

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2023.4.06

УДК 621.313.333.2

М.А. Заборовцева¹, Е.А. Чабанов², Е.В. Чабанова², К.А. Конев^{2,3}¹Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, Российская Федерация²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация³ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ, Пермь, Российская Федерация

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА С ЦЕЛЬЮ ДОБЫЧИ НЕФТИ

В наши дни нефть играет большое значение в повседневной жизни. Вопрос о повышении эффективности добычи нефти с каждым годом становится все более актуальным в России и во всем мире и на сегодняшний день является одной из важных задач. На месторождении нефти обычно расположено множество скважин, имеющих разные дебит, диаметр и глубину. Также нефть имеет разную вязкость, различный динамический уровень жидкости. Указанные обстоятельства существенно осложняют процесс добычи нефти, особенно при наличии большого количества скважин, по причине необходимости расчета и проектирования под каждую из них определенной насосной установки, приводимой в движение конкретным, также рассчитанным и спроектированным двигателем. В данной статье предлагается прогрессивный способ решения возникшей проблемы, ранее в литературе практически не представленный. **Цель исследований:** исследовать возможность и целесообразность использования универсального двигателя для установки электроцентробежного насоса с целью добычи нефти на любом типе скважин, которые существуют на месторождении, а также произвести его расчет и проектирование. **Методы:** с учетом результатов исследования и оценки состояния нефтедобывающей отрасли производится анализ функционирования реального нефтяного месторождения с целью определения целесообразности применения универсального двигателя на его скважинах. Производится расчет параметров и подбор типоразмера насосной установки для нефтедобычи для последующего проектирования универсального асинхронного двигателя. **Результаты:** исследования подтвердили, что использование универсального асинхронного двигателя при нефтедобыче на различных скважинах целесообразно. Использование такого двигателя позволит снизить материальные и финансовые затраты на проведение мероприятий по логистике, обслуживанию и ремонту оборудования, используемого на месторождениях нефтедобычи. **Практическая значимость:** по реальным данным цеха добычи нефти и газа №8 Лукойл-Пермь, представляющим собой параметры скважин и характеристики нефти, произведен расчет установок электроцентробежного насоса и соответствующих им параметров асинхронных двигателей, а также обоснованы параметры и характеристики универсального асинхронного двигателя и выполнено его проектирование с целью повышения эффективности нефтедобычи.

Ключевые слова: добыча нефти, скважина, асинхронный двигатель, электрическая сеть, установка электроцентробежного насоса, универсальный электрический двигатель.

M.A. Zaborovtseva¹, E.A. Chabanov², E.V. Chabanova², K.A. Konev^{2,3}

¹PJSC “Perm Research and Production Instrument-Making Company”,
Perm, Russian Federation

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

³LUKOIL-PERM, Perm, Russian Federation

CALCULATION AND DESIGN OF A UNIVERSAL ENGINE FOR INSTALLING AN ELECTRIC CENTRIFUGAL PUMP FOR OIL PRODUCTION

Nowadays, oil plays a big role in everyday life. The issue of increasing the efficiency of oil production is becoming more and more relevant every year in Russia and around the world and today is one of the important tasks. An oil field usually has many different wells with different flow rates, diameters and depths. Oil also has different viscosities and different dynamic liquid levels. These circumstances significantly complicate the process of oil production, especially if there are a large number of wells, due to the need to calculate and design a specific pumping unit for each of them, driven by a specific, also calculated and designed, engine. This article proposes a progressive way to solve the problem that has arisen, practically not presented in the literature before. **The purpose** of the research: to investigate the possibility and feasibility of using a universal engine for installing an electric centrifugal pump for the purpose of oil production at any type of wells that exist in the field, as well as to carry out its calculation and design. **Methods:** taking into account the results of the study and assessment of the state of the oil industry, an analysis of the functioning of a real oil field is carried out in order to determine the feasibility of using a universal engine in its wells. The parameters are calculated and the standard size of a pumping unit for oil production is selected for the subsequent design of a universal asynchronous motor. **Results:** research has confirmed that the use of a universal asynchronous motor in oil production at various wells is advisable. The use of such an engine will reduce material and financial costs for logistics, maintenance and repair of equipment used in oil production fields. **Practical significance:** based on real data from the oil and gas production shop No. 8 of Lukoil-Perm LLC, which represents well parameters and oil characteristics, the installations of an electric centrifugal pump and the corresponding parameters of asynchronous motors were calculated, and the parameters and characteristics of a universal asynchronous motor and its design was carried out in order to increase the efficiency of oil production.

Keywords: oil production, well, asynchronous motor, electrical network, installation of an electric centrifugal pump, universal electric motor.

Введение

Нефть является одним из основных источников энергии для человечества. Она используется для производства бензина, дизельного топлива, керосина, мазута и других видов топлива. Нефть добывается из скважин – цилиндрических горных выработок небольшого диаметра, но большой глубины. Из скважин на поверхность поднимается жидкость (вода или нефть) или газ. Нефть также используется в качестве сырья для производства различных продуктов, таких как пластмассы, синтетические волокна и смазочные материалы.

В настоящее время существует 2 метода нефтедобычи [1]:

- фонтанный;
- механизированный (газлифтный и насосный).

Выбор, каким методом воспользоваться, зависит от давления в пласте и глубины скважины. Также на выбор влияют другие факторы, такие как состав нефти, обводненность, напор в стволе и прочее.

Фонтанный способ добычи нефти применяется, если пластовое давление большое. Подъем нефти на поверхность осуществляется за счет энергии пласта, и используются для этого насосно-компрессионные трубы (НКТ). Данный метод используют только на начальном этапе добычи, далее необходим механизированный способ.

Газлифт – это один из механизированных методов добычи нефти. При этом методе нефть поднимается из скважины за счет энергии сжатого газа, который подается в скважину через устье с помощью компрессора. Преимущества метода: простое обслуживание, большой подъем объема нефти. Недостатки метода: необходимость строительства газопроводов и компрессорных станций.

Насосный способ добычи нефти производится с помощью насосного оборудования, которое устанавливается на скважину. Насосы могут быть двух типов: штанговые и электроцентробежные погружные насосы. Штанговый глубинный насос обеспечивает ежедневную добычу нефти с глубины до 4000 м. Состав установки: скважинный насос, штанги и трубы, которые используются для откачивания пластовых жидкостей и примесей из скважин [2]. Вместо комплекта штанг может быть использован линейный двигатель [3]. На кафедре «Электротехника и электромеханика» (ПНИПУ) имеется огромный опыт [4–6] по расчету и проектированию линейных двигателей асинхронных [5–7] и вентильных [7, 8]. Однако линейные двигатели, имея множество преимуществ по сравнению с двигателями вращательного действия, обладают рядом недостатков, ограничивающих их возможное использование. Погружные центробежные насосы могут использоваться для откачки жидкостей из скважин на большой глубине, при этом они не занимают много места на поверхности земли и могут работать в морских условиях, что делает их особенно полезными для нефтяных компаний (табл. 1) [9].

