

УДК 681.518.5

Г. В. Миловзоров, доктор технических наук, профессор
Удмуртский государственный университет
М. И. Хакимьянов, кандидат технических наук, доцент
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Т. А. Редькина, старший преподаватель
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова
А. Г. Миловзоров, кандидат технических наук, доцент
Удмуртский государственный университет

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СКВАЖИН, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ГЛУБИННО-НАСОСНЫМ СПОСОБОМ

Рассматриваются системы управления для нефтедобывающих скважин, состав технологических датчиков и функциональные возможности программно-алгоритмического обеспечения. Авторами предложена методика определения и оптимизации удельного расхода электроэнергии установками штанговых глубинных насосов, основанная на анализе динамограмм и ваттметрограмм. Анализируется зависимость затрат энергии на подъем скважинной жидкости от таких параметров работы насосной установки, как длина хода штока и частота качаний, а также влияние циклического характера нагрузки и сбалансированности станка-качалки.

Ключевые слова: интеллектуальная скважина, штанговый глубинный насос, система управления, динамограмма, ваттметрограмма, удельный расход электроэнергии.

Практически весь фонд нефтедобывающих скважин месторождений нашей страны и стран ближнего зарубежья эксплуатируется механизированным способом при помощи скважинных насосов. Наиболее широко используются штанговые глубинные насосы (ШГН), погружные электроцентробежные насосы и винтовые насосы (рис. 1). При этом насосное оборудование во многих случаях очень сильно изношено, а сами месторождения находятся в заключительных стадиях эксплуатации. В этих условиях возрастает роль интеллектуальных систем управления скважинными насосами, позволяющих путем измерения технологических параметров оптимизировать процесс эксплуатации скважины, уменьшить нагрузки на оборудование, потребление электроэнергии и в целом снизить затраты нефтедобывающих предприятий [1].

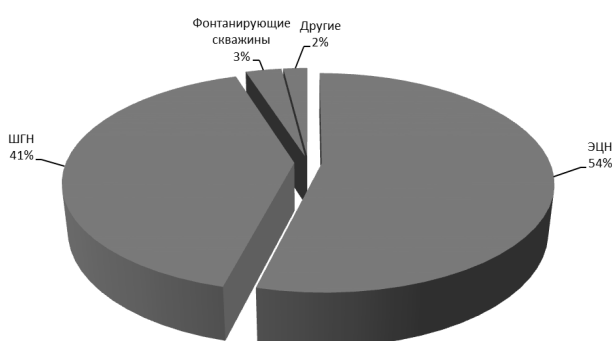


Рис. 1. Структура фонда нефтяных добывающих скважин РФ по способу эксплуатации

Понятие интеллектуальной скважины подразумевает оснащение установки датчиками технологических параметров, скважинным контроллером и системой телемеханики. При этом состав датчиков технологических параметров определяется типом используемого насосного оборудования, условиями

эксплуатации и степенью автоматизированности промысла.

Схема интеллектуальной системы управления скважиной с частотно-регулируемым электроприводом, эксплуатируемой ШГН, приведена на рис. 2. Она включает в себя датчик усилия 1, датчик устьевого давления 2, датчик затрубного давления 3, скважинный контроллер 4, преобразователь частоты 5, радиопередатчик 6, датчик угла поворота кривошипа станка-качалки 7, датчик угла поворота ротора электродвигателя 8 и датчики ваттметрирования 9. Схема расположения датчиков и элементов системы управления на установке ШГН показана на рис. 3. Датчики усилия 1 и угла поворота кривошипа станка-качалки 7 используются для динамометрирования ШГН. Датчики ваттметрирования 9 позволяют, с одной стороны, вести учет потребления электроэнергии, а с другой – диагностировать состояние электропривода [2].

