

**ВЛИЯНИЕ КОРРОЗИИ НА СРОКИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НАСОСНЫХ ШТАНГ****Бусурманова А.Ч.**

Өзен кенорнындағы сорапты-компрессорлық тұрбаны механикалық әдіспен игерілетін ұңғылардың жұмыстарын сараптап, нақты нәтижелердің негізінде сорап шыбықтарын игеру мерзімдері есептелді. Бұл есептеулер негізіне Коши, И.М. Муравьев, А.С. Вирновский формулалары алынып, жерасты ұңғыны жөндеу кезінде, жер асты жабдықтарының игеру мерзімдері мен ревизиялауда міндетті болып табылады. Коррозияның жылдамдығы жер асты жабдықтарының іс жүзіндегі игеру мерзімдерін ескеріп, ұңғыны игерудің реал жағдайында, сонымен бірге бірнеше рет зертханалық зерттеулер нәтижесінде анықталды.

Based on the results and analysis of wells equipped with mechanical means of exploitation tubing at the Uzen, were the life of the rod, which is a topical issue of mining production. The basis of this calculation were taken Cauchy formula, I.M. Muraviev, A.S. Virnovskogo, and is mandatory, taking into account the timing of the operation and audit of the underground equipment in the underground repair of wells. Corrosion rate determined from the real operating conditions of wells, and repeated laboratory studies and taking into account the actual timing of the underground equipment.

Коррозионное разрушение нефтепромыслового оборудования заметно сокращает срок его службы, приводит к частым аварийным ситуациям.

Специфика коррозионного разрушения различного нефтепромыслового оборудования связана с характером добываемой из скважин продукции, а также свойствам нагнетаемой в скважину жидкости.

На нефтяных месторождениях в зависимости от местных условий, способа эксплуатации и других причин встречаются самые различные виды коррозии [1, 2]. Так, например, подземное оборудование и насосно-компрессорные трубы, устанавливаемые в нефтяных скважинах, подвергаются точечной коррозии, коррозионной эрозии, коррозии под напряжением, в результате которой в штангах и трубах появляются трещины и изломы.

Были исследованы физико-химические свойства пробы воды со скважин месторождения Узень, с целью определения скорости коррозии стали марки разных прочностей - Ст-35Г2 (С) и Ст-35Г2 (Д). Лабораторные исследования приведены в таблицах 1 и 2.

**Таблица 1. Скорость коррозии стали штанг, применяемые на месторождении Узень**

Место отбора проб	ГУ	рН	$\rho_{20}$ воды, г/см <sup>3</sup>	Минерализация, г/л	H <sub>2</sub> S, мг/л	Марка стали			
						Ст-35Г2(С)		Ст-35Г2 (Д)	
						Скорость коррозии, г/м <sup>2</sup> ·час	Глубина коррозии, мм/год	Скорость коррозии, г/м <sup>2</sup> ·час	Глубина коррозии, мм/год
Скв.280	87	6,5	1,016	24,79	34,0	0,5074	0,5682	0,3178	0,3559
Скв.2433	87	7,0	1,010	14,08	34,0	0,5159	0,5778	0,2627	0,2943
Скв.5674	88	6,5	1,027	38,11	17,0	0,1000	0,1120	0,1342	0,1503
Среднее		6,67	1,018	25,66	28,33	0,3744	0,4193	0,2382	0,2668

*Расчет экстремальных нагрузок, действующих на колонну штанг при статическом режиме для условия месторождения Узень*

Режим работы скважинной насосной установки может быть статическим и динамическим. Статическим режимом называется такой, для которого экстремальные нагрузки практически не зависят от динамических составляющих нагрузок. Если в общем балансе экстремальных нагрузок динамические нагрузки большие, то режим работы установки называется динамическим [3]. Критерий для определения режима работы установки называется критерием Коши:

$$\varphi = \omega \cdot H_n / a = \frac{\pi \cdot n \cdot H_n}{30 \cdot a} \quad (1)$$

где  $H_n$  – глубина спуска насоса, м;  $a$  – скорость звука в колонне штанг, м/с; для одноступенчатой колонны штанг  $a=4600$  м/с; для двухступенчатой  $a=4900$  м/с; для трехступенчатой  $a=5300$  м/с;  $\omega$  – угловая скорость вращения кривошипа, рад/с.

