

УДК 622.243.92.056.3-027.45(045)(476)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТЕРМОСТОЙКИХ ВИНТОВЫХ ЗАБОЙНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ БУРЕНИИ СВЕРХГЛУБОКИХ СКВАЖИН**

Матвеевко Д.С. (Белорусский научно-исследовательский и проектный институт нефти РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», г. Гомель, Беларусь),  
Асадчев А.С. (УО «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», г. Гомель, Беларусь)

*Статья посвящена вопросу исследования надежности и долговечности термостойких винтовых забойных двигателей (ВЗД) при бурении сверхглубокой скважины № 1 Предречицкой в РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» в сложных геолого-технических условиях, характеризующихся повышенной забойной температурой и сложным профилем проводки скважины.*

Ключевые слова: *надежность, долговечность, винтовой забойный двигатель, термостойкий, сверхглубокая скважина, бурение, наработка на отказ, элемент механической системы.*

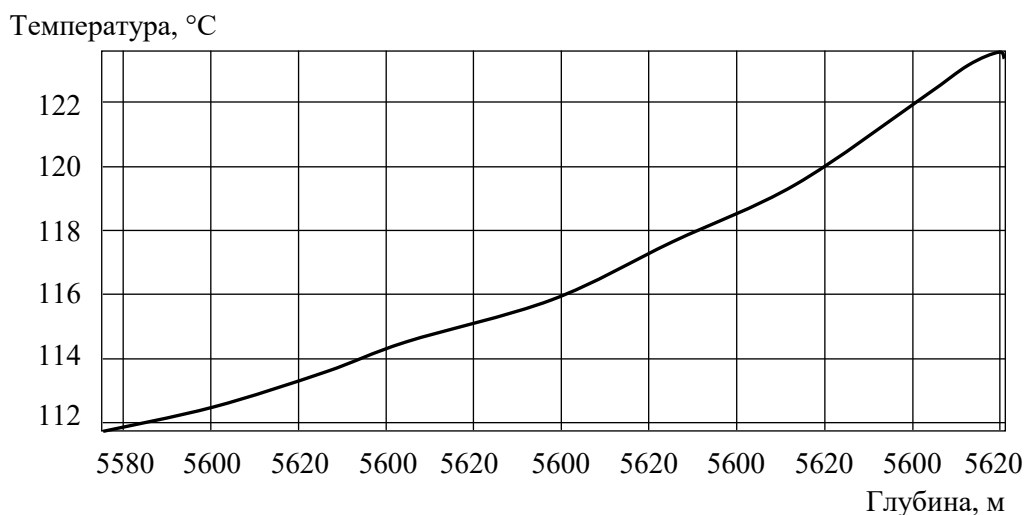
### **Введение**

Скважина № 1 Предречицкого месторождения – самая глубокая скважина Беларуси с глубиной 6755 м (проектная – 6680 м). На ее бурение ушел 901 день. Строительство скважины выполнялось на буровом станке ESTA III-450T-ST-AC производства Ventec грузоподъемностью 450 т. Для проведения данных работ применялось нестандартное оборудование. Сложные геолого-технические условия бурения данной скважины: большая глубина, высокая температура до +138 °С, низкая устойчивость стенок скважины и необходимость применения бурового соленасыщенного раствора высокой плотности – не позволили производить бурение традиционным способом. Это первая скважина в Беларуси, имеющая такую глубину, и ее можно смело отнести к разряду сверхглубоких.

