частоты хода плунжера. Регулирование производительности осуществляется изменением числа двойных ходов плунжера, которое определяется частотой питающей сети или величины паузы в работе ходов агрегата.

4. Регулирование частоты и длины хода плунжера двигателя должно производиться отдельно, независимо друг от друга.

5. Обратный ход поршня должен быть осуществлен за счет потенциальной энергии добываемой жидкости или энергии магнитного поля индуктора.

6. Обеспечение остановки скважины в момент снижения уровня жидкости до уровня приема насоса и включение двигателя через заданный интервал времени (периодическая откачка).

7. Усилие одного модуля ЦЛВД длиной в 1 м должно быть не менее 4 кН, что описано в [5].

### Преимущества привода ЦЛВД

Проектируемый привод ЦЛВД совместим с плунжерным нефтедобычным агрегатом, поэтому именно со станком-качалкой (СШНУ) и необходимо производить его сравнение. Несмотря на значительный прогресс в совершенствовании СШНУ они в недостаточной мере отвечают современным требованиям эксплуатации скважины. Это связано с особенностями их конструкции в передаче к насосу усилия с помощью промежуточных механических звеньев (станок-качалка и колонна штанг).

Указанного недостатка лишен погружной бесштанговый насосный агрегат (ПБЭНА), который состоит из цилиндрического линейного вентильного двигателя (ЦЛВД), сочлененного с плунжерным насосом специальной конструкции (рис. 1). ЦЛВД получает питание с помощью плоского армированного кабеля от преобразователя частоты, расположенного на поверхности земли рядом с устьем скважины.

Исключение промежуточных звеньев привода (колонны штанг и станка-качалки) и приближение двигателя к насосу обеспечивает ПБЭНА ряд существенных преимуществ:

- снижается металлоемкость конструкции, затраты на строительные и монтажные работы вследствие исключения станков, фундаментов, штанговых колонн;
- уменьшаются затраты на подземные ремонты;
- уменьшается эмульгирование нефти в насосно-компрессорных трубах;
- не имеет жестких ограничений по глубине спуска плунжерного насоса в скважину, которая может достигать 3 км и больше.

Разрабатываемый привод погружного плунжерного насоса специальной конструкции является альтернативным вариантом, позволяющим устранить многие недостатки существующих станков-качалок. Таким образом, одним из новых путей совершенствования нефтедобывающего оборудования является возможность создания бесштанговой установки с погружными линейными двигателями возвратно-поступательного движения.

Выбор такой конструкции ПБЭНА связан с тем фактом, что единственным эффективным вариантом для низко- и среднедебитных скважин остается погружной плунжерный насос станка-качалки. Но при этом необходимо учитывать, что с увеличением глубины добычи увеличиваются потери на трение между колонной штанг и НКТ. Глубины эффективного использования станков-качалок ограничены в 2000 м, так как при добыче на большей глубине происходит обрыв колонны штанг под действием собственного веса. Наличие колонны штанг в составе станка-качалки приводит к низкому механическому КПД, которое у насосного агрегата из-за трения оказывается в пределах 35–55 процентов на глубине в 2 км. Колонна насосных штанг станка-качалки имеет материально-технические границы по величине удельных напряжений, глубине спуска, числу качаний и плавности

регулирования. Она чувствительна к повышенному износу и коррозионной усталости. Имеет инерционные и динамические удлинения. Наличие переменных упругих деформаций не позволяет точно определить положение плунжера в цилиндре.

Соответственно, в качестве альтернативы представляется более конкурентоспособным использование насосного агрегата, основанного на зарекомендовавшем себя надежностью и характеристиками плунжерном насосе, в связке с погружным цилиндрическим линейным вентильным электродвигателем возвратно-поступательного движения. Использование плунжерного насоса, сочлененного с цилиндрическим линейным вентильным двигателем, позволяет снизить трение из-за отсутствия колонны штанг, использовать насосную установку в криволинейных скважинах, повысить общий КПД установки в целом, по сравнению со станком-качалкой. В результате ПБЭНА позволяет решить большинство проблем, существующих при добыче скважинной жидкости.

Основной проблемой ЦЛВД в составе ПБЭНА является пониженный КПД в 55–65%, что связано с необходимостью питания низкой частотой ПЧ в 5–7 Гц для нормального обеспечения работы привода, из-за требования низкой скорости хода штанги плунжерного насоса. Дальнейшее понижение частоты питающей сети от ПЧ ниже 5–7 Гц для уменьшения количества ходов при добыче нефти и регулировании дебита нерационально, так как резко начинает снижаться энергетический КПД ЦЛВД, что рассмотрено в [3, 4].

