

## ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ СКВАЖИННЫХ ШТАНГОВЫХ НАСОСОВ

Механизированная добыча нефти связана со значительным потреблением электроэнергии, при этом основными потребителями являются электроприводы скважинных насосов. В связи с нестабильностью цен на нефть добывающие предприятия вынуждены искать пути снижения затрат электроэнергии и повышения энергетической эффективности работы приводов скважинных насосов. В статье сделан анализ установки скважинного штангового насоса с точки зрения энергоэффективности, а также рассмотрено влияние на характеристики электродвигателя циклически изменяющейся нагрузки. В силу особенностей режима работы электродвигатель большую часть времени остается недогруженным, из-за чего ухудшаются его КПД и коэффициент мощности. Благодаря конструктивным особенностям установок скважинных штанговых насосов нагрузка на вал электродвигателя меняется внутри каждого цикла качания, соответственно изменяются также все его параметры. Поэтому для расчетов необходимо определить средние значения эффективной мощности, КПД и коэффициента мощности за цикл качания. Также потери в установках скважинных штанговых насосов зависят от степени уравновешенности противовесов. Если коэффициент неуравновешенности установки лежит в пределах от минус 5 до 5%, то потери мощности от несбалансированности можно не учитывать. При больших значениях коэффициента неуравновешенности потери мощности определяются по специальной зависимости и учитываются в общей мощности, потребляемой насосной установкой. В статье авторами предложена методика, позволяющая определить энергетические характеристики электропривода установки скважинного штангового насоса в условиях циклически изменяющейся нагрузки и недостаточной уравновешенности. Предложены аналитические зависимости, для определения эксплуатационных значений КПД и коэффициента мощности  $\cos\varphi$  при циклическом нагружении. При помощи данных расчетов могут быть оптимизированы режимы работы электроприводов насосных установок, что позволит снизить удельное потребление электроэнергии при насосной добыче нефти и уменьшить затраты нефтедобывающих предприятий на приобретение электроэнергии.

**Ключевые слова:** нефтяная скважина, насос, электропривод, асинхронный электродвигатель, станок-качалка, потребление электроэнергии, энергетическая эффективность, эффективная мощность, циклическая нагрузка, коэффициент неуравновешенности, ваттметр-программа.

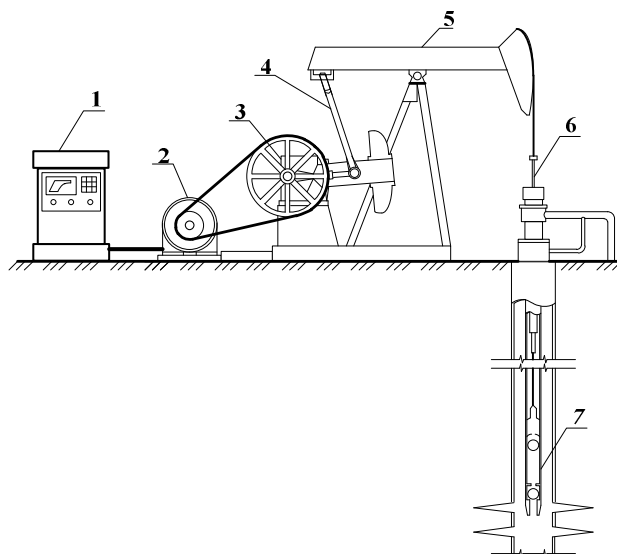
### ВВЕДЕНИЕ

Использование скважинных штанговых насосов (СШН) является одним из основных способов механизированной добычи нефти. В нашей стране установками СШН оснащено около 40% скважин, которые обеспечивают до 20% всей добываемой нефти [1]. На месторождениях США и Канады использование СШН является доминирующим способом эксплуатации нефтедобывающих скважин [2].

Хотя в последние годы доля использования СШН при добыче нефти снижается, уступая место более производительным погружным электроцентробежным насосам, данный способ эксплуатации будет еще долго применяться благодаря таким достоинствам, как более высокий КПД насосной установки в целом, меньшие удельные затраты электроэнергии на добычу скважинного флюида, использование для привода электродвигателей (ЭД) в общепромышленном исполнении, а также возможность применения в осложненных условиях – в пескопроявляющих скважинах, при наличии в добываемой нефти парафина, при высоком газовом факторе, при откачке коррозионной жидкости [3].

### СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УСТАНОВКИ СШН

Упрощенная схема установки СШН приведена на рис. 1. Весь комплекс оборудования состоит из поверхностной и погружной подсистем. Поверхностная подсистема включает в себя станцию управления 1, ЭД 2, редуктор 3, кривошипно-шатунный механизм 4; балансир 5. Погружная подсистема состоит из колонны штанг 6 и СШН 7.



**Рис. 1. Упрощенная схема установки СШН:**  
1 – станция управления; 2 – ЭД; 3 – редуктор;  
4 – кривошипно-шатунный механизм;  
5 – балансир; 6 – колонна штанг; 7 – СШН

Для привода установок СШН используются низкооборотные трехфазные асинхронные ЭД напряжением 0,4 кВ мощностью до 55 кВт с повышенным пусковым моментом серий АИР, 5А и других. Следует отметить, что в эксплуатации находится большое количество морально и физически устаревших ЭД серий АОП, АО2, АОП2, 4А, 3А, а также ЭД зарубежного производства. Синхронная частота вращения составляет 500, 750, 1000 или 1500 об/мин [4].

Проблемы невысоких энергетических характеристик электроприводов установок СШН связаны прежде всего с режимами работы, обусловленными технологическими особенностями: циклически изменяющимся характером нагрузки, необходимостью большого запаса по мощности, в результате чего большую часть времени ЭД остается недогруженным [5], снижением общего КПД установки из-за большого количества промежуточных элементов между ЭД и насосом, в каждом из которых происходят потери энергии.

Значительный запас мощности необходим для обеспечения пуска в ход установки СШН, особенно в зимних условиях. В результате после запуска установки ЭД работает недогруженным с пониженными значениями КПД и коэффициента мощности  $\cos \varphi$  [6].

Большое количество промежуточных элементов между ЭД и насосом обусловлено необходимостью преобразовать быстрое вращение вала электродвигателя в медленное возвратно-поступательное движение колонны штанг. Для этого использовано последовательное соединение таких элементов, как клиноременная передача, редуктор, кривошипно-шатунный механизм, балансир, канатная подвеска и колонна штанг. В настоящее время появились новые механизмы приводов СШН, например, цепные и линейные приводы, обеспечивающие более высокий КПД при передаче энергии от ЭД до насоса [7]. Однако значительная часть действующего фонда скважин оснащена традиционными станками-качалками (СК), менять которые в настоящих экономических условиях у нефтедобывающих предприятий нет возможности.

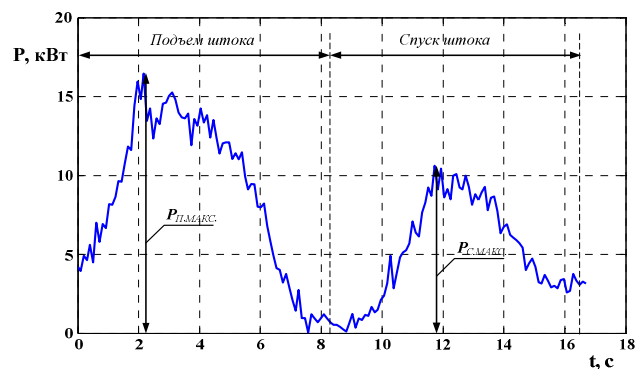
Циклический характер нагрузки обусловлен принципом работы СШН и кинематикой станка-качалки. Для выравнивания нагрузки внутри цикла качания применяют уравнивающие грузы, но точно сбалансировать установку СШН достаточно сложно, что вызывает дополнительные потери электроэнергии [8].

Эксплуатация скважин с высоковязкой продукцией также сопровождается дополнительными потерями электроэнергии [9].

#### ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА НАГРУЗКИ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭД ПРИВОДА УСТАНОВКИ СШН

Расчет потерь в ЭД установки СШН осложняется тем, что нагрузка является циклически изменяющейся в каждом цикле качания, соответственно все параметры ЭД, в том числе КПД и коэффициент мощности  $\cos \varphi$ , также изменяются внутри каждого цикла качания [10]. Пример изменения потребляемой ЭД активной мощности за один цикл качания (ваттметрограмма  $P=f(t)$ ) показан на **рис. 2**. Первая половина графика (до 8,5 с) соответствует движению плунжера насоса вверх, то есть подъему скважинной жидкости, а вторая (после 8,5 с) – спуску колонны штанг и плунжера насоса (при этом происходит подъем противовесов с накоплением потенциальной энергии, которая будет использована в следующем цикле качания для подъема продукции скважины).

Видно, что в течение одного цикла качания потребляемая активная мощность изменяется от нулевого значения до 16 кВт, но даже на этом пике установленный ЭД номинальной мощностью 30 кВт остается недогруженным.



**Рис. 2. График изменения потребляемой ЭД активной мощности за один цикл качания**

Неравенство пиковых значений мощности при подъеме и спуске колонны штанг  $P_{П.МАКС.}$  и  $P_{С.МАКС.}$  свидетельствует о недостаточном уравнивании установки СШН [11].

Даже при идеальном уравнивании установки СШН график нагрузки двигателя остается неравномерным. Вследствие этого КПД и  $\cos \varphi$  асинхронного двигателя снижаются против значений, соответствующих постоянной нагрузке. При этом КПД двигателя становится ниже номинального даже при условии равенства номинальной мощности  $P_n$  среднеквадратичной мощности нагрузки  $P_s$ .

При работе двигателя с периодически меняющейся нагрузкой его КПД и  $\cos \varphi$  зависят от коэффициента формы нагрузочной кривой  $K_f$  и, соответственно, от КПД и  $\cos \varphi$  при постоянной во времени нагрузке [12]. При ухудшении уравнивания увеличивается значение коэффициента формы нагрузочной кривой  $K_f$ , что приводит к дополнительному снижению КПД двигателя. Недогрузка двигателя по нагреву, то есть работа при  $P_s < P_n$ , еще больше снижает его КПД и  $\cos \varphi$ .

При переменной циклической нагрузке КПД двигателя привода СК за цикл качания определяется равенством [13]

$$\eta_{ц} = \frac{P_{ср}}{P_{ср} + \Delta P}, \quad (1)$$

где  $P_{ср}$  – среднее значение мощности на валу двигателя за цикл;  $\Delta P$  – среднее значение потерь мощности в двигателе за цикл.

Эквивалентная (среднеквадратичная) мощность двигателя  $P_s$  должна быть меньше номинальной мощности  $P_n$ , то есть удовлетворять условию  $P_n \geq P_s$ .

Соответствующий эквивалентной мощности КПД  $\eta_s$  определяется по рабочим характеристикам ЭД (**рис. 3**).

Выражение (3) показывает, что КПД двигателя за цикл качания  $\eta_{ц}$  тем сильнее зависит от коэффициента формы нагрузочной кривой, чем меньше  $\eta_s$ .

Эксплуатационный коэффициент мощности при циклической нагрузке  $\cos \varphi_{ц}$  определяется из выражения

