

Оптимизация сечения кабеля УЭЦН – простая и эффективная технология энергосбережения

Авторы: С.Б. Якимов (менеджер "ТНК-ВР Менеджмент", "Отдел механизированной добычи"), М.Н. Каверин (начальник отдела), В.П. Тарасов (главный специалист отдела)
(Филиал "ТНК-ВР Менеджмент", "Центр экспертной поддержки и технического развития БН Рид", г. Тюмень)

Рассмотрен вопрос повышения энергоэффективности фонда УЭЦН за счет увеличения сечения погружного кабеля. Выработан критерий подбора кабеля с учетом роста его стоимости при увеличении сечения. Представлены результаты оптимизации сечения кабеля в компании "ТНК-ВР" в период 2010–2011 гг.

Известно, что потери в силовом кабеле достигают 3...15 % от общей активной мощности, потребляемой установками электроцентробежных насосов (УЭЦН). Одной из простейших, но достаточно эффективных технологий повышения энергоэффективности при эксплуатации скважин с УЭЦН является снижение потерь в силовом кабеле путем увеличения площади сечения его жил. Однако применяемые на протяжении многих лет подходы при выборе сечения силового кабеля для питания погружного электродвигателя (ПЭД) были ориентированы в основном на подбор проводника допустимо малого сечения. В работе [1] перечислены основные факторы, учитываемые при подборе кабеля для УЭЦН в нефтяной отрасли России, существовавшие с 70-х гг. прошлого века, а именно:

- рабочее напряжение;
- допускаемые токовые нагрузки при температуре эксплуатации;
- конструктивное исполнение (круглое или плоское);
- наружный диаметр (размер) и масса;
- экономические показатели (цена и параметры надежности);
- обеспечение напряжения питания ПЭД.

Последний пункт является наиболее важным при выборе сечения кабеля и, для обеспечения легкого запуска ПЭД, всегда производится расчет падения напряжения в кабеле по формуле

$$U = 1,73 I_d R_{\text{ж}} \cos F,$$

где U – падение напряжения в кабельной линии, В;

I_d – номинальный ток двигателя, А;

$R_{\text{ж}}$ – электрическое сопротивление жилы кабельной линии, Ом;

$\cos F$ – коэффициент мощности электродвигателя.

В простейшем случае, когда сечение токопроводящих жил основного кабеля и кабеля-удлинителя отличаются незначительно, электрическое сопротивление жилы кабельной линии рассчитывается как электрическое сопротивление жилы основного кабеля

$$R_{\text{ж}} = (18,4/S_1)(1 + 0,004(T - 20)L_1),$$

где S_1 – сечение жил основного кабеля, мм²;

T – температура токопроводящих жил кабеля, °С;

L_1 – длина основного кабеля, км.

Расчет завершается сравнением напряжения, которое получается в результате вычитания падения напряжения в кабельной линии из величины напряжения на вторичной обмотке трансформатора и рабочего напряжения, необходимого для работы ПЭД [1]. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) определяют экономическую плотность тока для кабеля с медным сечением и резиновой или пластмассовой изоляцией при числе часов работы в год более 5000 тыс., равной 2,7 А/мм². В работе [2] автор, описывая процедуру определения потерь в кабеле, также ссылается на необходимость использования данного параметра, указывая, что предельная экономическая плотность тока для кабеля УЭЦН находится в пределах 2,5...2,7 А/мм². С тех пор, т. е. более 40 лет, этот порог экономической плотности тока используется в нефтяной промышленности в целом и в компании "ТНК-ВР" в частности и, очевидно, с учетом изменения стоимости электроэнергии и стоимости кабельных линий должен быть пересмотрен.

В работе [3] изложены подходы, применяемые разными западными компаниями по определению максимально допускаемых потерь мощности в кабельной линии:

– максимальный порог падения напряжения в кабеле – 100 В на 1000 м;

– максимальный порог падения напряжения в кабеле не должен превышать 5 % от напряжения на выходе питающего трансформатора на поверхности.

