ISSN 1992-6502 (Print) Вестник УГАТУ ISSN 2225-2789 (Online)
2014. Т. 18, № 2 (63). С. 54–60 http://journal.ugatu.ac.ru

УДК 681.586.326

Удельный расход электроэнергии при механизированной добыче нефти штанговыми глубиннонасосными установками

М. И. Хакимьянов

hakimyanovmi@gmail.com

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (УГНТУ)

Поступила в редакцию 29.08.2013

Аннотация. Рассматривается методика определения удельного расхода электроэнергии при механизированной добыче нефти установками штанговых глубинных насосов, определяются потери энергии во всех элементах насосной установки. Анализируются различные подходы к определению потребляемой из электрической сети мощности, влияние на энергетические характеристики установки циклического характера нагрузки и степени сбалансированности станка-качалки.

Ключевые слова: расход электроэнергии; мощность; динамограмма; ваттметрограмма; плунжер; скважина.

ВВЕДЕНИЕ

Внедрение программ энергоэффективности и рационального использования ресурсов на предприятиях топливно-энергетического комплекса, которые занимаются добычей, подготовкой, транспортом и переработкой нефти и газа, привело к необходимости разработки методик удельного расхода электроэнергии различных технологических процессов.

Известно, что самым энергоемким технологическим процессом на нефтедобывающих предприятиях является механизированная добыча нефти – на долю приводов скважинных насосов приходится до 60 % всей потребляемой предприятием электроэнергии [1].

Хотя в целом по РФ основным способом эксплуатации нефтедобывающих скважин является использование электроцентробежных насосов (ЭЦН), установки штанговых глубинных насосов (ШГН) также используются достаточно широко [2]. При этом нужно отметить, что эксплуатация скважин при помощи ШГН является доминирующей в США, а также в таких нефтяных компаниях РФ, как ОАО «Татнефть» и ОАО АНК «Башнефть».

Если еще 10–15 лет назад существовала точка зрения, что установки ШГН морально устарели и постепенно будут полностью вытеснены ЭЦН и винтовыми насосами, то новые разработки в области приводов ШГН позволили опровергнуть это мнение. Здесь следует отметить появление цепных приводов ШГН с длиной хода до 9 м и низкой частотой качаний, а также так называемых «линейных приводов», которые отличаются компактностью и состоят практически только из электродвигателя (ЭД) и редуктора [3]. На традиционные приводы со станками-качалками (СК) стали устанавливаться «интеллектуальные» станции управления (СУ) с частотно-регулируемым приводом, что также повысило эффективность их использования.

СТРУКТУРА РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ УСТАНОВКОЙ ШГН

Можно выделить следующие основные технологические элементы установки ШГН, в которых происходят потери энергии при подъеме скважинной жидкости: насос; станок-качалка; редуктор; двигатель; станция управления.

Структура потерь мощности при подъеме скважинной жидкости установкой ШГН приведена на рис. 1.

Мощность, потребляемая двигателем СК, расходуется на выполнение полезной работы по подъему жидкости на поверхность и на покрытие потерь мощности в оборудовании.

