

УДК 621.313

DOI: 10.15593/2224-9397/2021.3.08

**К.А. Конев, А.О. Фурина, А.Д. Коротаев, Е.А. Чабанов**Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия

## ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ ЛИНЕЙНЫЙ ВЕНТИЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ ДОБЫЧИ НЕФТИ БЕСШТАНГОВЫМ МЕТОДОМ

Постоянно возрастающая потребность энергоносителей привела к росту объемов добываемой нефти, поэтому возникает необходимость в использовании автоматизированных технологий в ее добыче, в разработке новых устройств, в совершенствовании конструкции насосного оборудования и электроприводов нового поколения для бесштанговых электронасосных агрегатов. В статье рассматривается возможность использования нового поколения нефтяного оборудования – погружного бесштангового электронасосного агрегата, который взаимодействует с цифровым программным управлением. Таким образом, решается проблема с клиновидным износом труб и стержней на станках-качалках. **Цель исследования:** исследовать возможности повышения рентабельности малодебитных скважин добычи нефти путем применения цилиндрического линейного вентильного двигателя в составе нефтедобывающего агрегата. **Методы:** по результатам сравнительного анализа станка-качалки с плунжерным штанговым насосом и погружного бесштангового электронасосного агрегата произвести расчет цилиндрического линейного вентильного двигателя в программной среде MATHCAD, используя классические методы электромагнитных расчетов. **Результаты:** анализ результатов исследований подтвердил целесообразность применения на практике альтернативного бесштангового способа добычи нефти из малодебитных скважин вместо известных станков-качалок. Также подтверждена обоснованность применения в составе такого агрегата цилиндрического линейного вентильного двигателя. Предложенный способ решил бы проблемы с износом труб и штанг, а также с загрязнением окружающей среды. **Практическая значимость:** погружной бесштанговый электронасосный агрегат имеет меньшие габаритные и установочные размеры, повышает результативность, поэтому такой агрегат дает возможность весьма эффективно добывать нефть не только из обычных, но и из малодебитных, глубоких, наклонных, горизонтальных скважин, а также на отмелях и морских нефтепромыслах.

**Ключевые слова:** цилиндрический линейный вентильный двигатель, погружной бесштанговый электронасос, станок-качалка, плунжерный штанговый насос, малодебитные скважины.

**K.A. Konev, A.O. Furina, A.D. Korotaev, E.A. Chabanov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## CYLINDRICAL LINEAR VALVE MOTOR FOR SHAFTLESS OIL RECOVERY

The constantly increasing demand for energy resources has led to an increase in the volume of oil produced, therefore, there is a need to use automated technologies in its production; in the development of new devices, in the improvement of the design of pumping equipment and electric drives of a

new generation for rodless electric pumping units. The article discusses the possibility of using a new generation of oil equipment - a submersible rodless electric pump unit, which interacts with digital programmed control. Thus, the problem with wedge-shaped wear of pipes and rods on pumping units is solved. **Purpose of the study:** to investigate the possibilities of increasing the profitability of marginal oil production wells by using a cylindrical linear valve motor as part of an oil-producing unit. **Methods:** based on the results of a comparative analysis of a pumping unit with a plunger rod pump and a submersible rodless electric pump unit, calculate a cylindrical linear valve motor in the MATHCAD software environment, using classical methods of electromagnetic calculations. **Results:** analysis of research results confirmed the feasibility of using in practice an alternative rodless method of oil production from marginal wells instead of the known pumping units. The validity of using a cylindrical linear valve motor as part of such a unit has also been confirmed. The proposed method would solve the problems with the wear of pipes and rods, as well as with environmental pollution. **Practical significance:** a submersible rodless electric pump unit has smaller overall and installation dimensions, increases efficiency, therefore, such a unit makes it possible to very efficiently extract oil not only from conventional, but also from marginal, deep, inclined, horizontal wells, as well as in shallows and offshore oil fields.

**Keywords:** cylindrical linear valve motor, submersible rodless electric pump, pumping unit, piston rod pump, marginal wells.

## **Введение**

Развитие экономики в регионе, стране и мире сопровождается постоянно возрастающей потребностью в полезных ископаемых. Прежде всего растет потребность в энергоносителях. В настоящее время основным источником энергии среди всех видов полезных ископаемых является нефть. В связи с возросшим спросом на нефть ее добыча постоянно растет, а следовательно, происходит истощение существующих месторождений. Постоянная эксплуатация имеющихся скважин приводит к увеличению глубины залегания нефти, поэтому высокодебитные постепенно переходят в стадию средне- и низкодебитных.

Для поддержания добычи нефти на неубывающем и достаточно высоком уровне необходимо проводить изыскательские работы по изучению текущего состояния всех скважин, особенно с глубоким залеганием нефти. По результатам таких работ требуется разрабатывать мероприятия по рациональному управлению истощенным районом, а также применять на практике научно-исследовательские разработки, которые смогут если не повысить, то хотя бы поддержать на прежнем уровне добычу нефти из малодебитных скважин. Далее рассмотрим возможность применения на таких скважинах научно-исследовательских разработок в области электротехнических устройств в составе добывающих агрегатов [1].