В компании "ТНК-ВР" для подбора сечения кабеля применялся порог максимального падения напряжения 100 В на 1000 м, т. е. тот же, что и многими западными компаниями, и порог максимальной плотности тока в соответствии с ПУЭ – 2,7 А/мм². Так как ни один из этих критериев не был прямо направлен на получение дополнительной прибыли от снижения потерь мощности, в целях снижения капитальных за-

трат применялся кабель с минимальным сечением, при котором вышеуказанные ограничения соблюдались. На практике это приводило к тому, что, например, для питания УЭЦН, спущенного на глубину 2500 м, при рабочем токе ПЭД 42 А и температуре пластовой жидкости 70 °С мог использоваться кабель сечением 3×16 мм². Ведь, при данных условиях расчетное падение напряжения составляло 90 В на 1000 м длины кабеля, т. е. было ниже рекомендуемого верхнего порога 100 В, а плотность тока составляла 2,63 А/мм² и укладывалась в нормы ПУЭ. Возможность снижения потерь активной мощности, равных для данного случая 19 кВт·ч, при выборе сечения кабеля не рассматривалась. Даже если бы критерий энергоэффективности и был рассмотрен, ввиду существовавших в предыдущие годы низких тарифов на электроэнергию, замена кабеля 3×16 мм² на кабель большего сечения была бы, скорее всего, экономически нецелесообразна.

Увеличение тарифов на электроэнергию, произошедшее в последние годы, изменило ситуацию и заставило пересмотреть целесообразность применения многих технологий, считавшихся до этого экономически малопривлекательными. В 2010 г., когда в компании "ТНК-ВР" начала реализовываться программа повышения энергоэффективности механизированной добычи нефти, проведенный анализ потенциалов снижения энергопотребления по узлам УЭЦН выявил высокие потери мощности в кабельных линиях. Стало очевидным, что для получения дополнительной прибыли в виде снижения затрат на электроэнергию необходимо пересмотреть подходы к выбору сечения кабеля. Оценка экономической целесообразности данного проекта сводится к оценке величины снижения операционных затрат на оплату электроэнергии после комплектации УЭЦН кабелем большего сечения и величины увеличения капитальных затрат на закупку кабеля. Как и для любой другой технологии, критерием эффективности применения является индекс рентабельности инвестиций – *PI* (индекс доходности дисконтированных инвестиций), который в общем виде рассчитывается как

$$PI = 1 + NPV/TIC,$$

где *NPV* – чистая приведенная стоимость (прибыль);
TIC – полные инвестиционные затраты проекта (затраты).

Экономическими службами компаний обычно производится ранжирование портфеля проектов по рентабельности инвестиций и определяется минимальный порог индекса *PI* для категорий технологических проектов. В 2010–2011 гг. минимальное значение индекса *PI* для проектов энергосбережения по ТНК-ВР было принято на уровне 1,5. Средний срок службы кабеля по компании составляет 3 года. С учетом этого отношение дисконтированного потока наличности от экономии затрат на электроэнергию в течение трех лет к абсолютным дисконтированным ин-

вестициям на увеличение стоимости закупки кабеля должно быть равно или выше 0,5.

Потери активной мощности в кабеле рассчитываются по формуле

$$\Delta P_{\text{каб.}} = 3 \cdot I_{\text{д}}^2 (18,4/S_1)(1 + 0,004 (T - 20)L_1).$$

Поскольку и стоимость кабеля, и потери мощности в нем прямо пропорциональны его длине, последняя не влияет на значения индекса *PI*, т. е., для примера, значение *PI* проекта замены кабеля сечением 3×16 мм² на 3×21 мм² в скважинах с глубиной спуска УЭЦН 1500 и 2500 м будет одинаково при условии равенства тока ПЭД и температуры кабеля. Если принять условие, что кабель увеличенного сечения будет спущен на ту же глубину и будет работать при той же температуре, потери мощности будут зависеть только от рабочего тока двигателя и диаметра сечения кабеля. Таким образом, для удобства выполнения практических расчетов по определению порогов экономически целесообразного увеличения сечения кабеля необходимо построить функции зависимости индекса рентабельности инвестиций *PI* от силы тока для разных диаметров кабеля. Такие зависимости и были построены для случаев замены кабеля меньшего сечения на кабель следующего большего выпускаемого сечения (рис. 1).