Таблица 1

Добыча нефти в нефтяных компаниях

Нефтяные компании	Скважины дающие продукцию, шт				
	Всего	Способ эксплуатации			
		Фонтан	УЭЦН	УСШН	Газлифт
Роснефть	38953	1338	31651	5336	332
Лукойл	28096	268	18845	7764	–
Сургутнефтегаз	20505	345	17428	2684	–
Татнефть	19506	12	3182	16312	–
Башнефть	14569	30	3276	11223	–
Газпром нефть	7712	179	7326	1	206
Славнефть	3713	45	3622	46	–
РуссНефть	2067	37	1710	303	–
Итого:	135121	2254	87040	43669	538

Согласно табл. 1 большая часть нефтяных скважин в России эксплуатируется с применением установок скважинных штанговых насосов (УСШН). При этом фонтанный способ используется лишь для 1,7 % скважин, а газлифт применяется крайне редко (всего в 0,4 % случаев). Наиболее распространенным способом является эксплуатация скважин с помощью погружных центробежных насосов, на долю которых приходится 64,4 % фонда скважин [10]. Прочие, менее распространенные способы добычи нефти составляют всего 1,2 % фонда. По данным «Газпром нефть» за 2015 г. 94 % нефти было извлечено с использованием установок электрического центробежного насоса (УЭЦН). Примерно 3 % добывалось фонтанным и газовым способами. Российский фонд скважин увеличился с 131343 в 2004 г. до 150770 в 2022 г., а число скважин, оснащенных УЭЦН, увеличилось с 66501 в 2004г. до 99457 в 2022 г., в то время как количество скважин со штанговыми глубинными насосами уменьшилось с 57393 в 2004 г. до 45571 в 2022 г. Доля использования УЭЦН значительно возросла с 81 % в 2019 г. до 87 % в 2020 г.

Очевидно, что, несмотря на простоту в эксплуатации и обслуживании, УСШН уже не является актуальным способом добычи нефти. Это связано с тем, что его трудно использовать в искривлённых и глубоких скважинах. Кроме того, фонд скважин с таким способом добычи сокращается из-за истощения легкодоступной нефти. Сервисное обслуживание УСШН также развито недостаточно.

Проведенный анализ показывает, что в последние годы наблюдается стремительный рост числа скважин, работающих с использованием УЭЦН. Популярность центробежных насосов обусловлена их высокой производительностью, длительным межремонтным периодом, возможностью применения в различных условиях эксплуатации и получения дебита из глубоких и неглубоких скважин.

Добыча нефти при помощи установки / электрического центробежного насоса

Установка электрического центробежного насоса (УЭЦН) имеет преимущества перед установкой штангового глубинного насоса (УШГН) и скважинной штанговой насосной установкой (сдвоенный штанговый насос), к недостаткам можно отнести [11]:

- 1) трудность в добыче большого объема нефти;
- 2) большое содержание воды, малая польза добычи нефти;
- 3) оборудование крупногабаритное.

Погружные центробежные насосы выглядят как трубы, но в их корпусе находятся многочисленные детали, которые трудно изготавливать [12]. Они приводятся в действие электрическим двигателем, который помещается внутри скважины, за счет чего их называют погружными насосами. Для подключения насоса к источнику питания используется бронированный кабель, что обеспечивает высокий уровень защиты от повреждений. В зависимости от типа двигателя, используемого в насосе, он может быть либо асинхронным, либо вентильным [13]. Оба типа двигателей имеют высокий КПД. Управление работой насоса осуществляется с помощью специальной станции управления. Существуют два типа таких станций: станции прямого запуска и станции, позволяющие регулировать скорость вращения погружного электродвигателя. Из двух указанных типов двигателей в УЭЦН целесообразнее всего использовать асинхронные двигатели классической конструкции по причине их высокой надежности, простоты конструкции, большого ресурса, малой стоимости и наличия более простой системы управления (по сравнению с вентильным двигателем) [14].

На месторождениях нефти обычно располагается множество различных скважин, имеющих разные размеры и дебит. Также добываемая нефть имеет разные характеристики: вязкость, состав, динамиче-

ский уровень жидкости (расстояние от поверхности земли до жидкости). Эти обстоятельства существенно осложняют процесс добычи нефти, особенно при наличии большого количества скважин по причине необходимости расчета и проектирования под каждую из них определенной насосной установки, приводимой в движение конкретным, также рассчитанным и спроектированным двигателем. Для решения описанной проблемы по исходным реальным данным, взятым из цеха добычи нефти и газа (ЦДНГ №8, месторождение «Баклановское»), представляющим собой параметры скважин и характеристики нефти, проведены исследования с целью расчета УЭЦН и соответствующих им параметров асинхронных двигателей. Такой способ решения описанной проблемы позволит обосновать параметры и характеристики универсального асинхронного двигателя, выполнить его расчет и проектирование [15]. Использование такого двигателя позволит снизить материальные и финансовые затраты на проведение мероприятий по логистике, обслуживанию и ремонту оборудования, используемого на месторождениях нефтедобычи.

Добыча нефти на месторождении «Баклановское»

Рассмотрим пример расчета потребной мощности двигателя, который может быть установлен на насосную насадку [16, 17], на основе реальных данных о работе скважин добычи нефти месторождения «Баклановское» (ЦДНГ № 8), полученных от одного из подразделений Лукойл-Пермь (табл. 2).

Таблица 2

Исходные данные по выбранным скважинам с месторождения

№ скважины	1	2	3	4
Диаметр скв., мм	146,8	130,6	120	127
Динамический уровень жидкости, м	1149	1258	1316	1178
Газосодержание, м ³ /т	233	230	240	237,6
Глубина спуска насоса, м	1700	1279	1501	1366
Пластовое давление, МПа	16,1	11,4	10,7	12,3
Давление насыщения, МПа	15,7	10,2	8,9	8,02
Устьевое давление, МПа	3,71	0,8	1,7	2,5
Плотность нефти, кг/м ³	812	851	926	900
Дебит по нефти, м ³ /сут	62	36	56,4	46

Расчет 1-й скважины

Необходимый напор ЭЦН можно определить из уравнения напорной характеристики [18]:

$$H_n = h_d + h_y + \Delta h_{тр} - h_r,$$

где h_d – динамический уровень жидкости в скважине; h_y – напор, затрачиваемый на создание противодействия, на устье; $\Delta h_{тр}$ – потери напора на трение при движении ГЖС в НКТ; h_r – полезная работа выделившегося из нефти газа по подъему жидкости, выраженная в метрах столба жидкости.

Динамический уровень жидкости в скважине:

$$h_d = 1149 \text{ м.}$$

Напор, затрачиваемый на создание противодействия, на устье:

$$h_y = \frac{P_y}{\rho_{\text{ГЖС НКТ}} \cdot g} = \frac{3,71 \cdot 10^6}{812 \cdot 9,81} = 466 \text{ м.}$$

Потери напора на трение при движении ГЖС в НКТ:

$$\Delta h_{тр} = \lambda \frac{L_{\text{НКТ}}}{d_{\text{НКТ}}} \cdot \frac{\omega_{\text{ГЖС НКТ}}^2}{2g},$$

где $\omega_{\text{ГЖС НКТ}}$ – скорость движения ГЖС в НКТ, м/с:

$$\omega_{\text{ГЖС НКТ}} = \frac{4Q_{\text{ж}}}{86400\pi d_{\text{НКТ}}} = \frac{4 \cdot 62}{86400 \cdot 3,14 \cdot 0,062^2} = 0,24 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Определим число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega_{\text{ГЖС НКТ}} \cdot d_{\text{НКТ}}}{\mu_{\text{н пл}}} \rho_{\text{ГЖС НКТ}} = \frac{0,24 \cdot 0,062}{0,001} 812 = 11970.$$

$11970 > Re_{кр} = 2320 \rightarrow$ режим течения турбулентный.