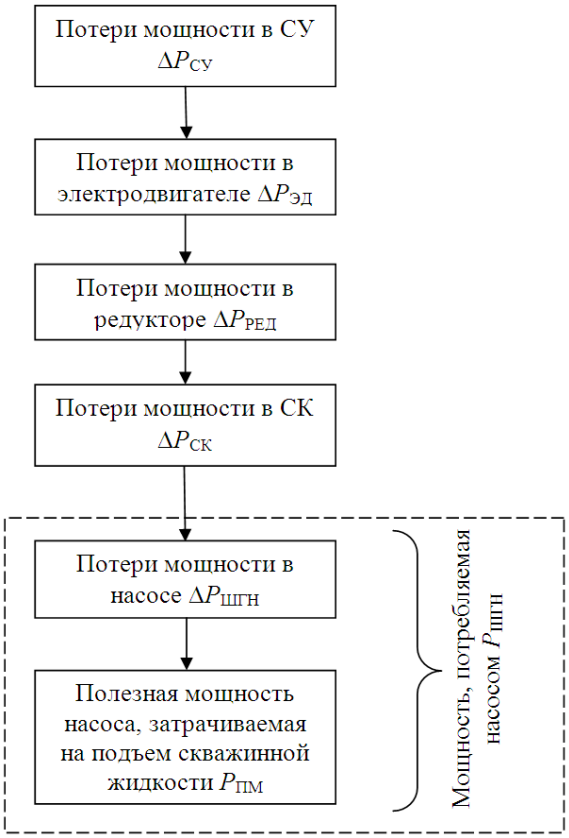


Рис. 1. Структура потерь мощности при подъеме скважинной жидкости установкой ШГН

При расчете уточненным способом полная мощность, потребляемая установкой, определяется по формуле:

$$P_Э = P_{ПМ} + \Delta P_{КЛ} + \Delta P_{ТР.М} + \Delta P_{ТР.Г} + \\ + \Delta P_{ТР.ПЛ} + \Delta P_{СК} + \Delta P_{РЕД} + \Delta P_{ЭД} + \Delta P_{СУ},$$

где $P_{ПМ}$ – полезная мощность, расходуемая на подъем скважинной жидкости; $\Delta P_{КЛ}$ – потери мощности в клапанах насоса; $\Delta P_{ТР.М}$ – мощность, расходуемая на преодоление механического трения штанг; $\Delta P_{ТР.Г}$ –мощность, расходуемая на преодоление гидродинамического трения штанг; $\Delta P_{ТР.ПЛ}$ – потери мощности на трение плунжера в цилиндре насоса; $\Delta P_{СК}$ – потери мощности в элементах СК; $\Delta P_{РЕД}$ – потери мощности в редукторе; $\Delta P_{ЭД}$ – потери мощности в ЭД; $\Delta P_{СУ}$ – потери мощности в СУ.

Однако на практике использовать уточненный способ затруднительно, так как необходимо знать много параметров о работе погружного оборудования, которые не могут быть измерены, а могут быть лишь рассчитаны с определенными допущениями и погрешностями.

Для расчета потребляемой установкой ШГН мощности можно использовать эмпирическую формулу, предложенную Б. М. Плющом и В. О. Саркисяном [4]:

$$P_Э = \frac{10^3}{\eta_П}\left(K_1 + \frac{K_2 \cdot F_Ж \cdot S}{9{,}8}\right) \cdot N,$$

где K_1 – коэффициент, зависящий от типа и грузоподъемности СК [4]; K_2 – коэффициент, зависящий от режима откачки и диаметра насоса; $\eta_П$ – КПД передачи от вала двигателя к валу кривошипа, которым учитываются потери в редукторе и клиноременной передаче (принимается равным 0,96–0,98); $F_Ж$ – гидростатическая нагрузка (вес жидкости), Н; S – длина хода штока, м; N – количество качаний балансира в секунду.

Коэффициент K_2 зависит от режима откачки и диаметра насоса и может быть найден из выражения

$$K_2 = 1{,}26 \cdot 10^{-2} \sqrt{\alpha_{ПОД}^2 + 0{,}28\left(1 + 3{,}6 \cdot 10^{-4} \frac{S \cdot N^2}{D_{ПЛ}^3}\right)^2},$$

,

где $D_{ПЛ}$ – диаметр плунжера, м; $\alpha_{ПОД}$ – коэффициент подачи установки.

Такие параметры, как вес жидкости $F_Ж$ и коэффициент подачи $\alpha_{ПОД}$ могут быть найдены

методом динамометрирования [5] из графиков устьевой и плунжерной динамограмм (рис. 2). Гидростатическая нагрузка на плунжер (вес жидкости) представляет собой высоту динамограммы. Коэффициент подачи может быть определен как отношение длины хода плунжера $S_{ПЛ}$ к длине хода штока S:

$$\alpha_{ПОД} = \frac{S_{ПЛ}}{S}.$$

Наиболее подходящей для практического использования является методика применения эмпирических формул Б. М. Плюща и В. О. Саркисяна, так как практически все необходимые технологические данные известны либо могут быть получены путем динамометрирования.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ, ПОТРЕБЛЯЕМОЙ УСТАНОВКОЙ ШГН ИЗ СЕТИ

В качестве приводов СК используются короткозамкнутые асинхронные ЭД в закрытом обдуваемом исполнении с повышенным пусковым моментом напряжением 380 В и мощностью от 7,5 до 55,0 кВт. Большинство ЭД, применяемых в электроприводах ШГН, имеют синхронную частоту вращения 1500 об/мин, кратность пускового момента (отношение начального пускового момента к номинальному) 1,8…2,0, кратность максимального момента 2,2…2,8.