$$\cos \varphi_{ц} = \frac{P_{1ср}}{\sqrt{3}U_1 I_{1ср}}, \quad (4)$$

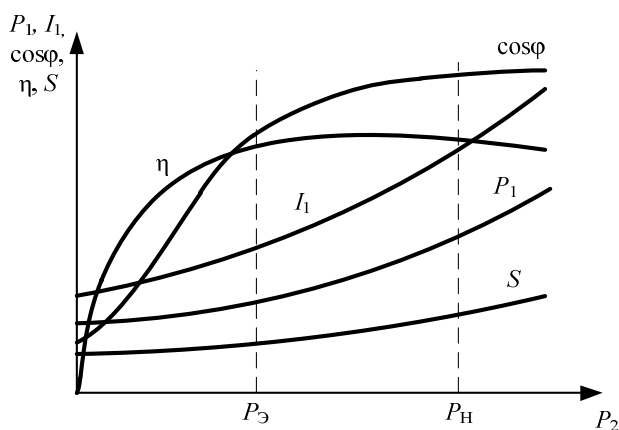


Рис. 3. Рабочие характеристики ЭД

где  $P_{1cp}$  – средняя активная мощность, потребляемая трехфазным двигателем из сети за цикл нагрузки, Вт;  $I_{13}$  – среднеквадратичное за цикл нагрузки значение тока статора двигателя, А;  $U_1$  – линейное напряжение сети, В.

Учитывая равенство

$$P_{1cp} = \frac{P_{cp}}{\eta_{\Sigma}} = \frac{P_3}{K_{\Phi} \eta_{\Sigma}}, \quad (5)$$

получаем

$$\cos \varphi_{\Sigma} = \frac{P_3}{K_{\Phi} \eta_{\Sigma} \sqrt{3} U_1 I_{13}}. \quad (6)$$

Коэффициент мощности при постоянной нагрузке, равной среднеквадратичной, за цикл

$$\cos \varphi_3 = \frac{P_3}{\eta_3 \sqrt{3} U_1 I_{13}}. \quad (7)$$

Из выражений (6) и (7)

$$\cos \varphi_{\Sigma} = \cos \varphi_3 \eta_3 / (K_{\Phi} \eta_{\Sigma}). \quad (8)$$

При замене  $\eta_{\Sigma}$  его выражением из (2)

$$\cos \varphi_{\Sigma} = \cos \varphi_3 \left( \frac{\eta_3}{K_{\Phi}} - \eta_3 + 1 \right). \quad (9)$$

При помощи формул (3) и (9) можно вычислить значения  $\eta_{\Sigma}$  и  $\cos \varphi_{\Sigma}$  в зависимости от коэффициента формы кривой нагрузки  $K_{\Phi}$  для различной загрузки двигателя  $P_3$ , определяемой коэффициентом загрузки:

$$K_3 = P_3 / P_{\Sigma}. \quad (10)$$

От величины коэффициента загрузки  $K_3$  зависят  $\eta_3$  и  $\cos \varphi_3$  данного двигателя. Известно, что чем лучше уравновешен станок-качалка, тем меньше значение коэффициента формы  $K_{\Phi}$ .

Мощность, потребляемая ЭД, а следовательно, и всей установкой СШН из сети, будет зависеть от КПД при циклической нагрузке:

$$P_{\Sigma} = P_3 / \eta_{\Sigma}. \quad (11)$$

## ВЛИЯНИЕ СБАЛАНСИРОВАННОСТИ УСТАНОВКИ СШН НА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ ПРИВОДА

Принцип действия приводов СШН таков, что при отсутствии уравнивания первую половину периода качания, при ходе колонны штанг вверх, к ЭД прикладывается нагрузка, обеспечивающая подъем самой колонны и скважинной жидкости. Спуск колонны штанг же происходит под собственным весом, и ЭД переходит в генераторный режим. Такой неравномерный режим работы ЭД приводит к ухудшению энергетических характеристик самого двигателя, а также отрицательно влияет на сеть [14].

С целью минимизации такого эффекта на станках-качалках используют уравнивающие грузы, располагаемые на кривошипе или на задней части балансира. Таким образом, когда колонна штанг опускается вниз, уравнивающие грузы поднимаются вверх и наоборот. Этим догружают ЭД при спуске колонны и частично разгружают при подъеме.

Оценивают уравновешенность привода СШН при помощи коэффициента неуровненности:

$$K_H = \frac{(P_{\Sigma \max} - P_{\Sigma \min})}{(P_{\Sigma \max} + P_{\Sigma \min})} \cdot 100\%, \quad (12)$$

где  $P_{\Sigma \max}$ ,  $P_{\Sigma \min}$  – соответственно максимальные значения активной мощности при подъеме и спуске колонны штанг, определяемые по ваттметрограмме  $P=f(t)$  (см. рис. 2).