Поскольку режим движения жидкости турбулентный, коэффициент гидравлических сопротивлений найдем по формуле:

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{11970}} = 0,03.$$

Потери напора на трение при движении ГЖС в НКТ:

$$\Delta h_{тр} = 0,03 \frac{1700}{0,062} \cdot \frac{0,24^2}{2 \cdot 9,81} = 2,4 \text{ м.}$$

Полезная работа выделившегося из нефти газа по подъему жидкости, выраженная в метрах столба жидкости:

$$h_{\Gamma} = 4d_{\text{вн нкт}} \cdot \Gamma \left(1 - \sqrt[3]{\frac{P_y}{P_{\text{нас}}}} \right),$$

$$h_{\Gamma} = 4 \cdot 0,062 \cdot 233 \left(1 - \sqrt[3]{\frac{3,71}{15,7}} \right) = 22,06 \text{ м.}$$

Тогда требуемый напор насоса:

$$H_{\text{н}} = 1149 + 466 + 2,4 - 22,06 = 1596 \text{ м.}$$

Дебит для данной скважины 62 м³/сут.

Выберем типоразмер насоса: ЭЦН5-80-1800 (табл. 3).

Таблица 3

Паспортная характеристика ЭЦН5-80-1800

Насос	Номинальная подача, м ³ /сут	Номинальный напор, м	КПД, %	Мощность, кВт
ЭЦН5-80-1800	80	1800	51,5	31,73

Далее производим подбор привода электроцентробежного насоса.

$$N_{\text{пэд}} = N_{\text{эцн}} \eta + N_{\text{гс}} + N_{\text{гз}},$$

где $N_{\text{эцн}}$ – гидравлическая мощность ЭЦН, Вт; η – КПД насоса; $N_{\text{гс}}$ – потребляемая мощность газостабилизирующих модулей (из паспорта производителя); $N_{\text{гз}}$ – потребляемая мощность гидрозащиты (из паспорта производителя).

Гидравлическая мощность ЭЦН выбирается, исходя из развиваемого напора ЭЦН и дебита скважины по жидкости:

$$N_{\text{эцн}} = H \cdot Q = 1596 \cdot 62 = 98 \text{ кВт.}$$

Таким образом, мощность ПЭД будет следующей:

$$N_{\text{пэд}} = N_{\text{эцн}} \eta + N_{\text{гс}} + N_{\text{гз}} = 98 \cdot 0,515 + 2 + 1,5 = 54,4 \text{ кВт.}$$

Следовательно, исходя из данных параметров, с учетом небольшого запаса, следует выбрать мощность двигателя 56 кВт.

Расчет остальных скважин

Расчет остальных скважин производится аналогично расчету 1-й скважины. Результаты расчета приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчета скважин месторождения «Баклановское»

№ скважины	1	2	3	4
h_y – напор, затрачиваемый на создание противодавления, на устье, м	466	95,9	187,3	283,4
$\Delta h_{тр}$ – потери напора на трение при движении ГЖС в НКТ, м	2,4	0,206	1,73	1,109
$\omega_{гжс нкт}$ – скорость движения ГЖС в НКТ, м/с	0,24	0,069	0,216	0,176
Число Рейнольдса	11970	3661	12410	9840
Режим течения	Турбулентный			
λ – коэффициент гидравлических сопротивлений, о.е.	0,03	0,041	0,03	0,032
h_r – полезная работа выделившегося из нефти газа по подъему жидкости, выраженная в метрах столба жидкости, м	22,06	11,745	25,2	18,971
H_n – необходимый напор ЭЦН можно определить из уравнения напорной характеристики, м	1596	1322	1480	1444
Типоразмер насоса	ЭЦН5-80-1800	ЭЦН5-60-1350	ЭЦН5-60-1500	ЭЦН5-60-1500
Паспортная характеристика насоса				
Номинальная подача, м ³ /сут	80	60	60	60
Номинальный напор, м	1800	1360	1535	1535
КПД, %	51,5	44	44	44
Мощность, кВт	31,73	21,16	21,16	23,97
$N_{эцн}$ – гидравлическая мощность ЭЦН, кВт	98	18,64	83,5	
Мощность привода электроцентробежного насоса, кВт	54,4	24,4	40	66,4
Мощность выбранного двигателя с учетом запаса, кВт	56	25	40	32

Согласно табл. 4, возникает потребность подбора для каждой скважины своего типоразмера насоса и соответственно своего асинхронного двигателя, что подтверждается дальнейшими исследованиями [19].

Расчет электродвигателя для нефтедобычи

Погружные электродвигатели, используемые для привода центробежных насосов, обычно являются маслозаполненными асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором. Диаметр двигателя зависит от внутреннего диаметра эксплуатационной колонны и составляет от 96 до 130 мм.

Мощность, ток и рабочее напряжение зависят от их типоразмера. В наши дни производятся электродвигатели мощностью 8–500 кВт, током 18–180 А и напряжением 300–3600 В. Двигатели, которые имеют маленький диаметр и большую мощность, имеют также большую длину, которая может достигать 20 м.

Как отмечалось, асинхронный погружной электродвигатель (ПЭД) как один из представителей асинхронных двигателей классической конструкции – это наиболее распространенный тип двигателя для привода ЭЦН, несмотря на то, что он не может развивать высокие обороты по сравнению с вентильными двигателями [20]. Однако ПЭД также доказал свою надежность и доступность в широком диапазоне мощностей, габаритов и исполнений [21]. Такие двигатели обладают простотой в эксплуатации и низкой стоимостью производства.

От технического уровня, качества изготовления, надежности и правильной эксплуатации электродвигателя зависит долговечность работы установки. В настоящее время существуют различные типы ПЭД, которые могут работать в пластовых жидкостях с различной рабочей температурой, и теплостойкость является одним из основных параметров для эксплуатирующего персонала. Это влияет на режим работы ПЭД, проведение тепловых обработок и вывод скважины на режим.

В процессе исследований получены 4 типоразмера насоса, и для каждого из них подобран ПЭД по необходимой мощности. Для каждой мощности рассчитаны параметры асинхронного двигателя: параметры статора и ротора, потери, рабочие характеристики и т.д.

По полученным данным проводится сравнительный анализ всех показателей с целью определения первичной информации для расчета универсального асинхронного двигателя, который целесообразно использовать для добычи нефти из всех типов скважин [22].

Расчет асинхронного двигателя мощностью 25 кВт

Техническое задание:

- мощность 25 кВт;
- синхронная скорость вращения 1500 об/мин;
- линейное напряжение 380 В;
- частота 50 Гц;
- число пар полюсов $2p = 4$;
- число фаз $m = 3$.