В настоящее время в Российской Федерации существуют два основных вида добывающих нефть агрегатов: плунжерный насос станков-качалок и центробежный погружной насосный агрегат. Для добы-

чи нефти из высокодебитных скважин лучше использовать центробежные погружные насосы, а для средне- и малодебитных скважин со сложным режимом работы подходит плунжерный насос, перемещаемый с помощью станка-качалки.

Несмотря на свою распространенность, станки-качалки имеют ряд значительных недостатков:

- они имеют огромную массу, существенная доля которой перемещается по сложным криволинейным траекториям;
- для их установки нужен фундамент, для построения которого необходимы вспомогательные издержки, тем более в условиях вечной мерзлоты;
- колонны штанг изготавливают из дорогих легированных сталей;
- глубина спуска плунжерного насоса не должна быть больше 2000 м из-за опасности обрыва штанг, так как существует риск поломки столба труб, вес которого играет очень важную роль;
- под нагрузкой колонна штанг подвергается различным усилиям, поэтому насос заполняется в меньшей степени, так как ход его плунжера уменьшается;
- поскольку скважины криволинейны, то колонна штанг при обратно-поступательном движении соприкасается с насосно-компрессорными трубами, вследствие чего происходит их завышенный износ;
- высокое трение штанги о стенки скважины приводит к низкой производительности устройства;
- невозможно равномерно управлять произвольным количеством перемещаемых труб, так как наличие изменяющихся упругих деформаций штоковой колонны не позволяет в полной мере использовать рабочие движения поршня в цилиндре;
- нефть также эмульгируется в трубах за счет взаимного движения штанг.

Вышеупомянутые недочеты существенно влияют на производительность нефтедобывающего агрегата, поэтому возникает необходимость практического применения научных разработок с целью повышения качества их работы, а именно эти недостатки делают необходимым создание глубинного насосного агрегата без штанг. Цилиндрический линейный вентильный двигатель (ЦЛВД), который совместно с плунжерным насосом входит в состав погружного бесштангового электронасосного агрегата (ПБЭНА), не имеет упомянутых выше

дефектов, так как в случае применения плунжерного насоса он жестко связан с ЦЛВД [1]. Это позволяет избавиться от ряда недостатков и, следовательно, существенно увеличить результативность установки. В состав самого агрегата кроме ЦЛВД входит расположенный в непосредственной близости от скважины преобразователь частоты (ПЧ) с микропроцессорным управлением, осуществляющий электропитание двигателя и его управление [2–4]. Поскольку основой агрегата добычи нефти является погружной насос, то исследования по улучшению бесштангового глубинного насоса необходимо проводить прежде всего в отношении разработки электропривода добывающего агрегата.

Таким образом, единственно возможным вариантом увеличения эффективности добычи нефти из низкодебитных скважин является использование электропривода плунжерного насоса нового поколения, основанного на применении ЦЛВД с постоянными магнитами [5–7].

### **Постановка задачи**

Для реализации этой возможности следует изучить основные характеристики ЦЛВД в составе ПБЭНА, обеспечивающего возвратно-поступательное движение плунжера погружного штангового насоса с числом двойных ходов (0,5–8) и длиной хода (1,2–2) м. Промышленный образец ЦЛВД для эффективной добычи нефти должен гарантировать номинальное тяговое усилие на плунжер 3,5 т, что позволяет добывать нефть с глубины 3000 м.

Для качественной и продуктивной работы тяговое усилие ЦЛВД, который является ключевым объектом ПБЭНА, должно быть не меньше 3000–5000 кгс. Постоянные магниты в процессе работы такой электрической машины создают магнитное поле в воздушном зазоре между корпусом ЦЛВД и его вторичным элементом [6, 8, 9].

В настоящее время мощные магниты обладают следующими характеристиками: остаточная магнитная индукция до 1,4 Тл; коэрцитивная сила порядка 250–300 кА/м; рабочая температура 1800 °С. Предварительные расчеты и исследования опытного образца ЦЛВД подтвердили, двигатель такой конструкции способен создать тяговое усилие на активной длине штанги в один метр до 500 кгс. В этом случае для получения тягового усилия 3,5 т необходим ЦЛВД длиной 7–8 м. Для решения такой задачи требуется разработать методику расчёта рабочих характеристик ЦЛВД.

На рис. 1 представлен ПБЭНА, в котором установлен ЦЛВД. Именно такой агрегат используется для добычи нефти из низкодебитных скважин.