Расчет потерь в ЭД СК осложняется тем, что нагрузка является периодически изменяющейся в каждом цикле качания, соответственно все параметры ЭД, в том числе КПД и коэффициент мощности также изменяются внутри каждого цикла. График изменения потребляемой ЭД активной мощности за один цикл качания (ваттметрограмма) показан на рис. 3.

Даже при идеальном уравновешивании СК график нагрузки двигателя остается неравномерным, так как пульсации, определяемые законом изменения скорости точки подвеса штанг, сохраняются. Вследствие этого КПД и cos φ асинхронного двигателя снижаются против значений, соответствующих постоянной нагрузке. При этом КПД двигателя снижается ниже номинального даже при условии равенства номинальной и среднеквадратичной мощности нагрузки $P_Н$ и $P_Э$.

При работе двигателя с периодически меняющейся нагрузкой его КПД и коэффициент мощности зависят от коэффициента формы нагрузочной кривой $K_Ф$ [4]. При ухудшении уравновешивания увеличивается коэффициент формы нагрузочной кривой $K_Ф$, что приводит к дополнительному снижению КПД двигателя. Недогрузка двигателя по нагреву, то есть работа при $P_Э<P_Н$, еще больше снижает его энергетические характеристики.

По нагрузочным характеристикам данного ЭД определяются соответствующие эквивалентной мощности КПД $\eta_Э$ и коэффициент мощности cos $\varphi_Э$. После чего на их основе определяются циклические значения этих коэффициентов в зависимости от коэффициента формы кривой $K_Ф$ [4]:

$$\eta_Ц = \frac{\eta_Э}{\eta_Э + (1-\eta_Э)\cdot K_Ф};$$

$$\cos\varphi_Ц = \cos\varphi_Э\left(\frac{\eta_Э}{K_Ф} - \eta_Э + 1\right).$$

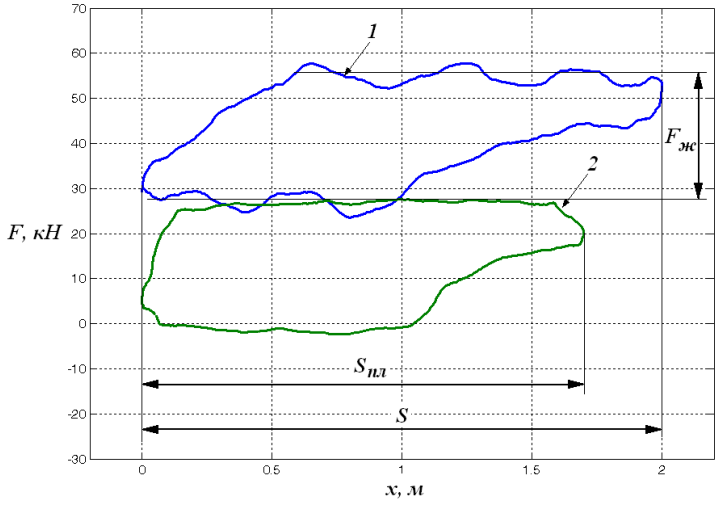


Рис. 2. Определение по динамограмме длины хода штока S, длины хода плунжера $S_{ПЛ}$ и гидростатической нагрузки на плунжер $F_Ж$: *1* – устьевая (измеренная) динамограмма; *2* – плунжерная (расчетная) динамограмма