Конструктивное исполнение IM1001, исполнение по способу защиты IP44, способ охлаждения IC0141, климатическое исполнение и категория размещения Y3, класс нагревостойкости F.

Последовательность расчета [14, 23]:

1. Выбор главных размеров.
2. Расчет параметров статора.
3. Расчет размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора.
4. Расчет ротора.
5. Расчет магнитной цепи.
6. Параметры рабочего режима.
7. Расчет потерь.
8. Расчет рабочих характеристик.

Рассчитываем рабочие характеристики для скольжения $s = 0; 0,0004; 0,0008; 0,0012; 0,0016; 0,002; 0,0024$; принимая предварительно, что $S_{ном} = 0,022$. Результаты расчета сведены в табл. 5 [24].

Расчетные формулы:

$$R_{2\text{сост}} = a_s \frac{r_{2\text{нп}}}{s} \text{ (Ом)},$$

$$X_{2\text{сост}} = b_s \frac{r_{2\text{нп}}}{s} \text{ (Ом)},$$

$$R = a + R_{2\text{сост}} \text{ (Ом)},$$

$$X = b + X_{2\text{сост}} \text{ (Ом)},$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \text{ (Ом)},$$

$$I_{2\text{рас}} = \frac{U_{1\text{ном}}}{Z} \text{ (А)},$$

$$\cos\varphi_{2s} = \frac{R}{Z}, \sin\varphi_{2s} = \frac{X}{Z},$$

$$I_{1a} = I_{0a} + I_{2\text{рас}} \cdot \cos\varphi_{2s} \text{ (А)},$$

$$I_{1p} = I_{0p} + I_{2\text{рас}} \cdot \sin\varphi_{2s} \text{ (А)},$$

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2} \text{ (А)},$$

$$I_{2s} = c_1 \cdot I_{2\text{рас}} \text{ (А)},$$

$$P_{1рас} = 3U_{1ном} \cdot I_{1а} \text{ (Вт)},$$

$$P_{\text{э}1} = 3I_1^2 \cdot r_1 \text{ (Вт)},$$

$$P_{\text{э}2} = 3I_{2с}^2 \cdot r_{1пр} \text{ (Вт)},$$

$$P_{\text{доб}} = 0,005P_{1рас} \text{ (Вт)},$$

$$\Sigma P = P + P_{\text{э}2} + P_{\text{э}1} + P_{\text{доб}} \text{ (Вт)},$$

$$P_{2рас} = P_{1рас} - \Sigma P \text{ (Вт)},$$

$$\eta_{рас} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_{1рас}}, \cos\varphi = \frac{I_{1а}}{I_1}.$$

Таблица 5

Результаты расчета рабочих характеристик

Расчи- танные значения	Раз- мер- ность	0	Скольжение						
			0,0004	0,0008	0,0012	0,0016	0,002	0,0024	$S_{ном} = 0,022$
$R_{2сост}$	Ом	0	271,88	135,94	90,63	67,97	54,38	45,31	4,94
R	Ом	0	272,04	136,10	90,78	68,13	54,53	45,47	5,10
X	Ом	0	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
Z	Ом	0	272,04	136,10	90,79	68,14	54,55	45,49	5,23
$I_{2рас}$	А	0	0,81	1,61	2,42	3,22	4,02	4,82	41,95
$\cos\varphi_{2с}$	–	0	1	1	1	1	1	1	1
$\sin\varphi_{2с}$	–	0	0,004	0,008	0,013	0,017	0,021	0,025	0,220
$I_{1а}$	А	0	1,58	2,39	3,19	4,00	4,80	5,60	41,70
$I_{1р}$	А	0	12,75	12,76	12,78	12,80	12,83	12,87	21,98
I_1	А	12,8	12,85	12,98	13,17	13,41	13,70	14,03	47,14
$I_{2с}$	А	0	0,83	1,66	2,49	3,32	4,14	4,97	43,22
$P_{1рас}$	кВт	0	1041	1572	2101	2630	3157	3684	27445
$P_{\text{э}1}$	кВт	0	76,0	77,6	79,9	82,8	86,4	90,7	1023,4
$P_{\text{э}2}$	кВт	0	0,21	0,85	1,91	3,38	5,28	7,59	574,18
$P_{\text{доб}}$	кВт	0	5,21	7,86	10,50	13,15	15,79	18,42	137,22
ΣP	кВт	0	600,5	605,4	611,4	618,5	626,6	635,8	2253,9
$P_{2рас}$	кВт	0	440,8	966,1	1489,5	2011,1	2530	3048,4	25190
$\eta_{рас}$	о.е.	0	0,42	0,61	0,71	0,76	0,80	0,83	0,92
$\cos\varphi$	о.е.	0,11	0,12	0,18	0,24	0,30	0,35	0,40	0,88

Рабочие характеристики АД построены по данным табл. 5 и приведены на рис. 1 и 2.

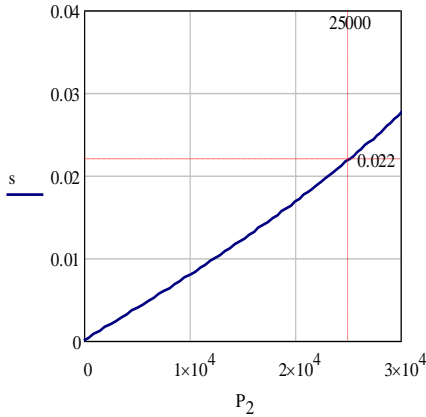


Рис. 1. Зависимость скольжения от мощности двигателя

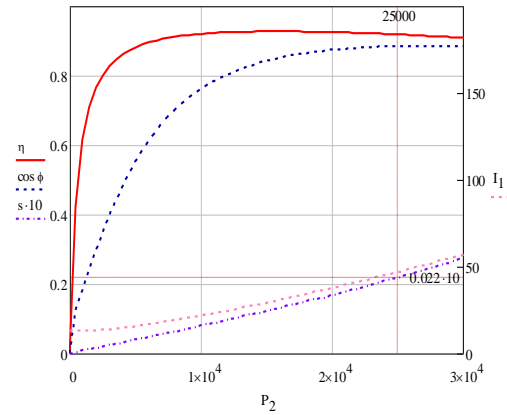


Рис. 2. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Расчет асинхронного двигателя мощностью 32 кВт

Техническое задание расчета асинхронного двигателя мощностью $P_{2\text{ном}} = 32$ кВт соответствует заданию на расчет двигателя мощностью 25 кВт.

Вычисления происходят аналогично расчету с мощностью 25 кВт. Поэтому рассчитываем рабочие характеристики для скольжения $s = 0; 0,0004; 0,0008; 0,0012; 0,0016; 0,002; 0,0024$; принимая предварительно, что $S_{\text{ном}} = 0,016$.

Рабочие характеристики АД приведены на рис. 3 и 4.