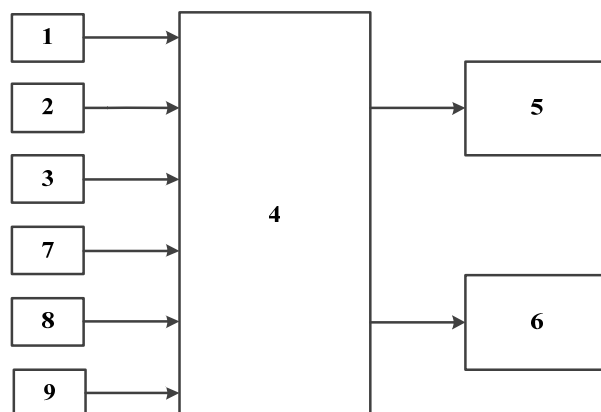


Рис. 2. Схема системы управления интеллектуальной скважиной, эксплуатируемой ШГН, с частотно-регулируемым электроприводом

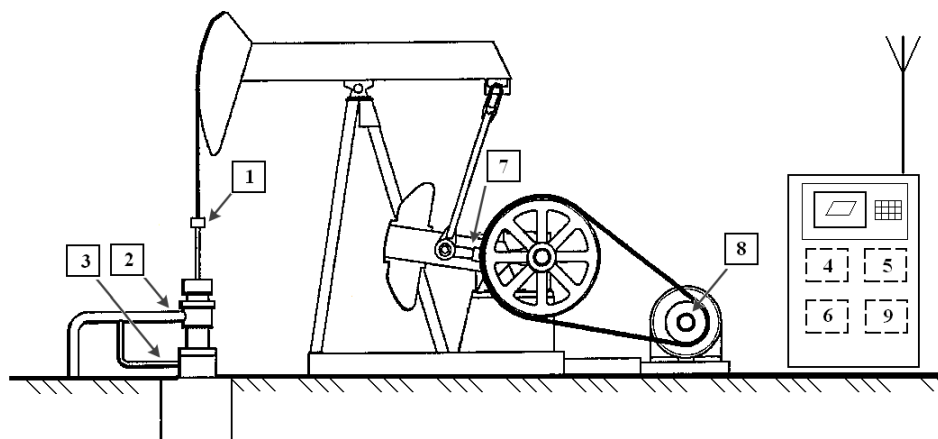


Рис. 3. Схема расположения датчиков и элементов системы управления на установке ШГН

Таким образом, на скважинах, эксплуатируемых ШГН, системой управления измеряются и анализируются такие технологические параметры, как ватт-метрограмма, давление и температура на устье скважины, динамический уровень жидкости в скважине, но самым главным и информативным параметром является динамограмма.

Функции построения и математической обработки динамограмм реализованы в большинстве современных систем управления ШГН. При автоматизации работы насосной установки главным образом анализируют устьевые динамограммы, снятые на полированном штоке или в траверсах канатной подвески. Однако хорошо известно, что устьевая динамограмма, измеренная на поверхности, сильно искажена относительно плунжерной, или глубинной, динамограммы. Для получения корректной информации о работе погружного оборудования предпочтительно анализировать именно плунжерную динамограмму.

Для расчета плунжерных динамограмм по измеренным устьевым используется несколько методик. Известны методика С. Гиббса и А. Нили, в которой решается дифференциальное уравнение движения штанг методом Фурье [3], или, например, методика решения телеграфных уравнений по И. А. Чарному, А. И. Фрейдензону и Ц. Т. Арустамовой. Наиболее полный обзор методик расчета плунжерных динамограмм приведен в работе В. М. Касьянова [4].

Для построения глубинной динамограммы необходимо, зная усилие F , скорость V и перемещение S штока на устье скважины, определить усилие F_1 , скорость V_1 и перемещение S_1 на плунжере [5, 6]:

$$F_1(t) = f(F, t, \delta, Q, V, E, f_{ш}, c);$$

$$V_1(t) = f(F, t, \delta, V, E, f_{ш}, c);$$

$$S_1(t) = f(F, t, \delta, S, E, f_{ш}, c),$$

где t – время, с; δ – время распространения волны по колонне штанг, с; Q – вес штанг в жидкости, Н; E – модуль упругости материала штанг, Н/м²; $f_{ш}$ – приведенная площадь сечения штанг, м²; c – скорость звука в штангах, м/с.