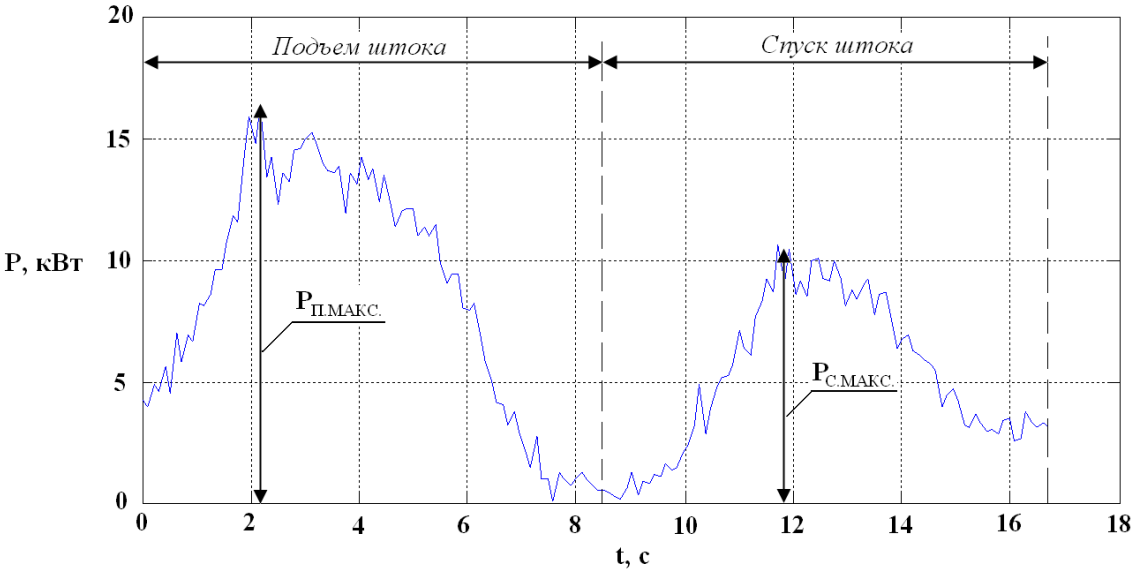


Рис. 3. График изменения потребляемой ЭД активной мощности за один цикл качания

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

$$P_{\Sigma} = \frac{P_{Э}}{\eta_{Ц}}.$$

ВЛИЯНИЕ СБАЛАНСИРОВАННОСТИ НА ПОТРЕБЛЯЕМУЮ МОЩНОСТЬ

Как отмечалось ранее, сбалансированность противовесов СК влияет на коэффициент формы потребляемой мощности $K_{Ф}$, а следовательно, на цикличный КПД привода установки $\eta_{Ц}$ и цикличный коэффициент мощности ЭД $\cos\varphi_{Ц}$. Однако на практике определить значение коэффициента формы бывает затруднительно. Поэтому более целесообразно учитывать влияние сбалансированности СК на потребление мощности через коэффициенты неуравновешенности. Коэффициент неуравновешенности определяется по максимальным значениям активной мощности при подъеме и спуске полированного штока $P_{П.МАКС.}$ и $P_{С.МАКС.}$ [6]:

$$K_{Н} = \frac{\left(P_{П.МАКС.} - P_{С.МАКС.}\right)}{\left(P_{П.МАКС.} + P_{С.МАКС.}\right)} \cdot 100\%.$$

Определение максимальных значений мощности за цикл качания при подъеме и спуске полированного штока иллюстрируется на рис. 3.

Установлено, что зависимость потерь электроэнергии от коэффициента неуравновешенности СК имеет практически линейную зависимость [7], приведенную на рис. 4.