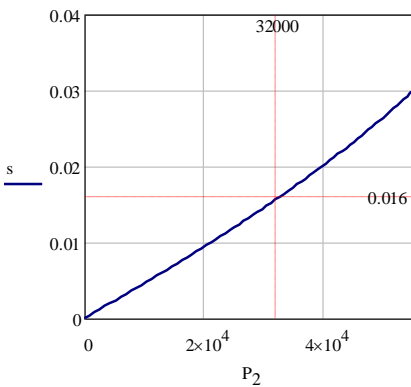


Рис. 3. Зависимость скольжения от мощности двигателя

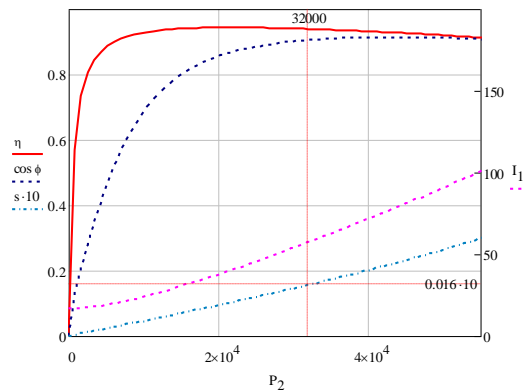


Рис. 4. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Расчет асинхронного двигателя мощностью 40 кВт

Техническое задание расчета асинхронного двигателя мощностью $P_{2ном} = 40$ кВт соответствует заданию на расчет двигателя мощностью 25 кВт.

Вычисления происходят аналогично расчету с мощностью 25 кВт. Поэтому рассчитываем рабочие характеристики для скольжения $s = 0; 0,0004; 0,0008; 0,0012; 0,0016; 0,002; 0,0024$; принимая предварительно, что $S_{ном} = 0,017$.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя приведены на рис. 5 и 6.

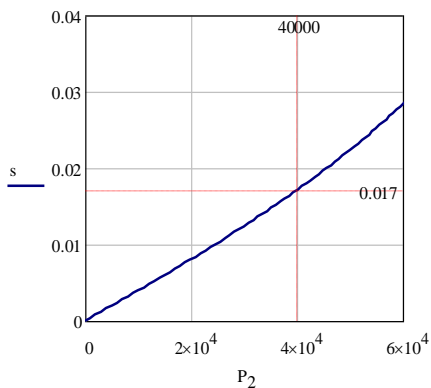


Рис. 5. Зависимость скольжения от мощности двигателя

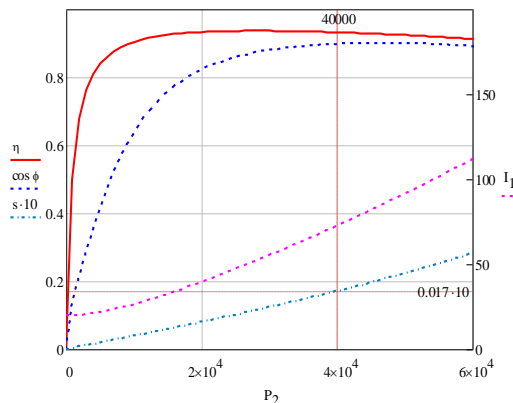


Рис. 6. Рабочие характеристики асинхронного двигателя мощностью

Расчет асинхронного двигателя мощностью 56 кВт

Техническое задание расчета асинхронного двигателя мощностью $P_{2ном} = 56$ кВт соответствует заданию на расчет двигателя мощностью 25 кВт.

Вычисления происходят аналогично расчету с мощностью 25 кВт. Поэтому сразу рассчитываем рабочие характеристики для скольжения $s = 0; 0,0004; 0,0008; 0,0012; 0,0016; 0,002; 0,0024$; принимая предварительно, что $S_{ном} = 0,016$.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя приведены на рис. 7, 8.

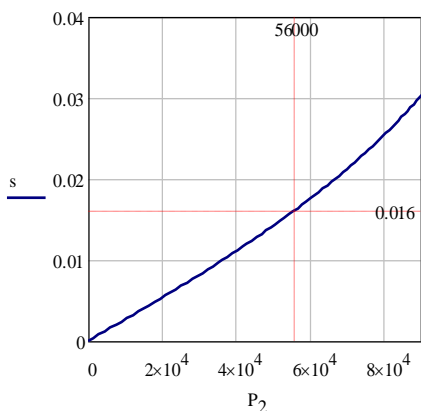


Рис. 7. Зависимость скольжения от мощности двигателя

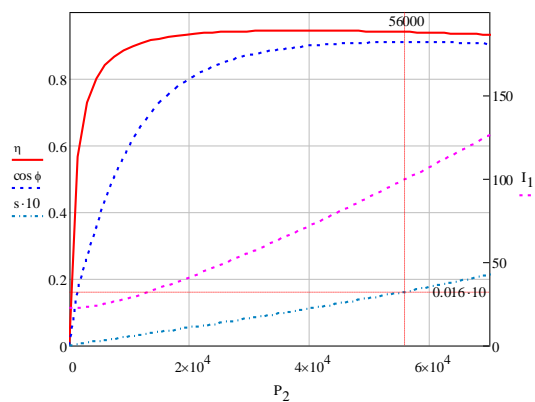


Рис. 8. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Анализ эксплуатационных характеристик АД, которые были рассчитаны для соответствующих скважин, позволяют сделать вывод о целесообразности проектирования универсального АД.

Параметры технического задания на проектирование такого двигателя задаются характеристиками УЭЦН.

Характеристики АД позволяют определиться с методикой расчета универсального АД с КЗ ротором, который будет произведен далее.

Расчет мощности универсального двигателя по усредненным данным с месторождения «Баклановское»

В табл. 2 выбраны усредненные данные со всех скважин.

Проведя анализ таблицы, целесообразно выбрать минимальный диаметр скважины, чтобы диаметр двигателя был также минимальным, чтобы можно было использовать его для любой по диаметру скважину на месторождении.

Остальные данные следует взять максимальными (см. табл. 2, отмечено цветом).

Расчет потребной мощности двигателя аналогичен расчету скважины № 1.

Результат расчета представлен в табл. 6.

Таблица 6

Результаты расчета потребной мощности универсального двигателя

Параметр	Значение
h_y – напор, затрачиваемый на создание противодавления, на устье, м	420,635
$\Delta h_{тр}$ – потери напора на трение при движении ГЖС в НКТ, м	2,327
$\omega_{ГЖС\ НКТ}$ – скорость движения ГЖС в НКТ, м/с	0,24
Число Рейнольдса	13260
Режим течения	Турбулентный
λ – коэффициент гидравлических сопротивлений, о.е.	0,03
h_r – полезная работа выделившегося из нефти газа по подъему жидкости, выраженная в метрах столба жидкости, м	22,722
H_n – Необходимый (требуемый) напор ЭЦН можно определить из уравнения напорной характеристики, м	1717
Типоразмер насоса	ЭЦН5-80-1800
Паспортная характеристика насоса:	
Номинальная подача, м ³ /сут	80
Номинальный напор, м	1800
КПД, %	51,5
Мощность, кВт	31,73
$N_{эцн}$ – гидравлическая мощность ЭЦН, кВт	106
$N_{пед}$ – мощность привода электроцентробежного насоса, кВт	58,3
Мощность выбранного двигателя с учетом запаса, кВт	63

Расчет универсального асинхронного двигателя мощностью 63 кВт

Техническое задание расчета асинхронного двигателя мощностью $P_{2ном} = 63$ кВт соответствует заданию на расчет двигателя мощностью 25 кВт.