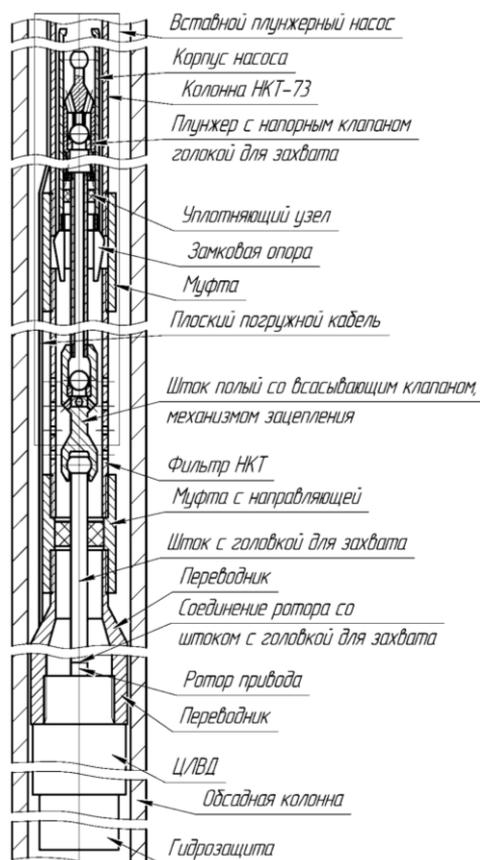


Рис. 1. ПБЭНА совместно с ЦЛВД

Поршень плунжерного насоса, который прикреплен к штоку ЦЛВД, совершает возвратно-поступательные движения, поэтому ПБЭНА сможет бурить скважины практически любой доступной глубины и почти произвольной траектории с малыми затратами. Множество проблем может быть решено с помощью такой конструкции, а именно: не нужно будет заливать фундамент бетоном в виде широкой и толстой плиты; консервировать нефтедобывающую установку в относительно короткий период, устанавливая и обслуживая станок-качалку. С помощью такого агрегата добыча нефти будет более эффективной. При этом также будут снижены экономические затраты на электрическую энергию и износ материала при передвижении колонны штанг в скважине.

## **Требования к ПБЭНА и ЦЛВД**

Вспомогательное давление, которое противодействует опусканию жидкости под силой тяжести, способствует получению пластовой жидкости. Насосные установки с электроприводом (нефтедобывающие агрегаты) предназначены для создания дополнительного давления. Основной задачей электропривода является обеспечение нефтедобывающего агрегата механической энергией путем преобразования электрической. Для обеспечения максимально возможного дебита скважины нефтедобывающий агрегат снабжают системой управления, которая в наше время строится на основе микропроцессорной техники [2–4]. Конструкция и режимы работы скважинной штанговой насосной установки и электрического центробежного насоса сформировали основные требования к ПБЭНА и ЦЛВД, которые смогут полностью обеспечить необходимые для нормальной работы параметры и характеристики [10]:

1. Перемещения колонны должны выполняться без торможений. Двигатель должен выполнять свою работу, даже если жидкость поднялась на поверхность земли. Развиваемая при этом скорость должна оставаться неизменной.

2. Шаг движения колонны должен легко и просто управляться.

3. Добыча нефти из скважины осуществляется за счет изменения количества удвоенных шагов индуктора ЦЛВД, а значит, и самого плунжера, которое регулируется источником электрического питания.

4. Частота и расстояние шага колонны должны меняться независимо друг от друга.

5. Потенциальная энергия нефти или мощность индуктора должны обеспечивать возврат поршня в первоначальное положение.

6. Двигатель должен останавливаться при достижении нефтью критического уровня и вновь запускаться, если ее уровень снова поднялся.

7. Модуль ЦЛВД, усилие которого не менее 500 кГс, должен быть длиной 100 см, или 1 м.

В настоящее время вентильные двигатели вращательного движения с постоянными магнитами находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности. Были разработаны новые методики расчета электромагнитного поля и характеристик таких двигателей. Однако использовать эти методики для расчета полей и характеристик ЦЛВД возвратно-поступательного движения не представляется

возможным из-за существенного отличия в выполнении обмоток и геометрии индуктора и вторичного элемента.

Использовать ЦЛВД на предприятиях довольно сложно, так как затруднителен и индивидуален расчет параметров и характеристик ЦЛВД с постоянными магнитами. Поэтому рассмотрим далее реализацию подобной актуальной методики.

### Устройство и конструкция ЦЛВД

В состав ЦЛВД входит круглый индуктор, закрепленный неподвижно в корпусе, и немагнитный шток с установленными на нем постоянными магнитами. Значения напряженности и индукции постоянных магнитов следующие:  $H_0 = 680$  кА/м,  $B_z = 1,1$  Тл. На рис. 2 представлено продольное сечение индуктора и вторичного элемента. Цилиндрическая обмотка индуктора располагается в зубцах и пазах. Деление полюсное  $\tau = 30$ , а зубцовое деление  $t_z = 10$  [11,12].

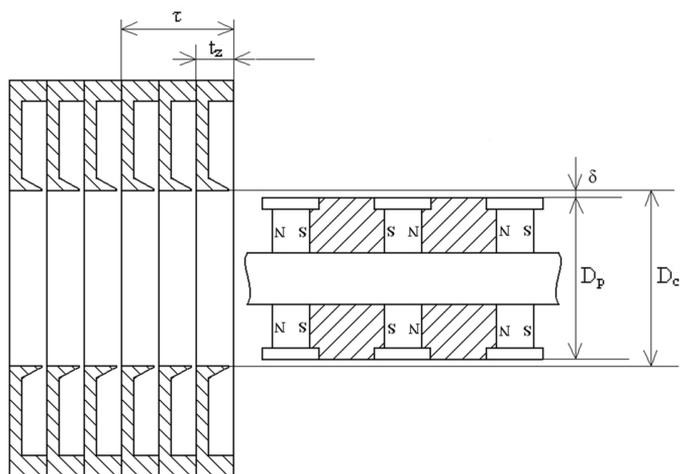


Рис. 2. Сечение индуктора и ротора

Преобразователь частоты (ПЧ) обеспечивает электроэнергией трехфазную обмотку индуктора, состоящую из катушек, соединенных воедино на всем расстоянии неподвижной части машины. Именно ПЧ задает переменное магнитное поле, создаваемое обмоткой статора. Между индуктором и рабочим телом (вторичным элементом) имеется воздушный зазор 1,5. Шток вторичного элемента крепится к корпусу ЦЛВД на торцах с помощью подшипников скольжения. Диаметр ротора машины составляет 55 мм.