Если  $\varphi \leq 0,35$ , то режим работы установки статический и для расчета экстремальных нагрузок можно пользоваться упрощенными формулами. Расчет максимальной нагрузки можно проводить по формуле И.М. Муравьева:

$$P_{\max} = P_{ж} + P_{шт} \cdot \left( K_{аpx} + \frac{sn^2}{1440} \right) = \frac{F_{нз} L \rho_{жс} g}{10^4} + (q_1 l_1 + q_2 l_2) \times \left( \frac{(\rho_{шт} - \rho_{жс})}{\rho_{шт}} + \frac{sn^2}{1440} \right) \quad (2)$$

Для расчета минимальной нагрузки пользуются следующей формулой:

$$P_{\min} = P_{шт} \cdot \left( K_{аpx} - \frac{sn^2}{1440} \right) = (q_1 l_1 + q_2 l_2) \cdot \left( \frac{(\rho_{шт} - \rho_{жс})}{\rho_{шт}} - \frac{sn^2}{1440} \right) \quad (3)$$

В вышеприведенной формуле:  $P_{жс}$  – гидростатическая нагрузка на плунжер насоса от веса столба жидкости (смеси) в НКТ;  $P_{шт}$  – вес колонны штанг в воздухе;  $K_{аpx}$  – коэффициент, учитывающий потерю веса штанг, помещенных в жидкость;  $q_{штi}$  – вес одного метра штанг с муфтами в воздухе, Н;  $l_i$  – длина штанг данного размера в ступенчатой колонне, м;

Ниже приведены экстремальные нагрузки на колонну штанг, рассчитанные по условиям месторождения Узень:

- глубина спуска насоса,  $L_n$  – 1100 м;
- число двойных ходов,  $n$  – 6;
- плотность материала штанг,  $\rho_{шт}$  – 7850 кг/м<sup>3</sup>;
- плотность жидкости,  $\rho_{жс}$  – 839 кг/м<sup>3</sup>;
- длина хода плунжера (полированного штока),  $s$  – 2,1 м;
- диаметр плунжера – 0,057 м;
- колонна насосных штанг двухступенчатая – длина штанг верхней ступени с диаметром 22 мм составляет  $\varepsilon_1=0,45$  (45%), или  $l_1=495$  м, и длина штанг нижней ступени с диаметром 19 мм составляет  $\varepsilon_2=0,55$  (55%), или  $l_2=605$  м;
- площадь поперечного сечения штанг с диаметром 22 мм и 19 –  $f_1=3,8 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>,  $f_2=2,83 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>; вес 1м насосных штанг диаметром 22 и 19 мм –  $q_1 = 30,8Н$ ;  $q_2 = 23,1Н$ ;
- радиус кривошипа (при  $S=2,1$  м)  $r=0,86$  м.
- модуль упругости для стали  $E=0,21ТПа$ .

Были рассчитаны критерий Коши по формуле (1), так для обоих вариантов параметр Коши меньше 0,35, то режим работы установки статический и можно пользоваться упрощенными формулами.

*Расчет экстремальных нагрузок, действующих на колонну штанг при динамическом режиме для условия месторождения Узень*

При динамическом режиме, кроме перечисленных сил:

- от собственной силы тяжести штанг в смеси;
- от силы тяжести смеси в колонне НКТ;
- от давления на устье в колонне НКТ;
- от трения колонны штанг о НКТ, плунжера в цилиндре, а также от гидродинамического трения продукции скважины в трубах, существенными являются инерционные и вибрационные силы.