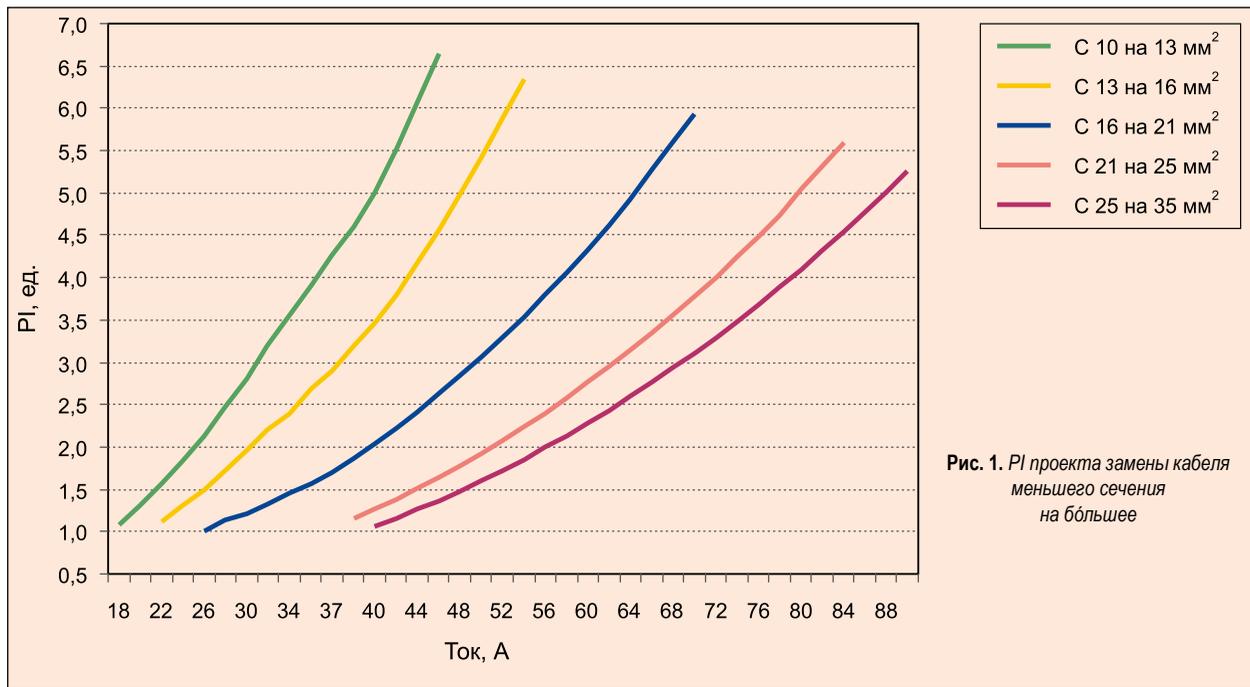
На основании построенных зависимостей можно легко найти значения силы тока, при которой становится экономически целесообразным замена кабеля с меньшим сечением на кабель следующего большего выпускаемого заводами сечения. Например, если после ранжирования проектов энергоэффективности по уровню рентабельности инвестиций экономическими службами будет определено пороговое значение *PI*, равное 2, технологические службы предприятия легко рассчитают, что пороговое значение силы тока для проекта замены кабеля сечением 25 мм² на 35 составляет 58 А. В 2010 г. для значения *PI*, равного 1,5, была построена матрица, позволяющая максимально упростить выбор сечения кабеля промышленным персоналом. Матрица подбора сечения кабеля показана в табл. 1.