### Расчет характеристик ЦЛВД

ЦЛВД состоит из одинаковых модулей. Количество модулей определяет общую длину ЦЛВД, которая задает мощность и тяговое усилие всего двигателя [13–15]. Геометрические размеры обсадной трубы и колонны штанг изменить невозможно, поэтому поперечное сечение ЦЛВД должно быть ограниченным. Следовательно, для создания необходимого тягового усилия требуется наращивать ЦЛВД в длину до 8–10 м.

Рабочим ходом считается перемещение ротора вверх с усилием  $F_p$ , на обратном ходу усилие составляет  $F_0$ , которое должно быть на много меньше  $F_p$ . Возвратно-поступательное движение образуется при взаимодействии плунжерного насоса и вторичного элемента ЦЛВД [5, 6, 16, 17].

Исходные данные для расчета ЦЛВД перечислены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета ЦЛВД

Обозначения	Ед. изм.	Значения	Название параметра
$D_p$	м	0,055	Диаметр вторичного элемента
$I$	А	30	Действующее значение тока, протекающего по обмоткам индуктора
$H_0$	А/м	680 000	Напряженность магнитного поля
$B_z$	Тл	1,1	Магнитная индукция в воздушном зазоре
$\tau$	м	0,03	Полосное деление
$\delta$	м	0,0015	Ширина немагнитного зазора
$b$	м	0,015	Ширина полюса
$w_k$		20	Число витков катушки в пазу
$t_z$	м	0,01	Зубцовое деление индуктора
$p$		16	Число пар полюсов
$D_m$	м	0,047	Внешний диаметр реального магнита ЦЛВД
$d_m$	м	0,022	Внутренний диаметр реального магнита ЦЛВД
$h_m$	м	0,008	Ширина реального магнита ЦЛВД
$f$	Гц	1	Частота сети
$\mu_0$	о.е.	$12,56 \cdot 10^{-7}$	Магнитная проницаемость

Расчет ЦЛВД следует начать с определения основного параметра, а именно с тягового усилия  $F_{эм}$ . Далее необходимо найти мощность  $P_{эм}$  ЦЛВД.

Тяговое усилие модуля ЦЛВД найдем по закону Ампера:

$$F_{эм} = \alpha \cdot \pi \cdot I_{л} \cdot B_z \cdot D \cdot l_{мод}, \quad (1)$$

где  $D$  – диаметр ротора с учетом воздушного зазора,  $D = D_p + \delta$ ;  $l_{мод}$  – длина активной части модуля индуктора ЦЛВД,  $l_{мод} = 2 \cdot p \cdot \tau$ ;  $\alpha$  – коэффициент полюсного деления,  $\alpha = b / \tau$ ;  $I_{л}$  – линейная токовая нагрузка, которую испытывает обмотка индуктора, находится по формуле

$$I_{л} = \frac{w_k \cdot I}{t_z}. \quad (2)$$

В данной формулировке закона Ампера все параметры, кроме магнитной индукции, известны, которая создается постоянными магнитами в воздушном зазоре ЦЛВД.

Истинная геометрия меняется при переходе от цилиндрической системы координат, которая используется для описания цилиндрических тел, к декартовой (данный переход оправдан, так как следует рассчитать линейный двигатель) [18–20], поэтому магнитная индукция в воздушном зазоре заменяется ее средним значением и после преобразований будет определяться по формуле [21–24]:

$$B_{ср} = \frac{H_0}{\frac{4b \cdot D \cdot H_0}{B_2 (D_m + d_m)^2} + \frac{2 \cdot \delta}{\mu_0 \cdot h_m}}, \quad (3)$$

где  $B_2$  – магнитная индукция постоянных магнитов, установленных на вторичном элементе.

Вычисления и построение характеристик производились в программном обеспечении Mathcad.

Задавая  $I$  в диапазоне от 5 до 35 А, определим тяговое усилие, действующее на вторичный элемент ЦЛВД. Результат вычислений представлен в табл. 2 и на рис. 3.

Таблица 2

Значения тягового усилия ЦЛВД в зависимости от  $I$

$I, A$	5	10	15	20	25	30	35
$F_{эм}, Н$	626,925	1254	1881	2508	3135	3762	4388
$F_{эм}, кгс$	63,928	127,872	191,808	255,744	319,681	383,617	447,451

Согласно рис. 3 тяговое усилие  $F_{эм}$  линейно возрастает с увеличением тока обмотки индуктора  $I$ , а диапазон возможных значений подтверждает, что нужное усилие погружного насоса достижимо.

Рассчитаем полезную активную мощность ЦЛВД  $P_{эм}$  при разных частотах питающего напряжения по формуле

$$P_{эм} = F_{эм} \cdot v, \quad (4)$$

где  $v$  – скорость перемещения вторичного элемента.