Максимальная нагрузка на основе динамической теории А.С.Вирновского [4] с учетом собственных колебаний колонны штанг определяется по формуле:

$$\begin{aligned}
 P_{\max} = & P_{\text{штг}} + P_{\text{ж}} - P'_{\text{ж}} + \frac{1}{3} \cdot a \cdot \frac{D_{\text{нз}}}{d_{\text{у}}} \sqrt{\frac{S \cdot \omega^2}{g}} \cdot (P_{\text{штг}} + 0,3\varepsilon P_{\text{ж}}) \cdot \sqrt{a_1 \psi - \frac{\lambda}{S}} + \\
 & + a^2 \frac{S \omega^2}{2g} \cdot P_{\text{штг}} \left(1 - \frac{\psi}{2}\right) \left(a_1 - \frac{2\lambda}{\psi S}\right) = q_1 l_1 + q_2 l_2 + \rho_{\text{ж}} g \cdot (F_{\text{нз}} L - f_1 l_1 - f_2 l_2) + \\
 & + \frac{1}{3} \cdot a \cdot \frac{D_{\text{нз}}}{d_{\text{у}}} \sqrt{\frac{S \cdot \left(\frac{2\pi}{30}\right)^2}{g}} \cdot (q_1 l_1 + q_2 l_2 + 0,3\varepsilon \cdot (\rho_{\text{ж}} g \cdot (F_{\text{нз}} L - f_1 l_1 - f_2 l_2))) \times \\
 & \times \sqrt{\frac{2r}{S} \cdot \left(\frac{f'_T}{f'_T + f_u}\right) - \frac{F_{\text{нз}} \rho_{\text{ж}} g L^2}{E f_u S}} + a^2 \cdot \frac{S \cdot \left(\frac{2\pi}{30}\right)^2}{2g} \cdot (q_1 l_1 + q_2 l_2) \cdot \left(1 - \frac{f'_T}{2 \cdot (f'_T + f_u)}\right) \times \\
 & \times \left(\frac{2r}{S} - \frac{2 F_{\text{нз}} \rho_{\text{ж}} g L \cdot (f'_T + f_u)}{E f_u f'_T S}\right)
 \end{aligned} \tag{4}$$

Минимальная нагрузка на основе динамической теории А.С.Вирновского с учетом собственных колебаний колонны штанг определяется по формуле:

$$\begin{aligned}
 P_{\min} = & P_{\text{штг}} - \frac{1}{3} \cdot a \cdot \frac{D_{\text{нз}}}{d_{\text{у}}} \sqrt{\frac{S \cdot \omega^2}{g}} \cdot \sqrt{a_1 \psi - \frac{\lambda}{S}} - a^2 \frac{S \omega^2}{2g} \cdot P_{\text{штг}} \left(1 - \frac{\psi}{2}\right) \left(a_1 - \frac{2\lambda}{\psi S}\right) = \\
 & = q_1 l_1 + q_2 l_2 - \frac{1}{3} \cdot a \cdot \frac{D_{\text{нз}}}{d_{\text{у}}} \sqrt{\frac{S \cdot \left(\frac{2\pi}{30}\right)^2}{g}} \cdot \sqrt{a_1 \cdot \left(\frac{f'_T}{f'_T + f_u}\right) - \frac{F_{\text{нз}} \rho_{\text{ж}} g L^2}{E f_u S}} - \\
 & - a^2 \cdot \frac{S \cdot \left(\frac{2\pi}{30}\right)^2}{2g} \cdot (q_1 l_1 + q_2 l_2) \cdot \left(1 - \frac{f'_T}{2 \cdot (f'_T + f_u)}\right) \cdot \left(a_1 - \frac{2 F_{\text{нз}} \rho_{\text{ж}} g L \cdot (f'_T + f_u)}{E f_u f'_T S}\right)
 \end{aligned} \tag{5}$$