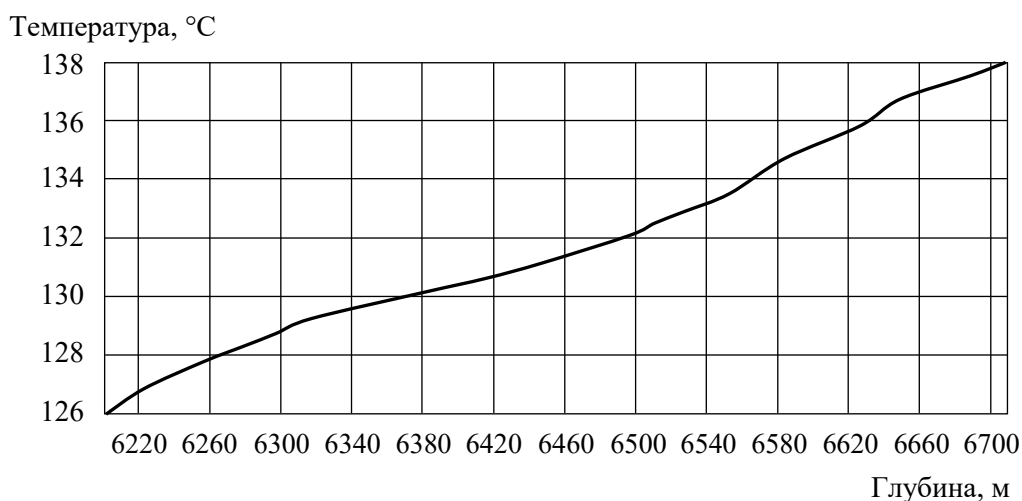
### **Исследование надежности и долговечности термостойких ВЗД**

Как правило, ВЗД эксплуатируются при использовании буровых растворов плотностью не более 2000 кг/м<sup>3</sup>, включая азрированные растворы (и пены при капитальном ремонте скважин), с содержанием песка не более 1 % по весу, максимальным размером твердых частиц не более 1 мм, при забойной температуре не выше 100 °С.

Из-за высокой температуры на забое (рисунки 1, 2) применение обычных ВЗД стало невозможным по причине относительно небольших зазоров между статором, выполненным в виде обрешиненного корпуса винтового двигателя, и металлическим ротором. Поэтому, было принято решение о применении специально адаптированных ВЗД для данных условий бурения – ВЗД в термостойком исполнении с увеличенным радиальным зазором между статором и ротором, который в условиях повышенных забойных температур становится допустимым для работы за счет расширения резины при нагреве [1].

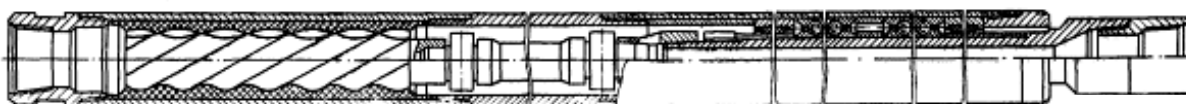


**Рисунок 1. – Изменение температуры от глубины скважины № 1 Предречицкая в интервале замера 5575-5781 м**



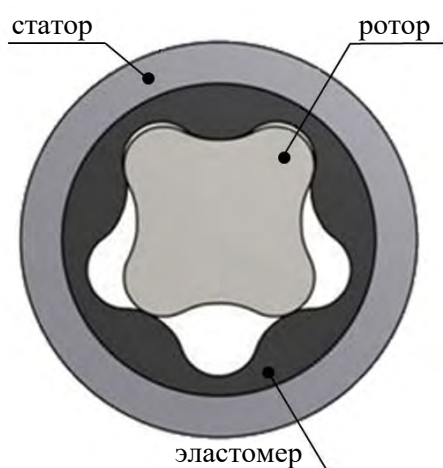
**Рисунок 2. – Изменение температуры от глубины скважины № 1 Предречицкая в интервале замера 6200-6710 м**

По принципу действия ВЗД является объемной (гидростатической) машиной, многозаходные рабочие органы которой представляют собой планетарно-роторный механизм с внутренним косозубым зацеплением (рисунок 3).



**Рисунок 3. – Схематическое устройство ВЗД**

Рабочими органами двигательной секции являются многозаходные винтовые ротор и статор (рисунок 4). Внутри стального статора привулканизирована резиновая обкладка с винтовыми зубьями левого направления. На наружной поверхности стального ротора нарезаны зубья того же направления. Число зубьев ротора на единицу меньше числа зубьев статора, а отношение шагов винтовых линий пропорционально числу зубьев.



**Рисунок 4. – Устройство рабочей пары ВЗД**

зобщенных контактными линиями, ротор рабочих органов совершает планетарное движение вокруг оси статора, обкатываясь по зубьям статора в направлении «против часовой стрелки», и вращаясь при этом вокруг собственной оси в направлении «по часовой стрелке». За счет разности количества зубьев статора и ротора их продольные оси не совпадают на величину эксцентриситета  $\varepsilon$ .