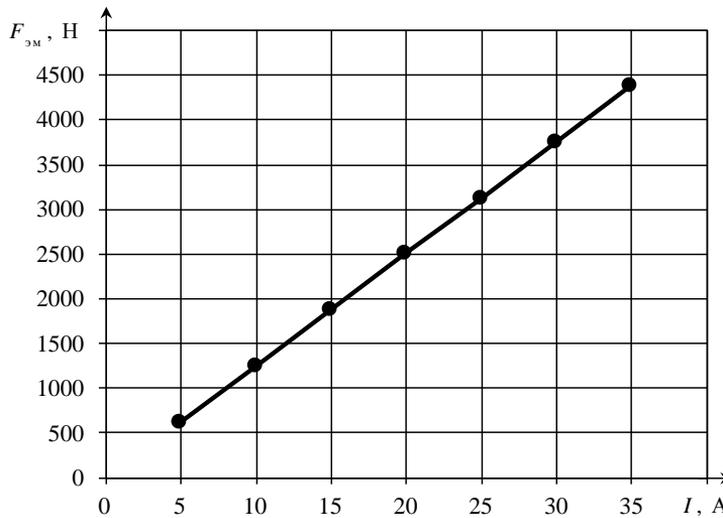


Рис. 3. Зависимость тягового усилия  $F_{эм}$  от действующего значения тока обмотки индуктора  $I$

Результаты расчетов тяговых усилий и полезной мощности ЦЛВД  $P_{эм}$  при изменении частоты питающего напряжения  $f$  от 1 до 7 Гц представлены в табл. 3 и на рис. 4.

Таблица 3

Значения тягового усилия ЦЛВД в зависимости от  $I$  и  $f$

Частота источника, Гц	$I$ , Ам	5	10	15	20	25	30	35
$f = 1$	$F_{эм}$ , Н	626,925	1254	1881	2508	3135	3762	4388
	$P_{эм}$ , Вт	37,615	75,24	112,86	150,48	188,1	225,72	263,28
$f = 2$	$F_{эм}$ , Н	626,925	1254	1881	2508	3135	3762	4388
	$P_{эм}$ , Вт	75,231	150,48	225,72	300,96	376,2	451,44	526,56
$f = 3$	$F_{эм}$ , Н	626,925	1254	1881	2508	3135	3762	4388
	$P_{эм}$ , Вт	112,846	225,72	338,58	451,44	564,3	677,16	789,84

Частота источника, Гц	$I$ , Ам	5	10	15	20	25	30	35
$f = 4$	$F_{эм}$ , Н	626,925	1254	1881	2508	3135	3762	4388
	$P_{эм}$ , Вт	150,462	300,96	451,44	601,92	752,4	902,88	1053
$f = 5$	$F_{эм}$ , Н	639,472	1279	1918	2558	3197	3837	4476
	$P_{эм}$ , Вт	188,077	376,2	564,3	752,4	940,5	1129	1316
$f = 6$	$F_{эм}$ , Н	626,925	1254	1881	2508	3135	3762	4388
	$P_{эм}$ , Вт	225,693	451,44	677,16	902,88	1129	1354	1580
$f = 7$	$F_{эм}$ , Н	626,925	1254	1881	2508	3135	3762	4388
	$P_{эм}$ , Вт	263,308	526,68	790,02	1053	1317	1580	1843

Согласно табл. 3 и рис. 4 варьирование частоты источника питания  $f$  не оказывает существенного влияния на тяговое усилие ЦЛВД  $P_{эм}$ . Однако с ростом частоты источника питания  $f$  активная электромагнитная мощность  $P_{эм}$  возрастает.

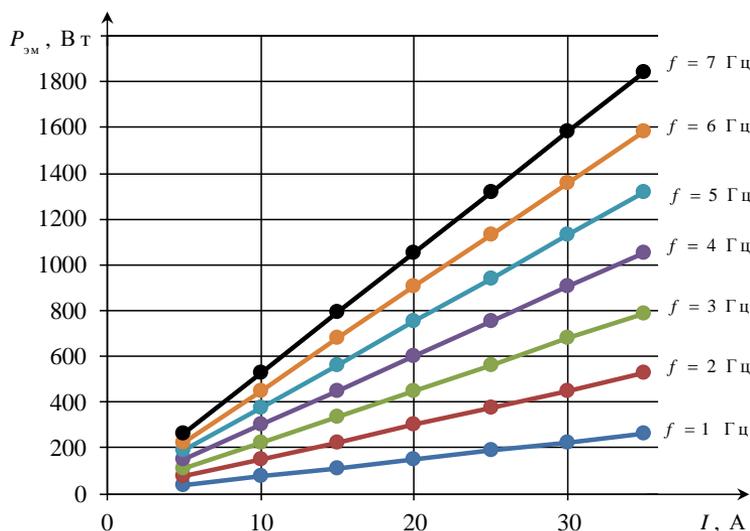


Рис. 4. Зависимость полезной мощности ЦЛВД  $P_{эм}$  от действующего тока обмотки индуктора  $I$  при изменении частоты питающего напряжения  $f$  от 1 до 7 Гц

### Анализ полученных характеристик

Согласно рис. 3 тяговое усилие ЦЛВД прямо пропорционально действующему значению тока фазы двигателя  $I$ . Так, при номинальном токе  $I = 30$  А тяговое усилие составляет  $F_{эм} = 3762$  с одного метра длины двигателя. Это усилие получено с применением вторичного элемента, создающего в воздушном зазоре магнитную индукцию 1,1 Тл.