Таблица 1

Матрица подбора сечения кабеля

Сечение жил кабеля, мм ²	Ток экономически целесообразного увеличения сечения кабеля, А	Предельная экономичная плотность тока, А/мм ²
10	22	2,1
13	26	1,9
16	35	2,1
21	44	2,0
25	49	1,9
35	Более 49	

Из табл. 1 можно найти оптимальные экономически обоснованные диапазоны применения кабеля раз-



личного сечения. Например, диапазон применения кабеля сечением 16 мм² находится между 26 и 35 А. Предельная экономически обоснованная плотность тока при сложившемся уровне цен на кабель разного сечения, тарифов на электроэнергию и принятом по компании "ТНК-ВР" индексе рентабельности инвестиций для проектов замены кабеля меньшего сечения на большее, следующего выпускаемого размера, равна в среднем 2 А/мм². Это значение плотности тока на 26 % ниже рекомендованного ПУЭ и было принято как пороговое по ТНК-ВР.

Для оперативного выявления скважин с высоким потенциалом снижения потерь в кабельных линиях к технологическому режиму в программе Excel был добавлен блок "Расчет кабеля" (табл. 2). По фактическим данным, заносимым технологом, таким, как рабочий ток, напряжение отпайки ТМПН, коэффициент мощности, производится расчет потребляемой УЭЦН активной мощности. При расчете потерь мощности в кабеле используются данные, содержащиеся в основной части технологического режима: температура пластовой жидкости и глубина спуска УЭЦН на конкретной скважине. Оптимальное сечение кабеля рассчи-

тывается с использованием определенной на текущий момент экономически обоснованной плотности тока по формуле

$$S_1 = I_d / J_{\text{опт.}}$$

где $J_{\text{опт.}}$ – экономичная плотность тока, А/мм².

Разработанный алгоритм используется технологом цеха для выявления скважин с высоким потенциалом энергосбережения и планирования потребности в закупке кабеля с оптимальным сечением. Как видно из табл. 2, увеличение сечения кабеля с 16 до 21 мм² для УЭЦН с приведенными выше параметрами работы позволяет получить за год снижение потерь мощности в 45,1 тыс. кВт·ч, что эквивалентно экономии 94,6 тыс. р.

В январе 2010 г. с применением описанного алгоритма были проведены расчеты по 13421-й скважине с УЭЦН компании "ТНК-ВР". Увеличение сечения кабеля оказалось экономически целесообразным на 2808 скважинах с потенциальным эффектом энергосбережения 78714 тыс. кВт·ч. Расчетный эффект на скважину составил 3,2 кВт·ч. Анализ структуры парка кабельных длин с точки зрения предельной экономиче-

Таблица 2

Блок "Расчет кабеля"

Рабочий ток $I_{\text{раб.}}$, А	Напряжение отпайки на ТМПН $U_{\text{тмпн}}$, В	$\cos F$	Площадь поперечного сечения жил кабеля S , мм ²	Температура, °С	Длина кабеля, м	Расчетная потребляемая мощность N , кВт	Потери в существующем кабеле $\Delta P_{\text{каб.}}$, кВт	Плотность тока, А/мм ²	Оптимальное сечение КРБК, мм ²	Потери в оптимальном кабеле $\Delta P_{\text{опт.}}$, кВт	Годовая экономия электроэнергии	
											тыс. кВт·ч	тыс. р.
42	2000	0,8	16	70	2500	116	21,0	2,63	21	15,9	45,1	94,6

ской плотности тока, равной 2 А/мм², сводные результаты которого показаны на рис. 2, позволил выявить основные направления оптимизации парка кабельных линий:

1. При текущем уровне рабочих токов ПЭД применение кабелей сечением 10 и 13 мм² в компании экономически нецелесообразно.

2. Структура парка кабеля должна быть оптимизирована путем увеличения закупок кабеля сечением 21, 25 и 35 мм².

В течение 2010–2011 гг. на части выявленных с помощью блока расчета кабеля скважин, с высокой плотностью тока, были произведены 923 операции по комплектации УЭЦН кабелем большего сечения. Достигнутая экономия электроэнергии составила 17395 тыс. кВт·ч в год. Результаты проекта оптимизации сечения кабеля УЭЦН по предприятиям ТНК-ВР показаны на рис. 3.