Планетарное несоосное движение косозубого стального ротора внутри обрезиненного статора рабочих органов ВЗД преобразуется за счет компенсации эксцентриситета  $\varepsilon$  в соосное вращение цилиндрического вала шпинделя ВЗД при помощи обычного (стержневого) или шарнирного двухмуфтового торсиона, передающего момент силы и гидравлическую нагрузку от ротора на вал шпинделя.

На скважине № 1 Предречицкая использовалось два типоразмера ВЗД в термостойком исполнении: диаметром 106 мм (ДРЗ-106М.4/5.60 и ДРЗ-106М.7/8.37) и диаметром 95 мм (ВЗД ДРЗ-95М.6/7.28) [2], технические характеристики которых приведены в таблице 1.

Бурение производилось в интервале 5774-6755 м, охватывающем:

- межсолевые ( $D_3ptr-dm$ ) отложения, представленные в основном мергелями, глинами аргиллитоподобными с прослоями глинистых известняков;
- нижнесоленосные ( $D_3lv$ ) отложения, представленные солью каменной, с чередованием пластов и пропластков глин, мергелей и известняков глинистых;
- подсолевые карбонатные отложения, в верхней части ( $D_3ev$ ) представленные глинами аргиллитоподобными, мергелями, известняками сульфатизированными, ангидритами; в нижней части ( $D_3vr-sr$ ) представленные коричневато-серыми, серыми доломитами, неравномерно ангидритизированными, трещиноватыми, с прослоями ангидритов, мергелей, редко глин с редкими пористыми участками и единичными кавернами, размером до 1 см;
- подсолевые терригенные ( $D_3ln-D_2vib-pr$ ) отложения, представленные в основном, песчаниками и алевролитами с прослоями аргиллитов, известняков, доломитов, реже гравелитов;
- верхнепротерозойские (PR2) отложения, несогласно залегающие на кристаллическом фундаменте и представленные аргиллитами бурыми, буровато-серыми, плотными, алевролитами кварцевыми буровато-красными и песчаниками розовато-красными, бурыми, кварцевыми, пелитоморфно-микрзернистыми, плотными, крепкими;

Эластомер – специальная резина, устойчивая к абразивному воздействию и работоспособная в среде бурового раствора. Ротор изготавливается из легированной стали с износостойким покрытием. Рабочая пара изготавливается с определенным натягом зубчатого зацепления ротор-статор. Значение натяга зависит от диаметральных и осевых размеров рабочей пары, свойств рабочей жидкости (бурового, промывочного растворов), температуры на забое, свойств эластомера и оказывает существенное влияние на характеристики ВЗД и его ресурс работы.

Под действием неуравновешенных гидравлических сил, обусловленных разностью давлений принудительно подаваемого бурового раствора в соседних камерах, ра-

- отложения кристаллического фундамента ( $AR + PR1$ ), сложенные гранито-гнейсами с прослоями аргиллитов и включениями темно-цветных минералов (амфиболов).

Таблица 1. – Технические характеристики ВЗД диаметром 95, 106 мм

Параметры		ВЗД ДРЗ-95М.6/7.28	ВЗД ДРЗ-106.4/5.60	ВЗД ДРЗ-106.7/8.37
Диаметр корпуса наружный, мм		95		106
Длина двигателя, мм		5345		5457
Масса двигателя, кг		220	264	275
Длина шпинделя до места искривления, мм		1310		1352
Диапазон углов искривления, град		0°–2°30′		
Допустимая осевая нагрузка, кН		50		80
Заходность секции рабочих органов, $Z_p/Z_{cm}$		6/7	4/5	7/8
Число шагов статора		2,8	6,0	3,7
Длина активной части статора, мм		3000		
Рабочий объем ВЗД, л/об		3,6	1,8	3,8
Расход рабочей жидкости, л/с		5-10		6-12
Частота вращения вала на холостом ходу, об/мин		84-168	198-396	96-192
Параметры в режиме максимальной мощности	Дифференциальный перепад давления, МПа	5,4	8,5-10,5	4,9-9,0
	Момент силы, кН·м	1,5-2,3	2,0-3,0	2,3-3,5
	Мощность, кВт	10-28	30-94	15-45

При бурении скважины № 1 Предречицкой применялось следующее оборудование.