Вычисления происходят аналогично расчету с мощностью 25 кВт. Поэтому рассчитываем рабочие характеристики для скольжения $s = 0; 0,0004; 0,0008; 0,0012; 0,0016; 0,002; 0,0024$; принимая предварительно, что $S_{ном} = 0,0195$.

Результаты сведены в табл. 7.

Таблица 7

Результаты расчета рабочих характеристик

Расчетные значения	Размерность	Скольжение							
		0	0,0004	0,0008	0,0012	0,0016	0,002	0,0024	$S_{ном}=0,0195$
$R_{2сост}$	Ом	0	101,72	50,86	33,91	25,43	20,34	16,95	2,09
R	Ом	0	101,76	50,90	33,95	25,47	20,38	16,99	2,13
X	Ом	0	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Z	Ом	0	101,76	50,90	33,95	25,47	20,39	17,00	2,15
$I_{2рас}$	А	0	2,16	4,31	6,46	8,61	10,76	12,91	101,89
$\cos \varphi_{2s}$	-	0	1	1	1	1	1	1	1
$\sin \varphi_{2s}$	-	0	0,0034	0,0068	0,0102	0,0136	0,017	0,0203	0,1603
I_{1a}	А	0	3,85	6,00	8,15	10,30	12,45	14,60	102,26
$I_{1р}$	А	0	27,67	27,69	27,73	27,78	27,84	27,92	44,00
I_1	А	27,8	27,93	28,33	28,90	29,63	30,50	31,51	111,32
I_{2s}	А	0	2,19	4,39	6,58	8,77	10,95	13,14	103,71
$P_{1рас}$	кВт	0	2,53	3,94	5,36	6,78	8,195	9,6	67,21
$P_{\Sigma 1}$	кВт	0	89,32	91,89	95,61	100,48	106,5	113,64	1418,7
$P_{\Sigma 2}$	кВт	0	0,57	2,27	5,10	9,06	14,14	20,34	1267,2
$P_{доб}$	кВт	0	12,66	19,75	26,83	33,90	40,97	48,03	336,53
ΣP	кВт	0	1,28	1,29	1,90	1,33	1,34	1,36	4,20
$P_{2рас}$	кВт	0	1,23	2,65	4,06	5,45	6,85	8,24	63,10
$\eta_{рас}$	-	0	0,49	0,67	0,76	0,80	0,84	0,86	0,94
$\cos \varphi$	-	0,11	0,14	0,21	0,28	0,35	0,41	0,46	0,92

Рабочие характеристики АД, построенные по данным табл. 7, приведены на рис. 9 и 10.

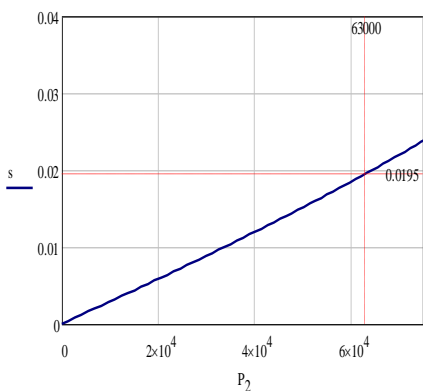


Рис. 9. Зависимость скольжения от мощности двигателя

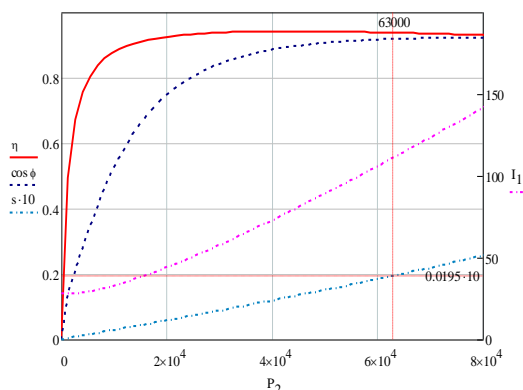


Рис. 10. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Проектирование универсального асинхронного двигателя мощностью 63 кВт

Согласно расчету универсального двигателя, результаты которого представлены в табл. 7, в табл. 8 отражены геометрические размеры статора и ротора проектируемого двигателя.

Таблица 8

Геометрические параметры статора и ротора

Название параметра	Величина параметра
Статор	
Внешний диаметр статора	110
Внутренний диаметр статора	72
Высота паза сердечника статора	9,9
Размер от дна паза до клиновой части	9
Большой размер паза статора	5,1
Меньший размер паза статора	3,5
Ширина шлица паза	2,4
Высота шлица паза	0,37
Число пазов статора	36
Ротор	
Внешний диаметр ротора	70
Внутренний диаметр ротора	25
Высота паза ротора	20
Размер паза	15
Большой размер паза ротора	3,9
Меньший размер паза ротора	1,25
Ширина шлица паза	1
Число пазов ротора	26

В ходе расчетов АД с КЗ ротором были получены размеры статора и ротора, спроектированные листы представлены на рис. 11 и 12.

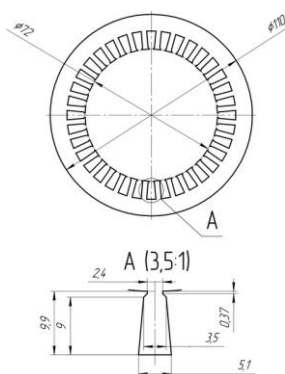


Рис. 11. Лист статора универсального АД

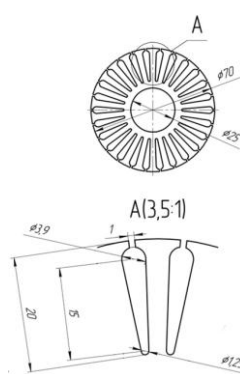


Рис. 12. Лист ротора универсального АД

Заключение

В ходе проведенного исследования выполнен обзор предметной области в нефтедобывающей отрасли. Выявлено, что механизированный способ добычи нефти позволяет значительно увеличить, при равных прочих условиях, объем добываемой жидкости. Анализ различных механизированных способов добычи нефти позволил обосновать рациональность использования центробежного насоса.

Предложен подход, позволяющий производить расчет и проектирование универсального асинхронного двигателя для УЭЦН по данным о значениях параметров скважин и характеристиках нефти.

Результаты исследований на основе данных с реальных нефтяных месторождений ЦДНГ № 8 нефтедобывающей промышленности, представленные в данной статье, подтверждают возможность и целесообразность использования универсального двигателя для УЭЦН.

Полученные результаты позволяют повысить качество работы в нефтедобывающей промышленности, поскольку использование универсального двигателя позволит уменьшить затраты на логистику, техническое обслуживание, ремонт и диагностику.