При использовании магнитов с  $B_2 = 1,4$  Тл тяговое усилие должно увеличиться. Действительно, при  $B_2 = 1,1$  Тл среднее значение магнитной индукции в зазоре равно 0,75 Тл, а при замене магнитов на штоке вторичного элемента с индукцией 1,4 Тл среднее значение индукции в зазоре увеличивается до величины 0,95 Тл. При этом тяговое усилие вторичного элемента увеличивается до значения 4873 Н, или 500 кгс с одного метра длины модуля ЦЛВД.

Таким образом, для получения необходимого усилия ЦЛВД в целом, равного 3500 кгс, требуется применить двигатель, длина которого составит 7 м.

Мощность на штоке вторичного элемента согласно рис. 4 прямо пропорциональна току фазы индуктора и частоте питающего напряжения в рабочем диапазоне 1–7 Гц. Эта мощность на номинальном токе находится в пределах от 225 до 1580 Вт.

Расчет показал, что разрабатываемый ЦЛВД обеспечивает все условия, поставленные целью исследований.

### **Заключение**

Результаты исследований подтвердили обоснованность применения на практике альтернативного способа добычи нефти из малодебитных скважин вместо известных станков-качалок [25].

Предложенный способ решил бы проблемы с износом труб и штанг, а также с загрязнением окружающей среды. ПБЭНА по сравнению с балансирным станком-качалкой имеет меньшие габаритные и установочные размеры примерно на 30–50 %, повышает результативность на 60–90 %. Помимо этого за годы добычи нефти с помощью станков-качалок в мире скопилось довольно большое количество низкодебитных скважин, которые подвергаются консервации по причине неспособности классических методов добывать нефть из них в дальнейшем. Замена станков-качалок на таких скважинах на ПБЭНА позволит в дальнейшем результативно добывать нефть.

Кроме того, ЦЛВД в составе ПБЭНА дает возможность весьма эффективно добывать нефть не только в обычных, но и в глубоких, наклонных, горизонтальных скважинах, а также на отмелях и морских нефтепромыслах.

Согласно проведенным исследованиям установлено, что предлагаемая конструкция ПБЭНА, основанная на применении ЦЛВД, обладает несколькими значительными положительными сторонами в сравнении со штанговыми глубинными насосными установками:

- возможность плавного регулирования длины хода плунжера насоса и числа двойных ходов независимо друг от друга;
- невысокая металлоемкость оборудования облегчает перевозку и монтаж ПБЭНА;
- отпадает необходимость в возведении громоздкого фундамента для установки оборудования;
- отсутствует дорогостоящая колонна штанг;
- появляется возможность использования ПБЭНА для добычи нефти из глубоких скважин до 3000 м и более;
- жёсткая механическая связь между ЦЛВД и насосом увеличивает коэффициент заполнения насоса и эффективность его использования;
- нагрев двигателя в зоне отбора нефти уменьшает вероятность асфальтосмолопарафиновых отложений.

Также следует отметить, что методика расчета ЦЛВД, предложенная в данной статье, может быть использована для конструкторских изысканий с целью проектирования линейного двигателя меньшей мощности и габаритов [16, 17]. Такие ЦЛВД могут применяться в различных устройствах и агрегатах других областей народного хозяйства, например, в шлифовальных станках для перемещения планшайбы, в системах автоматического регулирования и управления для линейно перемещающихся объектов и др. В таких устройствах имеется необходимость организации поступательного или возвратно-поступательного движения вторичного элемента без применения механических преобразователей (редуктор, червяк и др.), способствующих снижению эффективности и надежности работы этих агрегатов [13].

*Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по государственному заданию FSNM-2020-0028.*

### **Библиографический список**

1. Шулаков Н.В, Шутемов С.В. Перспективы использования цилиндрического линейного вентильного двигателя в качестве привода плунжерных нефтедобычных агрегатов // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 12–4. – С. 795–799.

2. Алгоритм управления цилиндрическим линейным вентильным двигателем с постоянными магнитами / М.С. Байбаков, А.Т. Ключников, А.Д. Коротаев, С.В. Шутемов // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. – 2015. – Т. 13, № 9. – С. 184–189.

3. Система управления цилиндрического вентильного двигателя возвратно поступательного движения / М.С. Байбаков, А.Т. Ключников, А.Д. Коротаев, С.В. Шутемов // Информационно-измерительные управляющие системы. – 2015. – Т. 13, № 9. – С. 64–69.

4. Бездатчиковое управление вентильным двигателем / С.А. Бэстрэу, А.Т. Ключников, А.Д. Коротаев, А.М. Мирзин, С.В. Шутемов // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы краевой науч.-техн. конф.; 22 мая 2013 г. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – С. 352–360.

5. Шутемов С.В. Исследование цилиндрического линейного вентильного электродвигателя для погружного бесштангового насоса // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 12, Т. 4. – С. 800–805.

6. Балагуров В.А., Гатеев Ф.Ф., Ларионов Л.А. Электрические машины с постоянными магнитами / под ред. Ф.М. Юферов. – М. – Л.: Энергия, 1964. – 480 с.

7. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 168 с.

8. Шулаков Н.В., Шутемов С.В. Метод расчета электромагнитных процессов в цилиндрическом линейном вентильном двигателе // Электротехника. – 2014. – № 11. – С. 18–22.