**ВЗД ДРЗ-106М.4/5.60** диаметром 106 мм (3 шт.) применялись в интервале 5774-6463 м в компоновке с долотами истирающего типа ИСМ-138,1 мм. Всего данными ВЗД выполнено 4 рейса, пробурено 634 м горных пород. Общая наработка на 1 двигатель составила 130,8 часа. Все 4 отказа данных ВЗД обусловлены критическим износом рабочих органов (РО), основных элементов механической системы.

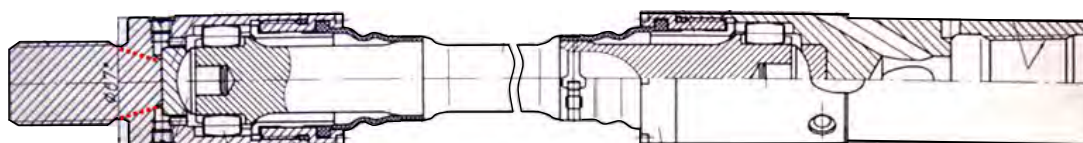
**ВЗД ДРЗ-106М.7/8.37** диаметром 106 мм (3 шт.) применялись в интервале 6367-6726 м в компоновке с долотами ИСМ 138,1 мм и У6-138,1 мм, а также с бурильными головками истирающего типа У-120,6/67СТ-34. В ходе 22 рейсов было пробурено 283 м горных пород. Общая наработка на 1 двигатель составила 63,5 часа. За это время произошло 6 сломов торсиона (элемента механической системы) по причине высоких знакопеременных нагрузок при эксплуатации ВЗД в сложных скважинных условиях.

Выборочные фотоматериалы со сломом хвостовиков шарнирных торсионов во время ревизий ВЗД в термостойком исполнении представлены на рисунках 5-7.

В связи с непредусмотренным проектом увеличением глубины забоя скважины № 1 Предречицкая с 6680 м до 6755 м и отсутствием в наличии работоспособного парка термостойких ВЗД диаметром 106 мм, было принято решение о возможности применения ВЗД ДРЗ-95М.6/7.28 (б/у), собранных по схеме селективной сборки [3], которые в процессе предварительной отработки получили износ контактирующих поверхностей статора и ротора в пределах, обеспечивающих гарантированный зазор между статором и ротором, составляющий 1,5-2 мм.



**Рисунок 5. – Виды фактического слома хвостовика шарнирного торсиона ВЗД ДРЗ-106.7/8 № 161/690**



**Рисунок 6. – Направление слома хвостовика шарнирного торсиона шпинделя ВЗД (показано штриховой красной линией на общей схеме шарнира)**



**Рисунок 7. – Направление сломов хвостовиков шарнирного торсиона шпинделя ВЗД (показано штриховой красной линией на общем фото неразрушенного шарнира)**

При этом селективная сборка подразумевала подбор отработанных статоров и роторов рабочей пары ВЗД ДРЗ-95М.6/7.28 с различной степенью износа контактирующих поверхностей и выполнением соответствующих замеров. На базе производственного обеспечения (БПО) управления по повышению нефтеотдачи пластов и ремонту скважин (УПНПиРС) РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» была произведена ревизия двух ВЗД ДРЗ-95М.6/7.28: № 362/389 и № 26/359, наработка на которых составила соответственно 172,50 ч и 113 ч. В ходе ревизии произведена селективная сборка единого ВЗД ДРЗ-95М.6/7.28 № 38/с359-р362.

После осуществления селективной сборки у собранного ВЗД снималась энергетическая характеристика на стенде СОИ-250, производства ОАО НПО «Буровая техника» Пермский филиал ВНИИБТ (рисунок 8), которая определяла реальную возмож-



ность его дальнейшей работы. Снятые рабочие характеристики ВЗД имели удовлетворительные значения.