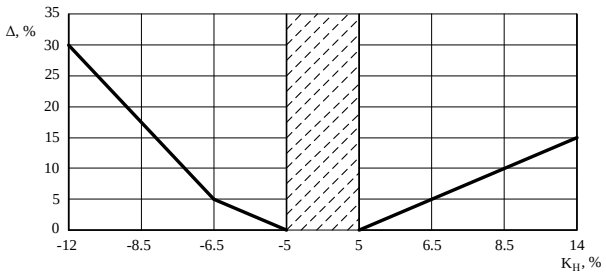


Рис. 4. Зависимость потерь электроэнергии от коэффициента неуравновешенности СК

В соответствии с зависимостью (рис. 4), если коэффициент неуравновешенности $K_{Н}$ лежит в пределах от –5 до +5 %, то потери электроэнергии от несбалансированности СК можно не учитывать. При больших значениях коэффициента неуравновешенности $K_{Н}$ потери энергии Δ% определяются по графику и учитываются в общей мощности, потребляемой установкой ШГН.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ СКВАЖИННОЙ ДОБЫЧЕ НЕФТИ УСТАНОВКАМИ ШГН

Нормативное удельное энергопотребление нефтедобывающего оборудования определяется как расход электроэнергии на подъем одной тонны нефти (массовый расход), либо как расход электроэнергии на подъем одного кубометра скважинной жидкости (объемный расход). Так как нефть в чистом виде уже практически нигде не добывается, то под объемным расходом понимается добыча скважинной жидкости

(вода и нефть), а под массовым расходом – масса чистой нефти, отделенной от воды и других примесей.

Для определения объемного удельного энергопотребления установки ШГН следует энергию W, потребляемую из сети за время T, разделить на объем добытой нефти за то же время:

$$W_{\text{УД.ОБ.}} = \frac{W}{Q_{\text{Ч}} \cdot T},$$

где W – энергия, потребляемая из сети, кВт·ч; T – время, ч; $W_{\text{УД.ОБ.}}$ – объемный удельный расход электроэнергии, кВт·ч/м^3; $Q_{\text{Ч}}$ – часовой объемный дебит по жидкости, м^3/ч.

Для определения массового удельного энергопотребления установки ШГН энергия W, потребляемая из сети за время T, приводится к часовому массовому дебиту по нефти $Q'_{\text{Ч}}$:

$$W_{\text{УД.М.}} = \frac{W}{Q'_{\text{Ч}} \cdot T},$$

где $W_{\text{УД.М.}}$ – массовый удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т; $Q'_{\text{Ч}}$ – часовой массовый дебит по нефти, т/ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА УДЕЛЬНОГО ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ СКВАЖИН, ОБОРУДОВАННЫХ ШГН

Для экспериментальной проверки данной методики был проведен расчет удельного энергопотребления ряда скважин, по которым имелись замеры потребляемой электроэнергии. Диаграмма с результатами расчета приведена на рис. 5. Как видно из диаграммы, удельное энергопотребление установок ШГН составило от 5 до 15 кВт·ч/м^3 скважинной жидкости, что можно считать типичным для данного способа эксплуатации скважин. Отметим, что расхождения с данными замеров в подавляющем большинстве случаев не превышали величины в 5 %, за исключением скважин 1607 и 1600 (13 и 15 % соответственно). Несоответствия между расчетным и замеренным удельным энергопотреблением могут быть обусловлены как погрешностью средств измерения – счетчиков электроэнергии и приборов измерения продукции скважин, так и ухудшением характеристик нефтедобывающего оборудования из-за износа. Так, применяемые на нефтепромыслах приборы измерения дебита скважин не позволяют обеспечить погрешность измерения менее 5 % [8]. В то же время проблематично определить и учесть такие факторы, как утечки в клапанах насоса и колонне насосно-компрессорных труб, снижение КПД электродвигателя и редуктора в результате старения и износа и др.

Таким образом, если измеренное значение удельного энергопотребления превышает расчетное более чем на 5%, то необходимо провести диагностику нефтедобывающего и электрооборудования скважины.

Следует отметить, что нефтедобывающие предприятия стремятся минимизировать затраты электроэнергии при механизированной добыче.