Время распространения волны по колонне штанг находится как отношение глубины скважины к скорости звука в штангах:

$$\delta = H / c,$$

где H – глубина скважины, м.

В работах [7, 8] приводятся разные методы вычисления параметров плунжерной динамограммы, но все они отличаются только формой представления расчетных выражений и имеют один и тот же смысл.

Можно сказать, что плунжерная динамограмма несет только информацию о работе насоса, а устьевая дополняется влиянием штанговой колонны, что затрудняет ее анализ. Таким образом, получив расчетным путем плунжерную динамограмму из измеренной устьевой, можно повысить достоверность анализа состояния и режима работы погружного оборудования.

Помимо устьевой и плунжерной динамограммы представляет интерес построение динамограмм в различных сечениях колонны штанг. Этот расчет позволяет увидеть динамику изменения формы динамограммы в зависимости от глубины: уменьшение значений усилия, «выпрямление» линий восприятия и снятия нагрузок, снижение амплитуды колебаний штанговой колонны. Прикладное значение этого расчета заключается в возможности анализа прочностных характеристик штанговой колонны, для чего берется максимальное значение усилия за цикл качания на данной глубине.

На рис. 4 приведены измеренная устьевая, а также рассчитанные глубинные и плунжерная динамограммы скважины № 2898 НГДУ «Елховнефть» для глубин 0; 250; 500; 750 и 1000 м.

Данные динамометрирования позволяют определить и уточнить такие параметры, как состояние и режим работы погружного оборудования, расход добываемой скважинной жидкости, удельное энергопотребление электропривода насосной установки, а также оптимизировать режим эксплуатации скважины.

Одной из важных функций интеллектуальных систем управления скважинными насосами является оптимизация режима эксплуатации с целевой функцией снижения удельного потребления электроэнергии приводом насосной установки.

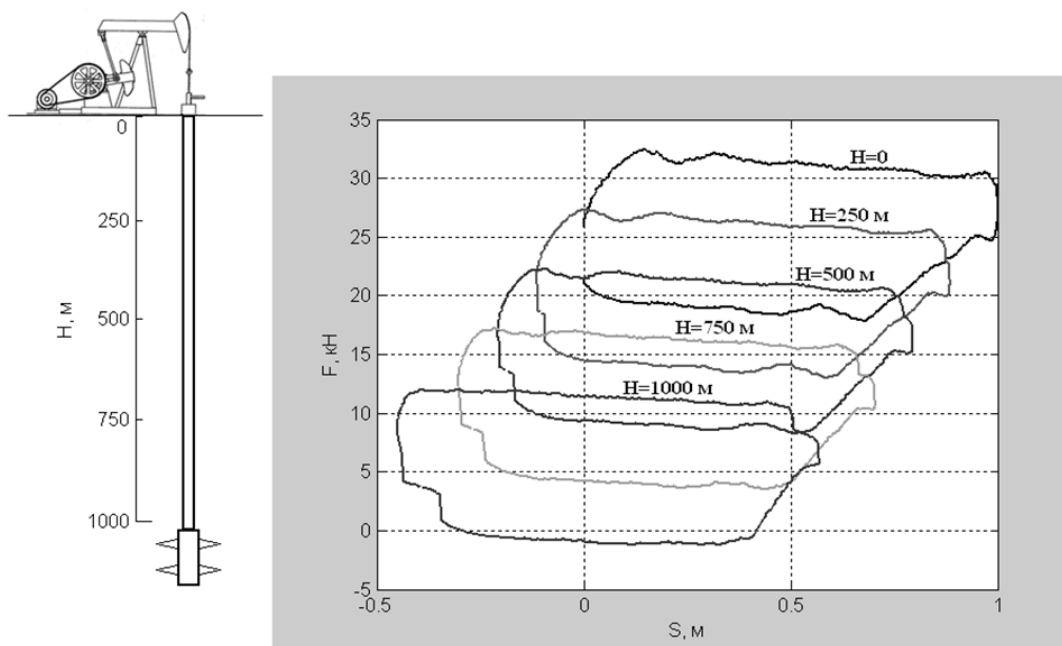


Рис. 4. Динамограммы скважины № 2898 НГДУ «Елховнефть» на различных глубинах

Для расчета потребляемой установкой ШГН мощности используется эмпирическая формула, предложенная Б. М. Плющом и В. О. Саркисяном [9]:

$$P_3 = \frac{10^3}{\eta_{пн}} \left(K_1 + \frac{K_2 \cdot F_{ж} \cdot S}{9,8} \right) \cdot N,$$