Из представленных данных видно, что наиболее успешно проект был реализован в ОАО "ВНГ" ("Варьганнефтегаз"). На рис. 4 представлена диаграмма изменения структуры парка кабельных линий по сечению по ОАО "ВНГ" в период 2010–2011 гг. Как видно, произошло увеличение доли кабеля сечением 25 мм² с 3,9 до 20,9 %. В 2012 г. работа по оптимизации сечения кабеля на данном предприятии будет закончена. Фактический достигнутый эффект снижения энергопотребления по ОАО "ВНГ" – 2,9 кВт·ч на скважину.

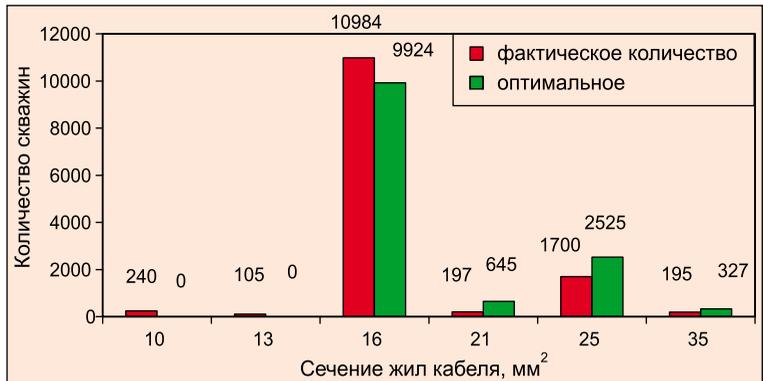


Рис. 2. Анализ структуры фонда кабельных линий по сечению

Подобно показанному примеру по ОАО "ВНГ", проводимая технологическая политика внесла изменения в структуру применяемого кабеля в целом по компании. Так, за 2 года доля кабельных линий сечением 10 и 13 мм² сократилась на 1 %, доля кабеля сечением 25 и 35 мм² увеличилась на 5 и 1 %, соответственно. Доля наиболее широко применяемого кабеля 16 мм² снизилась на 5 %.

Среднее фактически достигнутое снижение потерь мощности по проекту увеличения сечения кабеля на одну скважину составило 2,2 кВт, с учетом увеличения затрат на закупку кабеля величина PI составила 1,52. Фактически полученное снижение мощности оказалось немного ниже расчетного в целом по проекту. Это объясняется значительным отставанием в замене кабеля сечением 25 мм² на