Авторами были проведены исследования, позволившие выявить взаимосвязь между коэффициентом неуровненности и дополнительными потерями мощности [8]. График зависимости дополнительных потерь мощности представлен на рис. 4.

В соответствии с полученной зависимостью, если коэффициент неуровненности  $K_H$  лежит в пределах от минус 5 до 5%, то потери мощности от несбалансированности можно не учитывать. При больших значениях коэффициента неуровненности  $K_H$  потери мощности  $\Delta\%$  определяются по графику (см. рис. 4) и учитываются в общей мощности, потребляемой установкой СШН [8]. Тогда суммарные потери мощности в электроприводе определяются по формуле

$$P_{\Sigma} = \frac{P_3}{\eta_{\Sigma}} \cdot \left( 1 + \frac{\Delta\%}{100} \right). \quad (13)$$

Таким образом, чтобы учесть дополнительные потери от неуровненности установки, следует по ваттметрограмме (см. рис. 2) определить максимальные значения активной мощности при подъеме и спуске колонны штанг, найти по (12) коэффициент неуровненности  $K_H$ , затем по графической зависимости (см. рис. 4) определить дополнительные потери и по (13) вычислить суммарные потери мощности  $P_{\Sigma}$ .

## ПРИМЕР ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИВОДА УСТАНОВКИ СШН

В рамках проведения данного исследования был произведен анализ энергопотребления установки СШН для нефтедобывающей скважины одного из месторождений Западной Сибири, параметры которой приведены в таблице.

Исходные данные по скважине

Параметр	Значение
Глубина скважины, м	1300
Динамический уровень, м	440
Тип насоса	НН-44
Число качаний в минуту	5,95
Ход штока, м	1,2
Мощность ЭД, кВт	30
Средний cos φ	0,38
Небаланс, %	62,11
Объемный дебит по жидкости, м <sup>3</sup> /сут	23
Массовый дебит по нефти, т/сут	9,8

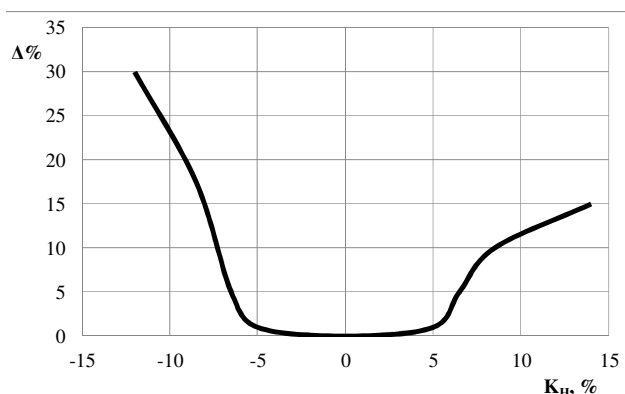


Рис. 4. Зависимость дополнительных удельных потерь электроэнергии от коэффициента неуравновешенности установки СШН

Удельное энергопотребление для данной скважины составляло 8,76 кВт·ч/м<sup>3</sup> скважинной жидкости.

В результате анализа было установлено, что мощность, потребляемая СК от ЭД, составляет 3,94 кВт, и ЭД загружен на 13%. Значительные дополнительные потери (до 60%) обусловлены плохой балансировкой противовесов СК.

Скважина эксплуатируется в неэкономичном режиме: с высокой частотой качаний (6 качаний в минуту) и малым ходом штока (1,2 м). Такой же отбор жидкости может быть обеспечен при более экономичном режиме: с меньшей частотой качаний и большим ходом штока.

Для данной скважины был разработан ряд оптимизационных мероприятий:

- 1) замена ЭД мощностью 30 кВт на ЭД меньшей мощности – 22 кВт;
- 2) балансировка противовесов СК, после чего небаланс снизился до 5%;
- 3) корректировка режима эксплуатации скважины (3,6 качаний в минуту, ход штока 2,0 м).