Библиографический список

1. Современные технологии интенсификации добычи высоковязкой нефти и оценка эффективности их применения: учеб. пособие / Д.Г. Антониади [и др.] – М., Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. – 420 с.
2. Штанговая насосная установка: пат. 2620183 РФ: МПК F04B47/02 / К.Р. Уразаков, И.А. Мухин, Р.Н. Бахтизин, А.Г. Комков; патентообладатель ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»; опубл. 23.05.2017.
3. Цилиндрический линейный вентильный двигатель для добычи нефти бесштанговым методом / К.А. Конев, А.О. Фурина, А.Д. Коротаев, Е.А. Чабанов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2021. – № 39. – С. 150–168. DOI: 10.15593/2224-9397/2021.3.08
4. Опыт разработки линейных электродвигателей в ПНИПУ / Е.А. Чабанов, Д.А. Опарин, А.Д. Коротаев [и др.] // Электротехнические комплексы и системы: материалы I Всерос. конф. по электрическим машинам в рамках Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 т.; Уфа,

15–16 декабря 2022 г. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий», 2022. – Т. 2. – С. 544–532.

5. Расчет характеристик двухиндукторного линейного асинхронного двигателя / Е.А. Чабанов, А.Д. Коротаев, Д.А. Опарин [и др.] // *Электротехника*. – 2022. – № 11. – С. 18–22. – DOI: 10.53891/00135860_2022_11_18

Calculation of the Characteristics of a Two-Inductor Linear-Induction Motor (Asynchronous Motor) / E.A. Chabanov, A.D. Korotaev, D.A. Oparin, A.L. Pogudin, P.V. Kuleshov // *Russian Electrical Engineering*. – 2022. – Vol. 93, no. 11. – P. 697–701. DOI: 10.3103/S1068371222110037

6. Коротаев А.Д., Чабанов Е.А., Опарин Д.А. Расчет магнитного поля в боковых зонах линейного асинхронного двигателя с учетом влияния лобовых частей обмотки индуктора // *Электротехника*. – 2022. – № 11. – С. 28–32. DOI: 10.53891/00135860_2022_11_28

Calculation of the Magnetic Field in the Side Zones of a Linear Asynchronous Motor Taking into Account the Influence of the Frontal Parts of the Inductor Winding / A.D. Korotaev, E.A. Chabanov, D.A. Oparin // *Russian Electrical Engineering*. – 2022. – Vol. 93, no. 11. – P. 708–711. DOI: 10.3103/S1068371222110074

7. 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.

8. Chirkov D.A., Korotayev A.D., Chabanov E.A. Improving the efficiency of an electric drive with a cylindrical linear alternating current electronic engine // *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. – 2022. – Vol. 13, no. 1. – P. 58–67. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i1.pp58-67

9. Фисенко В.Н. Жизненный цикл погружных центробежных насосов в водозаборных скважинах // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2017. – № 7. – С. 54–63.

10. Хабибуллин М.Я. Исследование влияния режимных параметров работы центробежного погружного насоса на его надежность //

Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2018. – № 2. – С. 57–59.

11. Молчанов А.Г. Гидроприводные штанговые скважинные насосные установки. – М.: Недра, 1982. – 245 с.

12. Хабибуллин М.Я. Установки для добычи нефти с погружными двигателями. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. – 105 с.

13. Бурмакин А.М. Низкоскоростной дугостаторный асинхронный двигатель для станков-качалок малodeбитных нефтяных скважин: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.09.01. – Екатеринбург, 2011. – 22 с.

14. Системы управления электроцентробежными насосами [Электронный ресурс]. – URL: https://studref.com/403413/tehnika/sistemy_upravleniya_elektrotsentrobezhnymi_nasosami (дата обращения: 20.11.2023).

15. Погружные асинхронные электрические двигатели с улучшенными эксплуатационными характеристиками / Е.Ф. Беляев, П.Н. Цылев, И.Н. Щапова, В.А. Щапов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т. 15, № 18. – С. 71–79. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.18.8

16. Мищенко И.Т. Расчёты при добыче нефти и газа. – М.: Нефть и газ, 2008. – 296 с.

17. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти. – М.: Нефть и газ, 2015. – 816 с.

18. Боловин Е.В., Глазырин А.С. Метод идентификации параметров погружных асинхронных электродвигателей установок электроприводных центробежных насосов для добычи нефти // Известия Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328, № 1. – С. 123–131.

19. Кацман М.М. Электрические машины. Справочник: учеб. пособие. – М.: КноРус, 2020. – 479 с.

20. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2008. – 350 с.

21. Погружной электродвигатель ПЭД схема принцип работы [Электронный ресурс]. – URL: <https://remnabor.net/pogruzhnoy-elektrodvigatel-ped-shema-printsip-raboty> (дата обращения: 20.11.2023).

22. Конструкция и расчет трехфазных асинхронных электродвигателей: учеб. пособие / В.А. Потапкин, Р.В. Ротыч, Г.А. Назикян, В.И. Рожков. – Новочеркасск, 2009. – 171 с.

23. Проектирование электрических машин: учеб для вузов / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2005. – 767 с.

24. Соловьев В.А. Расчет характеристик трехфазного асинхронного двигателя: методические указания к самостоятельной работе студентов по дисциплинам «Электротехника и электроника», «Основы привода». – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 44 с.

References

1. Antoniadi D.G. et al. *Sovremennye tekhnologii intensivifikatsii dobychi vysokoviazkoi nefi i otsenka effektivnosti ikh primeneniia* [Modern technologies for intensifying the production of high-viscosity oil and assessing the effectiveness of their application]. Moscow, Vologda: Infra-Inzheneriia, 2019, 420 p.

2. Urazakov K.R., Mukhin I.A., Bakhtizin R.N., Komkov A.G. *Shtangovaia nasosnaia ustanovka* [Rod pumping unit]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2620183 (2017).

3. Konev K.A., Furina A.O., Korotaev A.D., Chabanov E.A. *Tsilindricheskii lineinyi ventil'nyi dvigatel' dlia dobychi nefi besshtangovym metodom* [Cylindrical linear valve motor for oil production using the rodless method]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2021, no. 39, pp. 150-168. DOI: 10.15593/2224-9397/2021.3.08

4. Chabanov E.A., Oparin D.A., Korotaev A.D. et al. *Opyt razrabotki lineinykh elektrodvigatelei v PNIPU* [Experience in the development of linear electric motors at PNRPU]. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy: materialy I Vserossiiskaia konferentsiia po elektricheskim mashinam v ramkakh Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii; Ufa, 15-16 December 2022*. Ufa: Ufimskii universitet nauki i tekhnologii, 2022, vol. 2, pp. 544-532.