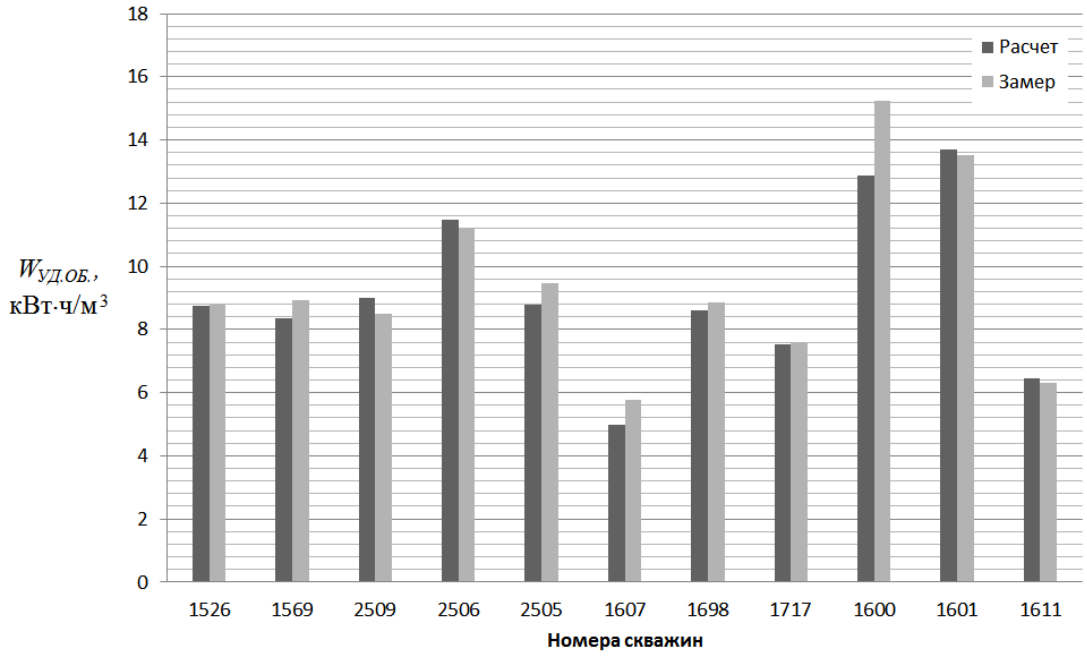


Рис. 5. Объемное удельное потребление электроэнергии для скважин, эксплуатируемых ШГН

Здесь можно выделить, как уже отмечалось, внедрение цепных приводов ШГН, которые позволяют обеспечить меньшее удельное энергопотребление, чем СК, а также использование интеллектуальных СУ с частотно-регулируемым приводом. Определенный эффект позволяет получить более точная балансировка противовесов СК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по материалам, изложенным в данной статье, могут быть сделаны следующие выводы:

1. Скважинная механизированная добыча нефти является самым энергоемким технологическим процессом на нефтедобывающих предприятиях, а следовательно, обладает наибольшим потенциалом для внедрения оптимизационных энергосберегающих мероприятий.

2. Установки ШГН являются объектами, актуальными для разработки мероприятий по оптимизации энергопотребления в силу своей распространенности на нефтепромыслах РФ и других стран. В частности, ШГН являются основным способом эксплуатации скважин в ОАО «Татнефть» и ОАО АНК «Башнефть».

3. Расчет потребляемой установкой ШГН эффективной мощности целесообразно проводить с использованием эмпирических формул, использовать уточненный способ затруднительно, так как необходимо знать много параметров о работе погружного оборудования, которые не могут быть измерены, а могут быть лишь рассчитаны с определенными допущениями и погрешностями.

4. Необходимые для проведения расчетов по предложенной методики исходные данные могут быть получены методами динамо- и ваттметрирования.

5. Предложенная методика позволяет в большинстве случаев (до 80 % проанализированных скважин) рассчитать удельный расход электроэнергии установки ШГН с погрешностью не более 5 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ивановский В. Н.** Энергетика добычи нефти: основные направления оптимизации энергопотребления // Инженерная практика. 2011. № 6. С. 18–26. **[** V. N. Ivanovskiy, “Energy production of oil: the main directions of the energy optimization,” (in Russian), *Inzhenernaya praktika*, no. 6, pp. 18-26, 2011. **]**

2. **Маркетинговое** исследование рынка установок штанговых глубинных насосов (УШГН). Аналитический отчет. Research.Techart. 2010 [Электронный ресурс]. URL: http://www.techart.ru/files/research/walking-beam-pumping-unit.pdf (дата обращения 18.10.2013). **[** *Market research facilities sucker rod pumps (SRP). The analytical report* [Online]. Available: http://www.techart.ru/files/research/walking-beam-pumping-unit.pdf **]**