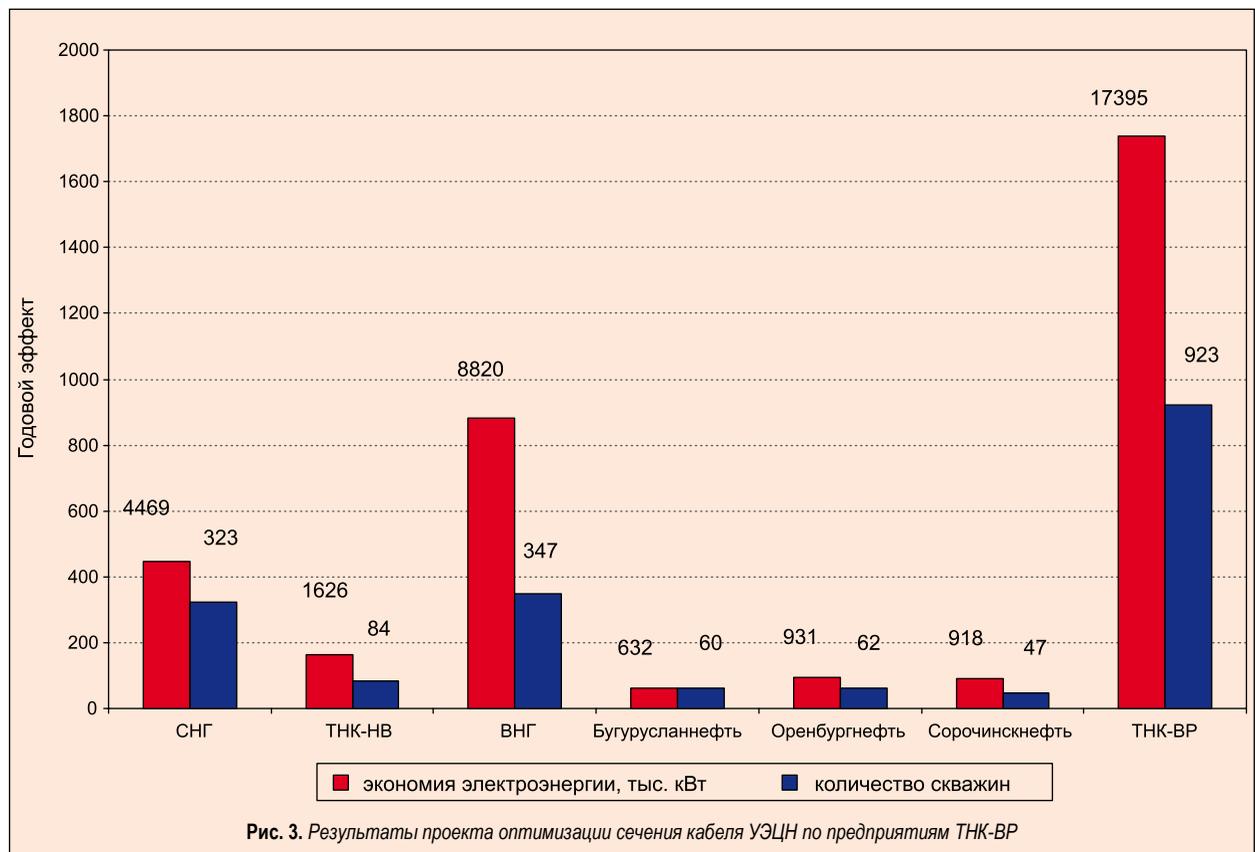


Рис. 3. Результаты проекта оптимизации сечения кабеля УЭЦН по предприятиям ТНК-ВР