В результате внедрения данных оптимизационных мероприятий дебит скважины остался на прежнем уровне – 23 м<sup>3</sup>/сут, в то время как удельное энергопотребление снизилось до 6,45 кВт·ч/м<sup>3</sup>, то есть на 27%. По имеющейся у авторов информации при эксплуатации до 95–98% скважин, оснащенных СШН, имеют место непродуктивные потери электроэнергии, в среднем их энергопотребление может быть сокращено на 15–20% без снижения объемов добываемой жидкости.

В современных экономических условиях проблемы обеспечения энергоэффективности скважинных насосов для добычи нефти приобретают особую актуальность, так как стоимость электроэнергии является одной из основных составляющих в себестоимости добываемого углеводородного сырья [15, 16].

В статье авторами предложена методика, позволяющая определить энергетические характеристики ЭД привода установки СШН в условиях циклически изменяющейся нагрузки и недостаточной уравновешенности. Предложены аналитические зависимости, позволяющие определить эксплуатационные значения КПД и коэффициента мощности cosφ для ЭД при циклическом нагружении. Также рассмотрено влияние на потребляемую мощность сбалансированности установок СШН.

При помощи данных расчетов могут быть оптимизированы режимы работы электроприводов установок СШН, что позволит снизить удельное потребление электроэнергии при насосной добыче нефти и уменьшить затраты нефтедобывающих предприятий на приобретение электроэнергии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хакимьянов М.И. Повышение энергетической эффективности скважинных насосов механизированной добычи нефти // Энергетик. 2016. № 5. С. 36–38.
2. Семисынов Р.А., Киселев Е.С., Хакимьянов М.И. Анализ потерь энергии в технологических элементах установок скважинных нефтедобывающих насосов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. №6. С. 179–198. URL: [http://ogbus.ru/issues/6\\_2015/ogbus\\_6\\_2015\\_p179-198\\_SemisynovRA\\_ru\\_en.pdf](http://ogbus.ru/issues/6_2015/ogbus_6_2015_p179-198_SemisynovRA_ru_en.pdf) (дата обращения: 13.12.2016).
3. Хакимьянов М.И. Современные станции управления скважинными штанговыми глубиннонасосными установками // Нефтегазовое дело. 2014. Т. 12. №1. С. 78–85.
4. Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Яризов А.Д. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности: учебник для вузов. М.: ОАО «Издательство «Недра», 2000. 487 с.
5. Мугалимов Р.Г., Закирова Р.А., Мугалимова А.Р. Энергоэффективные асинхронные двигатели, технико-экономические преимущества и оптимизация себестоимости их создания // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 2(31). С. 30–34.
6. Хакимьянов М.И., Хусаинов Ф.Ф., Шафиков И.Н. Зависимость энергопотребления штанговых глубинных насосов от технологических параметров скважин // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. №1. С. 533–563. URL: [http://ogbus.ru/issues/1\\_2015/ogbus\\_1\\_2015\\_p533-563\\_KhakimyanovMI\\_ru\\_en.pdf](http://ogbus.ru/issues/1_2015/ogbus_1_2015_p533-563_KhakimyanovMI_ru_en.pdf) (дата обращения: 13.12.2016).
7. Пачин М.Г., Хакимьянов М.И. Интеллектуальные решения для нефтедобычи – станции управления штанговыми насосами ОАО «ПНППК» // Бурение и нефть. 2014. №9. С. 58–62.
8. Хакимьянов М.И. Удельный расход электроэнергии при механизированной добыче нефти штанговыми глубиннонасосными установками // Вестник УГАТУ. 2014. Т. 18, № 1(62). С. 124–130.
9. Современные технологии добычи высоковязких нефтей / Конесев С.Г., Хакимьянов М.И., Хлюпин П.А., Кондратьев Э.Ю. // Электротехнические системы и комплексы. 2013. № 21. С. 301–307.
10. Хакимьянов М.И., Сираев Р.М., Крылов А.О. Исследование влияния на энергопотребление скважинных насосов технологических и эксплуатационных параметров //

- Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. Т. 11. №1. С. 15–20.
11. Исаченко И.Н., Гольдштейн Е.И., Налимов Г.П. Методы контроля сбалансированности станка-качалки на основе измерения электрических параметров // Нефтяное хозяйство. 2002. № 1. С. 60–61.
  12. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти: учеб. пособие для вузов. М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. 816 с.
  13. Справочное руководство по проектированию и эксплуатации нефтяных месторождений. Добыча нефти / Р.С. Андриасов, И.Т. Мищенко, А.И. Петров и др.; под общ. ред. Ш.К. Гиматулинова М.: Недра, 1983. 455 с.
  14. Бубнов М. В., Зюзев А.М. Средства диагностирования оборудования установок штанговых глубинных насосов // Труды первой научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. Екатеринбург, 2016. С. 175–178.
  15. Системы управления для интеллектуальных скважин, эксплуатируемых глубиннонасосным способом / Миловзоров Г.В., Хакимьянов М.И., Редькина Т.А., Миловзоров А.Г. // Интеллектуальные системы в производстве. 2015. №1. С. 55–58.
  16. Садов В. Б. Формирование ограничений при управлении приводом штангового глубинного насоса // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2014. Т. 14. №. 2. С. 47–51.

Поступила в редакцию 16 января 2017 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### PROBLEMS OF IMPROVING THE ENERGY CHARACTERISTICS OF DOWNHOLE SUCKER ROD PUMP ELECTRIC DRIVES

Marat I. Khakimyanov

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Fanur F. Khusainov

Postgraduate Student, Ufa State Petroleum Technological University.

Igor N. Shafikov

Postgraduate Student, Ufa State Petroleum Technological University.

Mechanized oil production is associated with significant power consumption. The main consumers are well pump electric drives. Due to volatile oil prices, producing companies are forced to look for ways to reduce energy costs and increase energy efficiency of well pump drives. The authors carried out the analysis of downhole sucker rod pump unit from the point of view of energy efficiency and considered the dependence of motor characteristics on cyclic loading. A well pump motor remains underloaded most of the time. Low loading impairs the efficiency and power factor. Thanks to the design features of the downhole sucker rod pump units, the load on the motor shaft varies within each swing cycle. All the parameters also change. Therefore, to perform the calculations, we need to determine the average values of effective power, efficiency and power factor of the swing cycle. Losses of the downhole sucker rod pump units also depend on the degree of balance counterweights. If the unbalance ratio of a pump unit ranges from -5% to + 5%, the power loss of the imbalance can be ignored. For large values of the unbalance factor, the power losses are determined by the graph and taken into account in the overall power consumption of the pump unit. The authors proposed the method, which makes it possible to determine the energy characteristics of the downhole sucker rod pump unit electric drive in the cyclically varying load conditions and a lack of balance. The authors also proposed analytical dependences for determining the operational efficiencies and power factor under cyclic loading. Operation modes of pump unit drives can be optimized and it will reduce specific energy consumption for pumping oil production.

**Keywords:** Oil well, pump, electric drive, induction motor, sucker rod pump unit, power consumption, energy efficiency, effective power, cyclic load, unbalance factor, wattmeter card.