3. **Линейный** привод штангового насоса — LRP [Электронный ресурс]. URL: http://www.unicorus.com/ production/privodyi-shtangovyix-nasosov/lrp.html (дата обращения 18.10.2013). **[** *Linear actuator rod pump - LRP* [Online]. Available: http:// www.unicorus.com/production/privodyi-shtangovyix-nasosov/lrp.html **]**

4. **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. Гиматудинова. М.: Недра, 1983. 455 с. **[** *Reference manual for design development and operation of oil fields. Oil production*, (in Russian). Ed. Sh. K. Gimatudinova. Moscow: Nedra, 1983. **]**

5. **Хакимьянов М. И., Пачин М. Г.** Методика обработки динамограмм в информационно-измерительных системах управления штанговыми глубинными насосами // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 6 (51). С. 32–36. **[** M. I. Khakimyanov, M. G. Pachin, *“*Processing method of dynacards in information-measuring systems of sucker rod pumps control,*”* (in Russian), *Vestnik UGATU* (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 16, no. 6 (51), pp. 32-36, 2012. **]**

6. **Хакимьянов М. И., Гузеев Б. В.** Контроль работы электродвигателей станков - качалок методом ваттметрирования // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвуз. сб. науч. тр. / Редкол.: В. А. Шабанов и др. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2010. С. 179–188. **[** M. I. Khakimyanov and B. V. Guzeev, *“*Control of working the electric machines of sucker rod pumping units usings method of wattmeter card,*”* (in Russian), in *Povysheniye nadezhnosti i energoeffektivnosti elektrotekhnicheskikh sistem i kompleksov: mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* / redkol.: V. A. Shabanov i dr. Ufa: Izd UGNTU, pp. 179-188, 2010. **]**

7. **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. **[** I. N. Isachenko, Ye. I. Goldshteyn and G. P. Nalimov, *“*Methods to control balance beam pumping unit based on the measurement of electrical parameters,*”* (in Russian), *Neftyanoye khozyaystvo*, no 1, pp. 60-61, 2002. **]**

8. **Ясовеев В. Х., Уразаев А. Е.** Метод и особенности технической реализации информационно-измерительной системы определения расхода, фазового состава и структуры течения многофазной смеси // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 1 (46). С. 172–180. **[** V. Kh. Yasoveyev, and A. Ye. Urazayev, *“*The method and the technical characteristics of the information-measuring systems determine the flow rate, the phase composition and structure of the flow of multiphase mixtures,*”* (in Russian), *Vestnik UGATU* (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 16, no. 1 (46), pp. 172-180, 2012. **]**

ОБ АВТОРАХ

ХАКИМЬЯНОВ Марат Ильгизович, доц. каф. электротехники и электрооборудования предприятий. Дипл. инж. по электроприводу и автоматике (УГНТУ, 1999). Канд. техн. наук (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. систем автоматизации скважинной добычи нефти.

METADATA

Title: Energy intensity in artificial lift of sucker rod pumping units.

Authors: M. I. Khakimyanov.

Affiliation: Ufa State Petroleum Technical University (UGNTU), Russia.

Email: hakimyanovmi@gmail.com.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 2 (63), pp. 54-60, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The paper describes the method of calculating of energy intensity in artificial lift of sucker rod pumping units. We consider all the elements of the pumping unit, in which there are losses of energy. Different approaches to the consumption of electric power networks are analyzed, the impact on an energy characteristics of the installation of the cyclic nature of the load and the degree of balance beam pumping unit.

Key words: energy consumption; power; dynacard; wattmeter card; plunger; oilwell.

About author:

KHAKIMYANOV, Marat Ilgizovich, associate professor., Dept. of Electrical engineering and electrical equipment. Dipl. engineer for electric drive and automation of industrial installations and technological complexes (Ufa State Petroleum Technical Univ., 1999). Cand. of Tech. Sci. (UGATU, 2003.