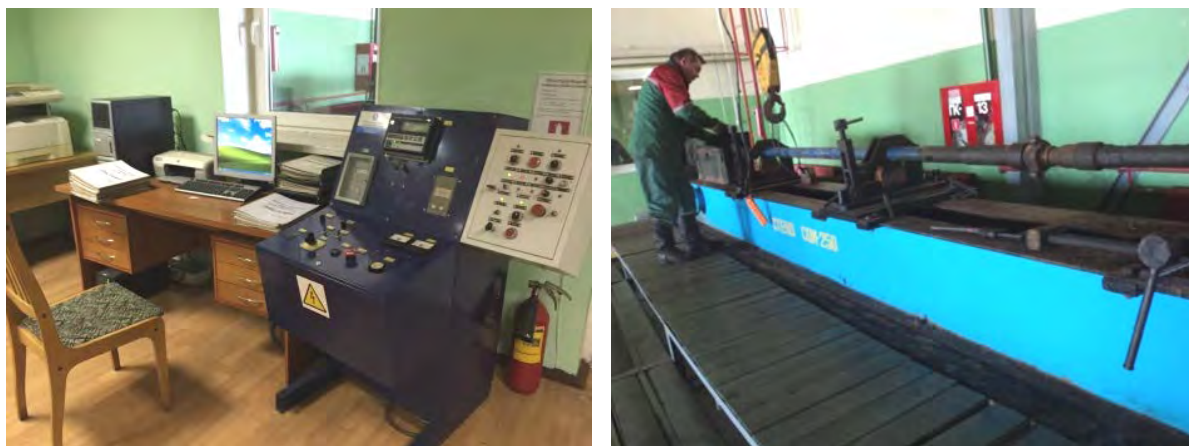


Рисунок 8. – Стенд СОИ-250

ВЗД ДРЗ-95М.6/7.28 диаметром 95 мм (2 шт.) применялись в интервале 6726-6755 м в компоновке с долотами истирающего типа ИСМ-138,1 мм; 4<sup>3</sup>/<sub>4</sub> VI-1213. Данными ВЗД выполнено 2 рейса и пробурено 29 м горных пород. Общая наработка на 1 двигатель составила 37,8 часа, без учета наработки на статор и ротор данных двигателей до селективной сборки. Отработка ВЗД обусловлена критическим износом статора и ротора РО.

Вся подробная информация о ходе проведения работ с применением ВЗД диаметром 95 мм и 106 мм при бурении ствола диаметром 139,7 мм в скважине № 1 Предречицкая приведена в таблице 2.

### Выводы и рекомендации

При бурении сверхглубокой скважины №1 Предречицкой в интервале 5774-6755 м использование роторного способа бурения вследствие большой протяженности ствола скважины и сложности профиля было невозможным, поэтому в целях обеспечения безаварийности проведения работ по бурению и обеспечению необходимых параметров траектории выбран способ бурения с использованием ВЗД в термостойком исполнении.

В ходе проводки ствола скважины № 1 Предречицкой – самой глубокой скважины в Республике Беларусь – подтверждена возможность применения термостойких ВЗД ДРЗ-106 и ДРЗ-95 с гарантированным зазором в рабочих органах для компенсации термических изменений контактирующих расширяющихся элементов (статор-ротор) ВЗД.

Достигнутая наработка на термостойкие ВЗД при бурении в сложных геологических условиях бурения сверхглубокой скважины № 1 Предречицкая, обусловленных высокой температурой на забое, повышенной плотностью бурового раствора и особенностями траектории, составила:

- ДРЗ-106М.4/5.60 – 130,8 часа;
- ДРЗ-106М.7/8.37 – 63,5 часа;
- ДРЗ-95М.6/7.28 – 37,8 часа.

Таблица 2. – Ведомость отработки ВЗД диаметром 106 и 95 мм в скважине № 1 Предречицкая