где K_1 – коэффициент, зависящий от типа и грузоподъемности СК; K_2 – коэффициент, зависящий от режима откачки и диаметра насоса; $\eta_{пн}$ – 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 из графиков устьевого и плунжерной динамограмм [10]. 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 :

$$\alpha_{под} = \frac{S_{пл}}{S}.$$

На основании приведенных выражений была получена модель удельного энергопотребления уста-

новки ШГН, включающая в себя подсистемы расчета эффективной механической мощности, потребляемой установкой ШГН от ЭД, P_3 , КПД ЭД при данной нагрузке η_3 и КПД двигателя привода СК за цикл качания $\eta_{пн}$, потребляемой из сети мощности с учетом сбалансированности СК P_{Σ} , теоретического дебита Q_t и практического дебита с учетом депрессии, продуктивности, скин-фактора и проницаемости.

На рис. 5 представлены результаты расчетов с использованием данной модели. Из графиков на рис. 5 видно, что наименьшее удельное энергопотребление достигается при наименьшей частоте качаний балансира и максимальной длине хода штока. Так, для скважины № 1526 наиболее экономичный режим эксплуатации достигается при длине хода штока 3 м и частоте качаний 4,3 мин⁻¹.

Следует отметить, что для обеспечения энергетической эффективности эксплуатации скважины необходимо выполнение ряда условий: работы ЭД и насоса в зоне наибольшего КПД, обеспечение высокой депрессии и отбор из скважины всего объема притекающей жидкости.

Таким образом, на основании проведенных исследований могут быть сделаны следующие выводы:

1. В настоящее время возрастает роль интеллектуальных систем управления скважинными насосами, позволяющих путем измерения технологических параметров оптимизировать процесс эксплуатации скважины, уменьшить нагрузки на оборудование, потребление электроэнергии и в целом снизить затраты нефтедобывающих предприятий.

2. На скважинах, эксплуатируемых ШГН, системой управления измеряются и анализируются такие технологические параметры, как ваттметрограмма, давление и температура на устье скважины, динамический уровень жидкости в скважине, но самым информативным параметром является динамограмма.

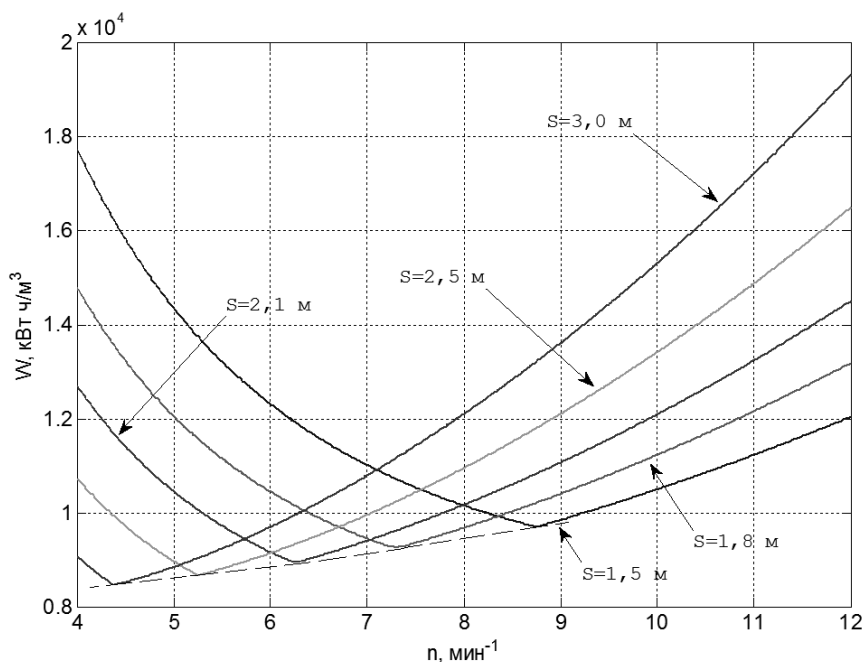


Рис. 5. Зависимость удельного энергопотребления установки ШГН от частоты качаний для различных длин хода штока