9. Бурмакин А.М., Огарков Е.М., Шутемов С.В. Определение главных размеров линейных асинхронных электродвигателей с односторонним индуктором // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2014. – № 4. – С. 97–100.

10. Цилиндрический линейный вентильный двигатель для погружного бесштангового насоса / А.Т. Ключников, А.Д. Коротаев, Н.В. Шулаков, С.В. Шутемов // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. – 2015. – Т. 1. – С. 158–162.

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

12. Коротаев А.Д. Поперечные усилия в линейных асинхронных двигателях // Электрические машины и электромашинные системы: межвуз. сб. науч. тр. / Пермь. политехн. ин-т. – Пермь, 1987. – С. 13–18.

13. Reduction of the pull effect of a cylindrical linear synchronous motor / S. Shutemov, E. Chabanov, A. Shevkunova, A. Shapshal, T. Talakhadze // E3S Web of Conferences. Key Trends in Transportation Innovation, КТТИ 2019. – 2020. – P. 01015.

14. Расчет тягового усилия цилиндрического линейного асинхронного двигателя для привода плунжерного насоса / В.В. Шапошников, Р.О. Токарев, А.Д. Коротаев, Е.А. Чабанов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – № 29. – С. 75–91.

15. Расчет тягового усилия цилиндрического линейного вентильного двигателя для привода плунжерного насоса / В.В. Шапошников, Р.О. Токарев, А.Д. Коротаев, Е.А. Чабанов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – № 32. – С. 183–198.

16. Свечарник Д.В. Линейный электропривод. – М.: Энергия, 1979. – 152 с.

17. Соколов М.М., Сорокин Л.К. Электропривод с линейными двигателями. – М.: Энергия, 1974. – 136 с.

18. Ключников А.Т., Коротаев А.Д., Чирков Д.А. Метод расчета магнитной цепи цилиндрического линейного вентильного двигателя по схеме замещения // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2010. – Т. 14, № 9. – С. 64–69.

19. Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф., Шымчак П. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ–УПИ, 2005. – 431 с.

20. Огарков Е.М. Квазитрехмерная теория линейных асинхронных двигателей. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-т, 2003. – 240 с.

21. Вольдек А.И. Электрические машины: учеб. для студ. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1974. – 840 с.

22. Шулаков Н.В. Электрические машины: конспект лекций. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 325 с.

23. Кацман М.М. Электрические машины: учебник для студ. образоват. учрежд. сред. профес. образов. – 9-е изд., стер. – М.: Академия, 2008. – 496 с.

24. Копылов И.П. Электрические машины : учебник для бакалавров / под ред. И.П. Копылова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2012. – 675 с. – Сер. Бакалавр.

25. Коротаев А.Д., Шулаков Н.В., Шутемов С.В. Экспериментальные исследования цилиндрического линейного вентиляционного электродвигателя // Актуальные проблемы энергосберегающих электро-технологий: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф.; 17–20 марта 2014 г. – Екатеринбург, 2014. – С. 198–200.

### References

1. Shulakov N.V, Shutemov S.V. Perspektivy ispol'zovaniia tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatel'ia v kachestve privoda plunzhernykh neftedobychnykh agregatov [Prospects for using a cylindrical linear valve motor as a drive for plunger oil production units]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2016, no. 12-4, pp. 795-799.

2. Baibakov M.S., Kliuchnikov A.T., Korotaev A.D., Shutemov S.V. Algoritm upravleniia tsilindricheskim lineinym ventil'nym dvigatelem s postoiannymi magnitami [Algorithm of control of a cylindrical linear valve motor with permanent magnets]. *Avtomatizatsiia v elektroenergetike i elektrotekhnike*, 2015, vol. 13, no. 9, pp. 184-189.

3. Baibakov M.S., Kliuchnikov A.T., Korotaev A.D., Shutemov S.V. Sistema upravleniia tsilindricheskogo ventil'nogo dvigatel'ia vozvratno postupatel'nogo dvizheniia [Control system of a cylindrical valve motor of reciprocating motion]. *Informatsionno-izmeritel'nye upravliaiushchie sistemy*, 2015, vol. 13, no. 9, pp. 64-69.

4. Beetreu S.A., Kliuchnikov A.T., Korotaev A.D., Mirzin A.M., Shutemov S.V. Bezdatchikovoe upravlenie ventil'nym dvigatelem [Sensorless control of the valve motor]. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii. Materialy kraevoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*, 22 May 2013. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2013, pp. 352-360.

5. Shutemov S.V. Issledovanie tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo elektrodvigatel'ia dlia pogruzhnogo besshtangovogo nasosa [Study of a cylindrical linear valve motor for a submersible rodless pump]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2016, no. 12, vol. 4, pp. 800-805.

6. Balagurov V.A., Gateev F.F., Larionov L.A. Elektricheskie mashiny s postoiannymi magnitami [Electric machines with permanent magnets]. Ed. F.M. Iuferov. Moscow. Leningrad: Energiia, 1964, 480 p.

7. Ledovskii A.N. Elektricheskie mashiny s vysokokoertsitivnymi postoiannymi magnitami [Electric machines with high coercivity permanent magnets.]. Moscow: Energoatomizdat, 1985, 168 p.