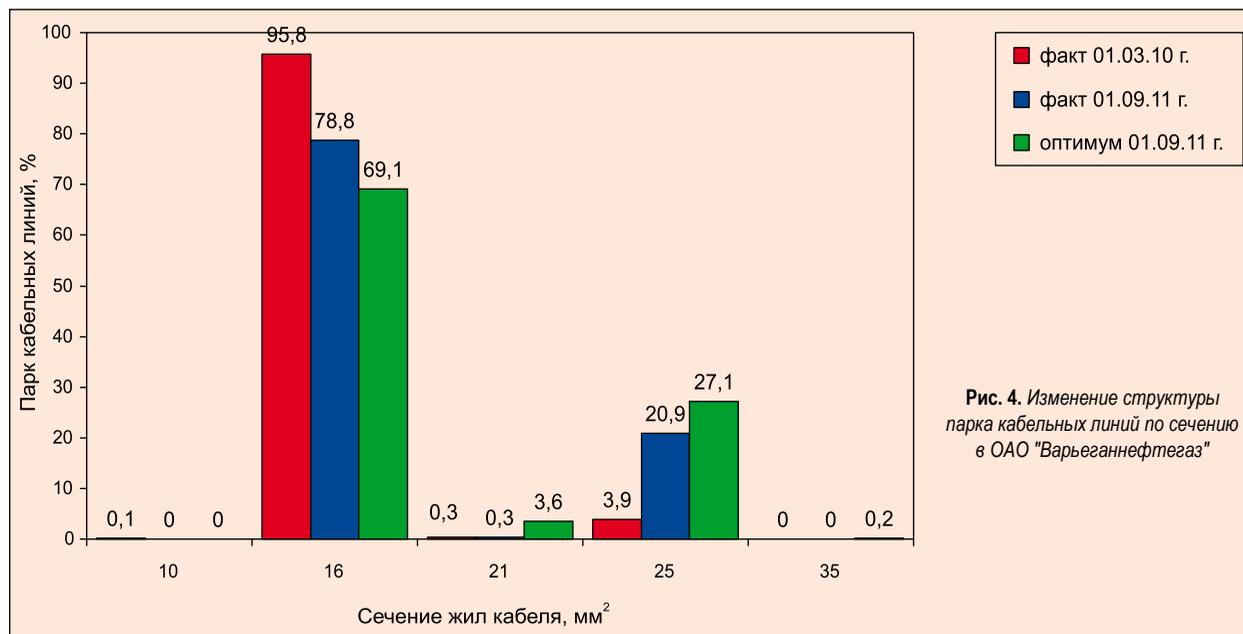


Рис. 4. Изменение структуры парка кабельных линий по сечению в ОАО "Варьеганнефтегаз"

кабель 35 мм², при котором расчетный эффект на много превышает средний.

На первый взгляд, достигнутый технологический эффект не впечатляет своей величиной и находится на уровне 1...7 % от потребляемой активной мощности. Однако следует понимать, что технологий энергосбережения, способных обеспечить приемлемую для ТНК-ВР доходность инвестиций, не так уж много. Например, в [4] показано, что фактический уровень снижения энергопотребления при использовании высокотехнологичных вентильных двигателей составляет в среднем 7 %. Рентабельность инвестиций при использовании вентильных двигателей, при условии закупки в комплекте со станцией управления, ниже принятого в ТНК-ВР порога. Технология же применения кабеля оптимального сечения предельно проста, не требует дополнительных инвестиций, эффект энергосбережения не изменяется со временем. Снижение плотности тока также увеличивает надежность кабельных линий, что в конечном счете позволяет снизить количество отказов кабеля и дает дополнительную выгоду от снижения затрат на замену УЭЦН. Что лучше, получить 2,2 кВт при минимальных капитальных затратах на проекте замены кабеля или 4...7 кВт при использовании дорогостоящего вентильного двигателя? Пока, судя по объемам внедрения, простые технологии энергосбережения в ТНК-ВР вне конкуренции.

Выводы

1. Предельная экономическая плотность тока при сложившихся в 2010–2011 гг. соотношениях стоимости электроэнергии и стоимости кабеля разного сечения составляет 2 А/мм². При превышении этого порога экономически выгодно перейти на применение кабеля большего сечения.
2. Технология оптимизации сечения кабеля является самой надежной и простой технологией энергосбережения, обеспечивающей при этом приемлемый уровень рентабельности инвестиций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скважинные насосные установки для добычи нефти / В.Н. Ивановский, В.И. Дарищев, А.А. Сабиров [и др.]. – М.: ГУП Изд-во "Нефть и газ" РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. – С. 256.
2. Богданов А.А. Погружные центробежные насосы для добычи нефти. – М.: Недра, 1968. – С. 254.
3. SPE 21693 S.W. French, Cawley, Gillespie & Assocs, Inc. Optimum Cable Selection for Electrical Submersible Pumps, 1991.
4. Якимов С.Б., Каверин М.Н., Тарасов В.П. Анализ эффективности применения вентильных двигателей ПК "Борец" для снижения энергопотребления в ТНК-ВР // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2011. – № 3. – С. 44.

ТНК-ВР

"ТНК-ВР Менеджмент", "Отдел механизированной добычи"
 125284 Россия, г. Москва, ул. Беговая, 3, стр. 1.
 Тел.: 8 (495) 777-77-07, доб. 2487.
 E-mail: SBYakimov@tnk-bp.com;

Филиал "ТНК-ВР Менеджмент", "Центр экспертной поддержки и технического развития БН Рид", г. Тюмень
 625000 Россия, г. Тюмень, ул. Первомайская, 6.
 Тел.: 8(3452) 38-00-00, доб. 7059, 7032.
 E-mail: MNKaverin@tnk-bp.com E-mail: VPTarasov@tnk-bp.com