Порядковый номер ВЗД в группе	Заходность ротора/статор	Учетный номер ВЗД (рабочей пары)	Интервал бурения, м		Количество рейсов ВЗД в интервале, шт	Количество отказов ВЗД в интервале, шт	Общая проходка в интервале, м	Механическая скорость бурения в интервале, м/ч	Время бурения и циркуляции бурового раствора при работе ВЗД, ч	Наработка ВЗД до отказа в том числе:		Общая наработка ВЗД в том числе:		Количество ремонтов до списания, шт в том числе:		Причины подъема и краткое описание состояния ВЗД			
			от	до						рейсов	часов	рейсов	часов	капитальных (КР)	текущих (ТР)				
1		161/271	5774	6305	1	1	531	2,73	251,16	1	531	251	1	531	251	0	0	Отсутствие углубления При разборке выявлена необходимость проведения КР шпинделя 161 и отбраковки РП 271 из-за износа резиновой оболочки статора с последующей ее заменой	
2	4/5	16/270	6340	6367	1	1	27	0,74	58,34	1	27	58,34			0	1	Рост давления, зашламование Проведен ТР, проверка ВЗД на стенде СОИ-500, годен Рост давления, вал не вращается		
Итого №2:			6387	6393	1	2	6	2,00	10	1	6	10			1	0		Рост давления, вал не вращается	
3		164/269	6393	6463	1	1	70	1,11	73	1	70	73	1	70	73	0	0	Рост давления, отсутствует углубление, зашламование твердой фазой раствора, вал не вращается	
Итого 3 шт. ВЗД ДРЗ - 106М с заходностью 4/5 (термостойкие):			5774	6463	4	4	634	2,14	392,5	1,33	211,3	130,8	1,33	211,3	130,8	1	1	Отказы и списание ВЗД обусловлены критическим износом рабочего органа (РО)	
<b>II-я группа ВЗД ДРЗ - 106М.4/5.60 диаметром 106 мм (высокооборотные)</b>																			
<b>III-я группа ВЗД ДРЗ-106М.7/8.37 диаметром 106 мм (с нормальной частотой вращения)</b>																			
1	7/8	147/689	6367	6372	1	1	5	0,39	37,68	1	5	37,68				1	0	Нет углубления, падение давления 1-й слом шарнирного торсона шпинделя	
			6547	6554	1	2	7	0,46	22,66	1	7	22,66				0	1	Рост давления, увеличенный люфт	
			6579	6602	1	3	23	0,48	63,86	0	23	63,86				0	0		
			6602	6609	1	4	7	0,40	42,7	0	7	42,7				0	0		
			6609	6635	1	5	1	26	0,38	96,54	1	26	96,54				1	0	Низкая скорость бурения При ревизии: на поверхности ротора имеются следы промыва буровым раствором, на обкладке статора имеются многочисленные поперечные риски. Из-за отсутствия термостойкого ЗИП собраны ВЗД 147/689 (6/5)
			6698	6698	1	6	1	0	3,70	13	1	0	13				1	0	Отсутствие углубления, падение давления 6-й слом торсона
			6698	6701	1	7	1	3	0,29	16,17	1	3	16,17				1	0	Отсутствие углубления, падение давления, слом шпинделя переводника на УКР
			6701	6710	1	8	1	9	0,24	42,85	1	9	42,85				1	0	
			6710	6726	1	9	1	16	0,26	67,84	1	16	67,84				1	0	Отсутствие углубления, увеличенный люфт вала
			Итого № 1:			6367	6726	9	7	96	0,34	403,3	1,3	14	57,6	9	96	403,3	6