5. Chabanov E.A., Korotaev A.D., Oparin D.A. et al. *Raschet kharakteristik dvukhinduktornogo lineinogo asinkhronnogo dvigatel'ia* [Calculation of the characteristics of a two-inductor linear asynchronous

motor]. *Elektrotehnika*, 2022, no. 11, pp. 18-22. DOI: 10.53891/00135860_2022_11_18

6. Chabanov E.A., Korotaev A.D., Oparin D.A., Pogudin A.L., Kuleshov P.V. Calculation of the Characteristics of a Two-Inductor Linear-Induction Motor (Asynchronous Motor). *Russian Electrical Engineering*, 2022, vol. 93, no. 11, pp. 697-701. DOI: 10.3103/S1068371222110037

7. Korotaev A.D., Chabanov E.A., Oparin D.A. Raschet magnitnogo polia v bokovykh zonakh lineinogo asinkhronnogo dvigatel'ia s uchetom vliianiia lobovykh chastei obmotki induktora [Calculation of the magnetic field in the side zones of a linear asynchronous motor taking into account the influence of the frontal parts of the inductor winding]. *Elektrotehnika*, 2022, no. 11, pp. 28-32. DOI: 10.53891/00135860_2022_11_28

8. Korotaev A.D., Chabanov E.A., Oparin D.A. Calculation of the Magnetic Field in the Side Zones of a Linear Asynchronous Motor Taking into Account the Influence of the Frontal Parts of the Inductor Winding. *Russian Electrical Engineering*, 2022, vol. 93, no. 11, pp. 708-711. DOI: 10.3103/S1068371222110074

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

10. Chirkov D.A., Korotayev A.D., Chabanov E.A. Improving the efficiency of an electric drive with a cylindrical linear alternating current electronic engine. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 2022, vol. 13, no. 1, pp. 58-67. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i1.pp58-67

11. Fisenko V.N. Zhiznennyi tsikl pogruchnykh tsentrobezhnykh nasosov v vodozabornykh skvazhinakh [Life cycle of submersible centrifugal pumps in water wells]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaia tekhnika*, 2017, no. 7, pp. 54-63.

12. Khabibullin M.Ia. Issledovanie vliianiia rezhimnykh parametrov raboty tsentrobezhnogo pogruchnogo nasosa na ego nadezhnost' [Study of the influence of operating parameters of a centrifugal submersible pump on its reliability]. *Oborudovanie i tekhnologii dlia neftegazovogo kompleksa*, 2018, no. 2, pp. 57-59.

13. Molchanov A.G. Gidroprivodnye shtangovye skvazhinnye nasosnye ustanovki [Hydraulic rod well pumping units]. Moscow: Nedra, 1982, 245 p.

14. Khabibullin M.Ia. Ustanovki dlia dobychi nefi s pogruzhnymi dvigateliami [Installations for oil production with submersible motors]. Ufa: Ufimskii gosudarstvennyi nefianoi tekhnicheskii universitet, 2018, 105 p.

15. Burmakin A.M. Nizkoskorostnoi dugostatorni asinkhronnyi dvigatel' dlia stankov-kachalok malodebitnykh nefianykh skvazhin [Low-speed arc motor asynchronous motor for pumping machines of low-yield oil wells]. Ph. D. thesis. Ekaterinburg, 2011, 22 p.

16. Sistemy upravleniia elektrotsentrobezhnymi nasosami [Control systems for electric centrifugal pumps], available at: https://studref.com/403413/tehnika/sistemy_upravleniya_elektrotsentrobezhnymi_nasosami (accessed 20 November 2023).

17. Beliaev E.F., Tsylev P.N., Shchapova I.N., Shchapov V.A. Pogruzhnye asinkhronnye elektricheskie dvigateli s uluchshennymi ekspluatatsionnymi kharakteristikami [Submersible asynchronous electric motors with improved performance characteristics]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*, 2016, vol. 15, no. 18, pp. 71-79. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.18.8

18. Mishchenko I.T. Raschety pri dobyche nefi i gaza [Calculations for oil and gas production]. Moscow: Neft' i gaz, 2008, 296 p.

19. Mishchenko I.T. Skvazhinnaia dobycha nefi [Borehole oil production]. Moscow: Neft' i gaz, 2015, 816 p.

20. Bolovin E.V., Glazyrin A.S. Metod identifikatsii parametrov pogruzhnykh asinkhronnykh elektrodvigatelei ustanovok elektroprivodnykh tsentrobezhnykh nasosov dlia dobychi nefi [Method for identifying the parameters of submersible asynchronous electric motors for installations of electric centrifugal pumps for oil production]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 123-131.

21. Katsman M.M. Elektricheskie mashiny [Electrical engines]. Moscow: KnoRus, 2020, 479 p.

22. Vol'dek A.I., Popov V.V. Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka [Electrical engines. AC engines]. Saint Petersburg: Piter, 2008, 350 p.

23. Pogruzhnoi elektrodvigatel' PED skhema printsip raboty [raboty [Submersible electric motor SEM: diagram, operating principle], available at: <https://remnabor.net/pogruzhnoy-elektrodvigatel-ped-shema-printsip-raboty> (accessed 20 November 2023).

24. Potapkin V.A., Rotych R.V., Nazikian G.A., Rozhkov V.I. Konstruktsiia i raschet trekhfaznykh asinkhronnykh elektrodvigatelei [Design and calculation of three-phase asynchronous electric motors]. Novocherkassk, 2009, 171 p.

25. Kopylov I.P., Klovov B.K., Morozkin V.P., Tokarev B.F. Proektirovanie elektricheskikh mashin [Design of electrical machines]. Ed. I.P. Kopylov. 4th ed. Moscow: Vysshaya shkola, 2005, 767 p.

26. Solov'ev V.A. Raschet kharakteristik trekhfaznogo asinkhronnogo dvigatel'ia: metodicheskie ukazaniia k samostoiatel'noi rabote studentov po distsiplinam "Elektrotehnika i elektronika", "Osnovy privoda" [Calculation of the characteristics of a three-phase asynchronous motor]. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni N.E. Baumana, 2014, 44 p.

Сведения об авторах

Заборовцева Марина Алексеевна (Пермь, Российская Федерация) – инженер-технолог, Пермская научно-производственная приборостроительная компания (614 007, Пермь, ул. 25 Октября, 106, e-mail: kolpma@yandex.ru).

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

Чабанова Евгения Владимировна (Пермь, Российская Федерация) – кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры «Автомобили и технологические машины» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: jentosina@yandex.ru).

Конев Константин Андреевич (Пермь, Российская Федерация) – аспирант Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр-кт, 29); ведущий инженер-энергетик ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ (614068, Пермь, ул. Ленина, 62, e-mail: looking_99@mail.ru).

About the authors

Marina A. Zaborovtseva (Perm, Russian Federation) – process engineer, PJSC “Perm Research and Production Instrument-Making Company” (614007, Perm, 25 Oktyabrya str., 106, e-mail: kolpma@yandex.ru).

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

Evgeniia V. Chabanova (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Automobiles and Technological Machines Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: jentosina@yandex.ru).

Konstantin A. Konev (Perm, Russian Federation) – Graduate Student of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr.); leading power engineer of LUKOIL-PERM (614068, Perm, Lenina str. 62, e-mail: looking_99@mail.ru).

Поступила: 29.11.2023. Одобрена: 06.12.2023. Принята к публикации: 10.12.2023.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Расчет и проектирование универсального двигателя для установки электроцентробежного насоса с целью добычи нефти / М.А. Заборовцева, Е.А. Чабанов, Е.В. Чабанова, К.А. Конев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2023. – № 48. – С. 127–152. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.4.06

Please cite this article in English as:

Zaborovtseva M.A., Chabanov E.A., Chabanova E.V., Konev K.A. Calculation and design of a universal engine for installing an electric centrifugal pump for oil production. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2023, no. 48, pp. 127-152. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.4.06