3. Данные динамометрирования позволяют определить и уточнить такие параметры, как состояние и режим работы погружного оборудования, расход добываемой скважинной жидкости, удельное энергопотребление электропривода насосной установки, а также оптимизировать режим эксплуатации скважины.

4. Разработана модель удельного энергопотребления установки ШГН, использующая для повышения точности расчетов данные ваттметрирования и динамометрирования установок ШГН.

С использованием разработанной модели установлено, что наименьшее удельное энергопотребление установки ШГН достигается при наименьшей частоте качаний балансира и максимальной длине хода штока.

Библиографические ссылки

1. Контроллеры и станции управления скважин, эксплуатирующихся штанговыми глубинными насосами / Г. А. Гулуев, Ас. Г. Рзаев, Я. Г. Алиев, М. Г. Резван, М. И. Хакимьянов // *Азербайджанское нефтяное хозяйство*. – 2014. – № 9. – С. 31–39.

2. Степанов П. И., Лагуткин С. В., Никитин Ю. П. Механические и электрические диагностические параметры элек-

трических приводов // *Интеллектуальные системы в производстве*. – 2014. – № 2 (24). – С. 59–63.

3. Gibbs S. G., Neely A. B. Computer Diagnosis of Down-Hole Conditions in Sucker Rod Pumping Wells. *J. of Petr. Tech.* January 1966. P. 93–98.

4. Касьянов В. М. Аналитический метод контроля работы глубинных штанговых насосов. – М.: ВНИИОЭНГ, 1973. – 95 с.

5. Gibbs S. G., Neely A. B. *Op. cit.*

6. Касьянов В. М. Аналитический метод контроля работы глубинных штанговых насосов. М., 1973. 95 с.

7. Gibbs S. G., Neely A. B. *Op. cit.*

8. Касьянов В. М. Аналитический метод контроля работы глубинных штанговых насосов. М., 1973. 95 с.

9. Хакимьянов М. И. Удельный расход электроэнергии при механизированной добыче нефти штанговыми глубиннонасосными установками // *Вестник УГАТУ*. – 2014. – Т. 18, № 1 (62). – С. 124–130.

10. Хакимьянов М. И., Светлакова С. В., Шафики И. Н. Диагностирование состояния штанговых глубинных насосов методом анализа плунжерных динамограмм // *Проблемы автоматизации технологических процессов добычи, транспорта и переработки нефти и газа: матер. Всерос. науч.-практ. интернет-конференции*. – Уфа: УГНТУ, 2013. – С. 44–48.

G. V. Milovzorov, DSc in Engineering, Professor, Udmurt State University

M. I. Khakimyanov, PhD in Engineering, Associate Professor, Ufa State Oil Technical University

T. A. Redkina, Senior lecturer, Kalashnikov ISTU

A. G. Milovzorov, PhD in Engineering, Associate Professor, Udmurt State University

Control system for intelligent oil wells operated by downhole method

We consider a control system for oil wells, the composition of technological sensors and functionality of software. The authors proposed a method of determining and optimizing the specific energy consumption for sucker rod pump units based on the analysis of dynamometer cards and wattmeter cards. The authors analyzed the dependence of energy consumption on the lift of oilwell fluid on such parameters of the pump unit as the length of the stroke and oscillation frequency, and the influence of the cyclical nature of the load and balance beam pumping unit.

Keywords: intellectual well, sucker rod pump, control system, dynamometer card, wattmeter card, specific energy consumption.