8. Shulakov N.V., Shutemov S.V. Metod rascheta elektromagnitnykh protsessov v tsilindricheskom lineinom ventil'nom dvigatele [Method for calculating electromagnetic processes in a cylindrical linear valve motor]. *Elektrotehnika*, 2014, no. 11, pp. 18-22.

9. Burmakin A.M., Ogarkov E.M., Shutemov S.V. Opredelenie glavnykh razmerov lineinykh asinkhronnykh elektrodvigateli s odnostoronnim induktorom [Determination of the main dimensions of linear asynchronous electric motors with one-sided inductor]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2014, no. 4, pp. 97-100.

10. Kliuchnikov A.T., Korotaev A.D., Shulakov N.V., Shutemov S.V. Tsilindricheskii lineinyi ventil'nyi dvigatel' dlia pogruzhnogo besshtangovogo nasosa [Cylindrical linear valve motor for submersible rodless pump]. *Avtomatizatsiia v elektroenergetike i elektrotehnike*, 2015, vol. 1, pp. 158-162.

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

12. Korotaev A.D. Poperechnye usiliia v lineinykh asinkhronnykh dvigateliakh [Cross efforts in linear asynchronous motors]. *Elektricheskie mashiny i elektromashinnye sistemy: mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov*. Perm', Permskii politekhnicheskii institut, 1987, pp. 13-18.

13. Shutemov S., Chabanov E., Shevkunova A., Shapshal A., Talakhadze T. Reduction of the pull effect of a cylindrical linear synchronous motor. *E3S Web of Conferences. Key Trends in Transportation Innovation, KTTI 2019*, 2020, 01015 p.

14. Shaposhnikov V.V., Tokarev R.O., Korotaev A.D., Chabanov E.A. Raschet tiagovogo usiliia tsilindricheskogo lineinogo asinkhronnogo dvigatel'ia dlia privoda plunzhernogo nasosa [Calculation of the tractive effort of a cylindrical linear induction motor for a plunger pump drive]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2019, no. 29, pp. 75-91.

15. Shaposhnikov V.V., Tokarev R.O., Korotaev A.D., Chabanov E.A. Raschet tiagovogo usiliia tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatel'ia dlia privoda plunzhernogo nasosa [Calculation of the tractive effort of a cylindrical linear valve motor for a plunger pump drive]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2019, no. 32, pp. 183-198.

16. Svecharnik D.V. Lineinyi elektroprivod [Linear Electric Drive]. Moscow: Energiia, 1979, 152 p.

17. Sokolov M.M., Sorokin L.K. Elektroprivod s lineinymi dvigatel'iami [Electric drive with linear motors]. Moscow: Energiia, 1974, 136 p.

18. Kliuchnikov A.T., Korotaev A.D., Chirkov D.A. Metod rascheta magnitnoi tsepi tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatel'ia po skheme zameshcheniia [Method for calculating the magnetic circuit of a cylindrical linear valve motor according to the equivalent circuit]. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravliaiushchie sistemy*, 2010, vol. 14, no. 9, pp. 64-69.

19. Sarapulov F.N., Sarapulov S.F., Shymchak P. Matematicheskie modeli lineinykh induktsionnykh mashin na osnove skhem zameshcheniia [Mathematical models of linear induction machines based on equivalent circuits]. 2nd ed. Ekaterinburg: Ural'skii federal'nyi universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina, 2005, 431 p.

20. Ogarkov E.M. Kvazitrehmernaia teoriia lineinykh asinkhronnykh dvigatelei [Quasi-three-dimensional theory of linear induction motors]. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2003, 240 p.

21. Vol'dek A.I. Elektricheskie mashiny [Electric cars]. 2nd ed. Moscow: Energiia, 1974, 840 p.

22. Shulakov N.V. Elektricheskie mashiny [Electric machines]. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2008, 325 p.

23. Katsman M.M. Elektricheskie mashiny [Electric machines]. 9nd ed. Moscow: Akademiia, 2008, 496 p.

24. Kopylov I.P. Elektricheskie mashiny [Electric machines]. Ed. I.P. Kopylov. 2nd ed. Moscow: Iurait, 2012, 675 p.

25. Korotaev A.D., Shulakov N.V., Shutemov S.V. Eksperimental'nye issledovaniia tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo elektrodvigatelei [Experimental studies of a cylindrical linear valve electric motor]. *Aktual'nye problemy energosberegaiushchikh elektrotekhnologii. Materialy XIV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*, 17-20 March 2014. Ekaterinburg, 2014, pp. 198–200.

### **Сведения об авторе**

**Конев Константин Андреевич** (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: looking\_99@mail.ru).

**Фурина Александра Олеговна** (Пермь, Россия) – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: alexandra.furina@yandex.ru).

**Коротаев Александр Дмитриевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: alexanderkorotaev16@gmail.com).

**Чабанов Евгений Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ceapb@mail.ru).

### **About the authors**

**Konstantin A. Konev** (Perm, Russian Federation) – Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: KolpMA@yandex.ru).

**Aleksandra O. Furina** (Perm, Russian Federation) – Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: KolpMA@yandex.ru).

**Aleksandr D. Korotaev** (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Electrical Engineering and Electromechanics of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: alexanderkorotaev16@gmail.com).

**Evgenii A. Chabanov** (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Electrical Engineering and Electromechanics of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: ceapb@mail.ru).

Получено 25.09.2021