#### REFERENCES

1. Khakimyanov M.I. Increasing the energy efficiency of downhole pump of artificial lift. *Energetik*. 2016, no. 5, pp. 36–38. (In Russian)
2. Semisynov R.A., Kiselev Y.S., Khakimyanov M.I. Analysis of energy losses in the technological elements of well oil-extracting pump units. *Oil and Gas Business: electronic scientific journal*. 2015, no. 6, pp. 179–198. Available at: [http://ogbus.ru/issues/6\\_2015/ogbus\\_6\\_2015\\_p179-198\\_SemisynovRA\\_ru\\_en.pdf](http://ogbus.ru/issues/6_2015/ogbus_6_2015_p179-198_SemisynovRA_ru_en.pdf) (Accessed: 13.12.2016). (In Russian)
3. Khakimyanov M.I. Modern control stations of sucker rod pump units. *Oil and Gas Business*. 2014, vol. 12, no. 1, pp. 78–85. (In Russian)
4. Menshov B.G., Yershov M.S., Yarizov A.D. *Elektrotekhnicheskiye ustanovki i komplekсы v neftegazovoy promyshlennosti: Ucheb. dlya vuzov* [Electrical installations and facilities in the oil and gas industry: textbook for high schools]. Moscow: JSC Publishing House "Nedra", 2000. 487 p. (In Russian)
5. Mugalimov R.G., Zakirova R.A., Mugalimova A.R. Energy Efficient Asynchronous Motors, their Technical and Economic Advantages and Cost Optimization of their Development. *Electrotechnical systems and complexes*. 2016, no. 2(31), pp. 30–34.
6. Khakimyanov M.I., Khusainov F.F., Shafikov I.N. Technological parameters influence of oil wells on energy consumption of sucker rod pumps. *Oil and Gas Business: electronic scientific journal*. 2015, no. 1, pp. 533–563. Available at: [http://ogbus.ru/issues/1\\_2015/ogbus\\_1\\_2015\\_p533-563\\_KhakimyanovMI\\_ru\\_en.pdf](http://ogbus.ru/issues/1_2015/ogbus_1_2015_p533-563_KhakimyanovMI_ru_en.pdf) (Accessed: 13.12.2016).
7. Pachin M.G., Khakimyanov M.I. Intelligent solutions for oil production – sucker rod pump control station of "PNPPK". *Burenije i nefь*. 2014, no. 9, pp. 58–62. (In Russian)
8. Khakimyanov M.I. Energy intensity in artificial lift of sucker rod pumping units. *Vestnik UGATU*. 2014, vol. 18, no. 1(62), pp. 124–130.
9. Konesev S.G., Khakimyanov M.I., Khlyupin P.A., Kondratyev E.Yu. Modern technologies of hi-viscous oil production. *Electrotechnical systems and complexes*. 2013, no. 21, pp. 301–307. (In Russian)
10. Khakimyanov M.I., Siraev R.M., Krylov A.O. The influ-

- ence of well pump technological and operational parameters on energy consumption. *Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i systemy*. 2015, vol. 11, no. 1, pp. 15–20. (In Russian)
11. Isachenko I.N., Goldshteyn Ye.I., Nalimov G.P. Methods of controlling the balance of pumping unit based on the measurement of electrical parameters. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2002, no. 1, pp. 60–61.
  12. Mishchenko I.T. *Skvazhinnaya dobycha nefii: Uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Downhole oil production: A manual for universities]. Moscow: "Oil and Gas", 2003. 816 p. (In Russian)
  13. Gimatudinova Sh.K., Andriasov R.S., Mishchenko I.T. *Spravochnoye rukovodstvo po proyektirovaniyu i ekspluatatsii neftyanykh mestorozhdeniy. Dobycha nefii* [Reference Manual for the design and operation of oil fields. Oil production: A manual for universities]. Moscow: "Nedra", 1983. 455 p. (In Russian)
  14. Bubnov M. V., Zyuzev A.M. Equipment diagnosis means for sucker rod pumps. *Proceedings of the first scientific and technical conference of young scientists of the Ural Energy Institute*. Ekaterinburg: Ural Federal University, 2016, pp. 175–178. (In Russian)
  15. Milovzorov G.V., Khakimyanov M.I., Redkina T.A., Milovzorov A.G. Control system for intelligent oil wells operated by downhole method. *Intellektualnyye systemy v proizvodstve*. 2015, no. 1, pp. 55–58. (In Russian)
  16. Sadv V.B. Setting constraints in the control process of a sucker-rod pumping unit drive. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Kompyuternyye tekhnologii, upravleniye, radioelektronika*. 2014, vol. 14, no. 2, pp. 47–51. (In Russian)

Хакимьянов М.И., Хусаинов Ф.Ф., Шафиков И.Н. Проблемы повышения энергетических характеристик электроприводов скважинных штанговых насосов // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. № 2 (35). С. 35–40. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-35-40](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-35-40)

Khakimyanov M.I., Khusainov F.F., Shafikov I.N. Problems of Improving the Energy Characteristics of Downhole Sucker Rod Pump Electric Drives. *Elektrotehnicheskie systemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 2 (35), pp. 35–40. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-35-40](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-35-40)