Окончание таблицы 2

Порядковый номер ВЗД в группе	Заходность ротор/статор	Учетный номер ВЗД № шпинделя/№ РП (рабочей пары)	Интервал бурения, м		Количество рейсов ВЗД в интервале, шт	Номер рейса ВЗД при наступлении его отказа	Количество отказов ВЗД в интервале, шт	Общая проходка в интервале, м	Механическая скорость бурения в интервале, м/ч	Время бурения и циркуляции бурового раствора при работе ВЗД, ч	Наработка ВЗД до отказа			Общая наработка ВЗД до списания			Количество ремонтов до списания, шт		Краткое описание состояния ВЗД		
			от	до							рейсов	метров	часов	рейсов	метров	часов	капитальных (КР)	текущих (ТР)			
2		161/690	6372	6387	1	1	15	1,67	13,17	1	15	13,17	1	0	0	0	0	0	Отсутствие углубления 2-й слом торсона		
			6554	6554	1	2	0	0	0,00	12,16	0	0	12,16	0	0	0	0	0			
			6554	6560	1	3	0	6	0,29	28,51	0	6	28,51	0	0	0	0	0		0	
			6560	6579	1	4	1	19	0,48	47,85	1	19	47,85	1	0	1	0	0		0	0
3	7/8	87/691	6647	6698	1	5	0	51	0,56	108,87	0	51	108,87	0	0	0	0	0	Отсутствие углубления до забоя, очень легкое вращение вала шпинделя, 4-й слом торсона		
			6698	6698	1	6	1	0	4,02	22,83	1	0	22,83	1	0	1	0	0		0	
			6372	6698	6	3	0,51	233,39	2	6	14	6	91	233,39	3	0	0	0		0	
			6387	6387	1	1	1	0	0,00	4,34	1	0	4,34	1	0	0	0	0		0	0
			6463	6482	1	2	0	19	0,93	29	0	19	29	0	0	0	0	0		0	0
			6482	6488	1	3	0	6	2,40	6,5	0	6	6,5	0	0	0	0	0		0	0
			6488	6494	1	4	0	6	1,33	10,17	0	6	10,17	0	0	0	0	0		0	0
			6494	6505	1	5	0	11	1,43	26,18	0	11	26,18	0	0	0	0	0		0	0
			6505	6547	1	6	1	42	0,78	64,19	1	42	64,19	1	0	1	0	0		0	0
			6635	6647	1	7	1	12	0,30	48,35	1	12	48,35	1	0	1	0	0		0	0
			6387	6647	7	3	0,75	188,73	2,33	13,7	27	7	96	189	2	1	0	0		0	0
Итого 3 шт. ВЗД ДРЗ - 106М с заходностью 7/8 (термостойкие):			6367	6726	22	13	283	0,48	825,42	1,69	21,77	63,494	7,3	275,13	3,7	1	1	0	0	0	
Итого 6 шт. ВЗД ДРЗ - 106:			5774	6726	26	17	937	1,06	1217,92	1,53	55,12	71,642	4,3	203	2,3	1	1	0	0	0	
III-я группа ВЗД ДРЗ-95М. 6/7,28 диаметр 95 мм																					
1	6/7	38/с359-р362 (6/y)	6726	6753	1	1	1	27	0,44	64,53*	1	27	64,53	1	27	64,53	1	0	0	0	
2		43/378 (6/y)	6753	6755	1	1	1	2	0,86	11*	1	2	11	1	2	11	1	0	0	0	
Итого 2 шт. ВЗД ДРЗ-95М с заходностью 6/7 (цетермостойкие):			6726	6755	2	2	29	0,46	75,53	1	14,5	37,8	1	14,5	37,8	1	0	0	0	0	

\* - наработка до селективной сборки ВЗД ДРЗ-95М.6/7,28: 38/с359-р362 (6/y) – статор 113 час, ротор 172,5 часов; 43/378 (6/y) – 39 часов.



В процессе бурения установлено, что двигатели ДРЗ-106М.7/8.37, как более моментоемкие, способствуют увеличению отказов ВЗД за счет слома элементов (хвостовиков) шарнирного торсиона и требуют увеличения диаметра последних для повышения надежности и долговечности работы ВЗД.

В условиях необходимости бурения нижних интервалов глубоких скважин с повышенной температурой на забое (свыше 130 °С) и при использовании буровых растворов повышенной плотности рекомендуется использовать ВЗД, оснащенные рабочими органами (статор и ротор), собранными по схеме селективной сборки с обеспечением в них гарантированного зазора в пределах 1,5-2 мм.

#### Список использованных источников

1. Бурение высокооборотным турбобуром Т6-3/4 с импрегнированным долотом на глубине 5780-6340 м / М.Г. Бобров [и др.] // Бурение и нефть. – 2016. – Вып. № 2. – С. 38-40.

2. Надежность и долговечность гидравлических забойных двигателей / Д.С. Матвеев, А.С. Асадчев // Горная механика и машиностроение. – 2016. – № 1. – С. 49-56.

3. Испытания винтовых забойных двигателей с различным покрытием роторов рабочих пар в УПНПиРС / А.С. Асадчев [и др.] // Поиск и освоение нефтяных ресурсов Республики Беларусь: сб. науч. тр.: в 2 ч. / БелНИПИнефть. – Гомель, 2004. – Вып. 5, Ч. 2. – С. 158-168.

---

**Matveenko D.S., Asadchev A.S.**

#### **Research of reliability and durability of heat-resistant screw bottomhole engines by drilling super-deep wells**

*The article is devoted to study of reliability and durability of the heat-resistant screw bottomhole engines (SBE) by drilling the superdeep well No.1 in Predrechitskaya of State Production Association Belorusneft in the difficult geological conditions characterized by the increased bottomhole temperature and a difficult profile of conducting of the well.*

*Keywords: reliability, durability, screw bottomhole engine, heat-resistant, super-deep well, drilling, failure interval, element of a mechanical system.*

Поступила в редакцию 22.03.2017 г.