Особенностью проектируемого насосного агрегата ПБЭНА на основе ЦЛВД является возможность работы в периодическом режиме, такой режим наиболее рационален с точки зрения поддержания высокого энергетического КПД добычи. Это связано с тем, что активные потери в двигателе не изменяются в зависимости от частоты ПЧ и скорости движения вторичного элемента, а вот полезная мощность тем более, чем больше скорость движения штока и частота ПЧ. Такой режим работы возможен за счет наличия датчика положения штока, питания ЦЛВД от ПЧ и низкой инерциальности работы агрегата. После окончания рабочего цикла возможно временное отключение ЦЛВД, то есть возникает работа в краткосрочно-периодическом режиме. Это позволяет поддерживать максимально высокий возможный КПД добычного агрегата

при любом дебите. При краткосрочно-периодическом режиме даже после одного хода возвратно-поступательного движения может быть длительный период остановки ЦЛВД. Краткосрочно-периодическое включение ЦЛВД на один ход штока плунжера с регулируемой паузой очень близко, по влиянию на пласт, к непрерывному режиму добычи за счет уменьшения перекачиваемого объема нефти в одном цикле. Практически происходит частотно-импульсная регуляция величины дебита. Учитывая малое количество перекачиваемой нефти за один ход плунжера, можно представить такую работу привода как непрерывный режим работы с малым регулируемым дебитом.

Передача энергии к забою скважины в виде электрической энергии по кабелю намного эффективнее, чем механическая передача штангой (рис. 2). По наклону характеристик КПД видно, что при передаче энергии механической штангой (рис. 2, а) в забой скважины потери значительно больше, чем при передаче электрической энергии по кабелю на одинаковую глубину (рис. 2, с).

Таким образом, можно сделать вывод, что при больших глубинах добычи штанги становятся малопригодны и ПБНА получает преимущество.

Также необходимо рассмотреть сравнение энергетических параметров добычных

агрегатов в зависимости от глубины добычи. Как видно из графиков (рис. 2), характеристика КПД для штангового привода плунжерного насоса падает быстрее из-за механических потерь на трение штанги об НКТ при ее изгибах. Но до глубины в 1,8 км применение штангового привода эффективней из-за низкого КПД погружного привода на основе ЦЛВД. Таким образом, для обычных скважин новый предложенный привод на основе ЦЛВД начинает быть эффективным только для глубоких мало- и среднедебитных скважин.

В то же время потери энергии привода ЦЛВД происходят в забое скважины, что на ряде месторождений дает дополнительное преимущество нефтяному агрегату с ЦЛВД. Потерянная электрическая энергия преобразуется в тепло в забое и разогревает забой скважины.

На ряде месторождений происходит добыча вязкой нефти, нефти, имеющей высокое содержание парафинов, что требует установки дополнительных электрических нагревателей в забой. Именно в таких случаях погружной скважинный насос с ЦЛВД будет наиболее выгоден. При небольших мощностях подогрева скважины в 5 кВт электрическими нагревателями суммарный энергетический КПД агрегата с штанговым насосом опускается и ЦЛВД становится выгодней с глубины более 1 км. А при средних

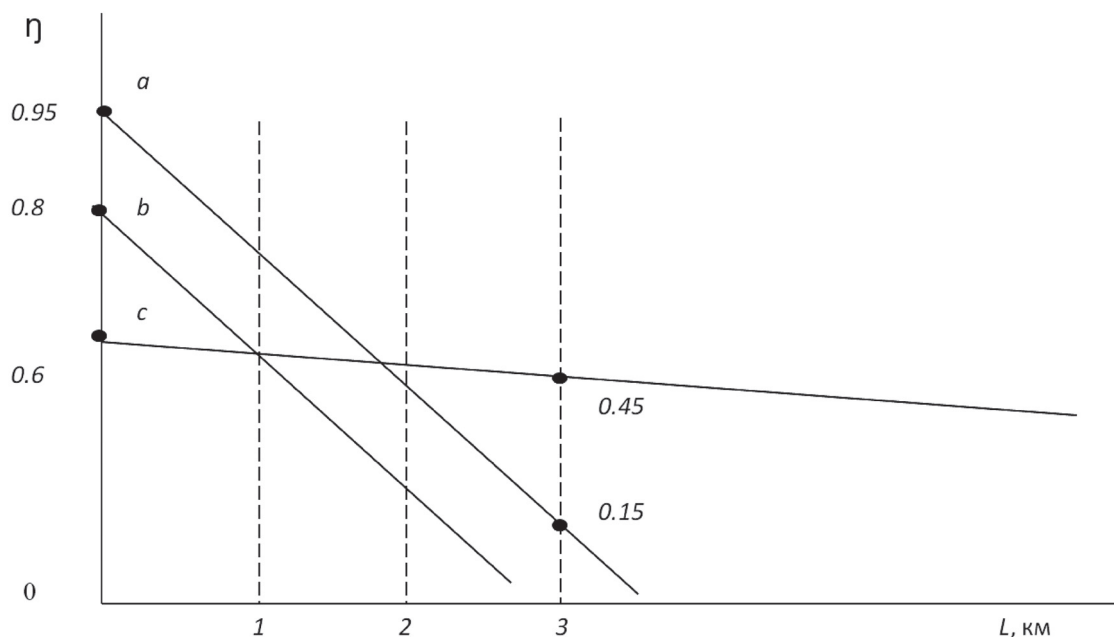


Рис. 2. Сравнение КПД насосных агрегатов на основе плунжерного насоса для двух вариантов конструкций привода в зависимости от глубины скважины:  
а – станок-качалка без нагревателя;  
б – станок-качалка с нагревателем 5 кВт в скважине; в – ЦЛВД



статистических мощностях подогрева скважины в 10–20 кВт электрическими нагревателями суммарный энергетический КПД агрегата с штанговым насосом настолько опускается, что ЦЛВД будет выгодней с любой глубины. При этом есть месторождения, где мощность нагревателя в забое доходит до 50–80 кВт, что вдвое-втрое превышает затраты энергии на насосное оборудование. Для таких скважин однозначно рекомендуется применять ЦЛВД.

Правда, оценка затрат только по энергетическим параметрам на основе КПД не является полной, так как в процессе эксплуатации добычного агрегата с ЦЛВД не учитываются затраты на отсутствующие штанги и создание бетонного основания под станком-качалкой. Затраты на штанги и бетонное основание присутствуют в обычных станках-качалках, так что экономическое обоснование ПБНА необходимо рассчитывать более тщательно.

Целью разработки привода ЦЛВД является создание погружного бесштангового электронасосного агрегата (ПБЭНА) с техническими характеристиками лучше, чем у бесштангового погружного насосного устройства возвратно-поступательного действия (ПНУВП) производства КНР (Китай).

### Выводы

1. Основным требованием, определяющими рациональность и эффективность применения новых добычных агрегатов того или иного исполнения, является КПД, что влечет за собой требование по регулированию производительности насосной установки.

2. Использование бесштанговой насосной установки позволяет:

- снизить металлоемкость и затраты на строительные и монтажные работы вследствие исключения станков, фундаментов, штанговых колонн, затрат на подземные ремонты.

- уменьшить эмульгирование нефти в насосно-компрессорных трубах.

- исключить жесткие ограничения по глубине спуска плунжерного насоса в скважину, которая может достигать 3 км и больше.

- становится возможна добыча нефти в скважинах с большой кривизной, а также в горизонтальных скважинах.

3. С учетом наличия значительных запасов вязких нефтей в России, имеющих высокое содержание парафинов, и того

факта, что объемы и интенсивность разработки их месторождений в настоящее время недостаточны, следует признать весьма перспективными разработку и освоение ПБЭНА на основе ЦЛВД. Перспективность связана с тем, что потери энергии происходят в забое скважины, что позволяет эффективно разрабатывать данные месторождения без дополнительного разогрева забоя.

4. Особенностью проектируемого насосного агрегата ПБЭНА на основе ЦЛВД является возможность работы в краткосрочно-периодическом режиме, было показано, что такой режим наиболее рационален в связи с необходимостью поддержания высокого энергетического КПД добычи.

*Работа выполнена в ФГБОУ ВПО ПНИПУ при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02. G25.31.0068 от 23.05.2013 г. в составе мероприятия по реализации постановления Правительства РФ № 218).*

### Список литературы

1. Ключников А.Т., Коротаев А.Д., Шутемов С.В. Моделирование цилиндрического линейного вентильного двигателя // *Электротехника*. – 2013. – № 11. – С. 14–17.
2. Мирзин А.М., Коротаев А.Д., Шутемов С.В. Усилие тяжения цилиндрического линейного вентильного двигателя с постоянными магнитами между статором и вторичным элементом // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 6; URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11637>.
3. Овчинников И.Е., Адволоткин Н.П. Закономерности проектирования вентильных двигателей с постоянными магнитами для станков с ЧПУ и других механизмов // *Электротехника*. – 1988. – № 7. – С. 59–65.
4. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением. – М.: Академия, 2006 – 272 с.
5. Шулаков Н.В., Шутемов С.В. Метод расчета электромагнитных процессов в цилиндрическом линейном вентильном двигателе // *Электротехника*. – 2014. – № 11. – С. 18–22.

### References

1. Kljuchnikov A.T., Korotaev A.D., Shutemov S.V. Modelirovanie cilindricheskogo linejnogo ventilnogo dvigatelja // *Jelektrotehnika*. 2013. no. 11. pp. 14–17.
2. Mirzin A.M., Korotaev A.D., Shutemov S.V. Usilie tjazhenija cilindricheskogo linejnogo ventilnogo dvigatelja s postojannymi magnitami mezhdju statorom i vtorichnym jelementom // *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*. 2013. no. 6; URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11637>.
3. Ovchinnikov I.E., Advolotkin N.P. Zakonomernosti proektirovanija ventilnyh dvigatelej s postojannymi magnitami dlja stankov s ChPU i drugih mehanizmov // *Jelektrotehnika*. 1988. no. 7. pp. 59–65.
4. Sokolovskij G.G. *Jelektroprivody peremennogo toka s chastotnym upravleniem*. M.: Akademija, 2006 272 p.
5. Shulakov N.V., Shutemov S.V. Metod rascheta jelektromagnitnyh processov v cilindricheskom linejnom ventilnom dvigatele // *Jelektrotehnika*. 2014. no. 11. pp. 18–22.