$P_{\text{ж}}$  - вес столба жидкости между плунжером и штангами, определяемый из выражения:  $a$  – коэффициент, отношение угла поворота кривошипа  $\pi/2$  к углу его поворота  $\varphi$  (считая от начального неподвижного положения), при котором скорость достигает максимума, который равен 1,15;  $P'_{\text{ж}}$  - вес столба жидкости от приема насоса до динамического уровня, который равен нулю, так как уровень находится у приема насоса;  $\lambda$  - удлинение штанг от веса столба жидкости; коэффициент  $a_1$  определяется из равенства:  $a_1 = 2r/S$ ;  $\varepsilon$  - отношение площадей просвета;  $\psi$  - коэффициент, равный  $\psi = f'_T / (f'_T + f_u)$ ;  $f'_T = 4,18 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$  – площадь сечения 73 мм труб по металлу;  $d_{\text{у}}$  – средний диаметр колонны насосных штанг, эквивалентный диаметрам двухступенчатой колонны с учетом их процентного соотношения, следовательно,

$$d_{ш} = \frac{(22 \cdot 45 + 19 \cdot 55)}{100} = 20,35 \text{ мм} \quad f_{шм} = \frac{\pi \cdot D_{пл}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,02035^2}{4} = 3,25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Следует отметить, что все известные формулы для расчета экстремальных нагрузок являются приближенными, т.к. получены при определенных допущениях и упрощении реальной физики сложных процессов, происходящих при откачке СШНУ продукции скважины.

Подставив в формулы (4) и (5) найденные числовые величины, были рассчитаны  $P_{max}$ ,  $P_{min}$ .

Для определения влияния средней скорости глубины коррозии стали марки **Ст-35Г2 (С)** и **Ст-35Г2 (Д)**, в расчете были взяты среднее значение глубины коррозии 0,4193 мм/год и 0,2668 мм/год, соответственно, и были рассчитаны максимальные нагрузки в точке подвески штанг.

Следовательно, вследствие коррозионной активности среды площадь поперечного сечения штанг с диаметром 21,5807 мм и 18,5807 мм уменьшаются и составляют -  $f_1=3,66 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ,  $f_2=2,71 \cdot 10^{-4}$  для стали марки **Ст-35Г2 (С)**;

$$d_{ш} = \frac{(21,5807 \cdot 45 + 18,5807 \cdot 55)}{100} = 19,931 \text{ мм} ; f_{шм} = \frac{3,14 \cdot 0,019931^2}{4} = 3,12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

А для стали марки **Ст-35Г2 (Д)** вследствие коррозионной активности среды, площадь поперечного сечения штанг с диаметром 21,7332 мм и 18,7332 мм уменьшаются и составляют -  $f_1=3,71 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ,  $f_2=2,75 \cdot 10^{-4}$ ;

$$d_{ш} = \frac{(21,7332 \cdot 45 + 18,7332 \cdot 55)}{100} = 20,0832 \text{ мм} ; f_{шм} = \frac{3,14 \cdot 0,0200832^2}{4} = 3,17 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Подставив в формулу (4) найденные числовые величины, был рассчитан  $P_{max}$ .

**Таблица 2. Расчетные данные экстремальных нагрузок, действующих на колонну штанг при статическом и динамическом режиме для условия месторождения Узень**

Статический режим							
$\varphi_1$	$\varphi_2$	$K_{арх}$	$F_{пл}, \text{м}^2$	$P_{шт}, \text{кН}$	$P_{жс}, \text{кН}$	$P_{max}, \text{кН}$	$P_{min}, \text{кН}$
0,15	0,141	0,893	$2,55 \cdot 10^{-3}$	29,2	23,09	50,69	24,54
Динамический режим							
$\omega$	$\lambda, \text{м}$	$a_1$	$\varepsilon$	$\psi$	$P_{шт}, \text{кН}$	$P_{жс}, \text{кН}$	$P_{min}, \text{кН}$
0,628	0,372	0,82	0,826	0,928	29,22	20,13	28,59
Влияние коррозии на экстремальные нагрузки, действующих на колонну штанг (динамический режим)							
Марка стали	$P_{шт}, \text{кН}$	$P_{жс}, \text{кН}$	$\lambda, \text{м}$	$a_1$	$\varepsilon$	$\psi$	$P_{max}, \text{кН}$
<b>Ст-35Г2(С)</b> , при глубине коррозии - 0,4193 мм/год	28,622	20,246	0,388	0,82	0,8264	0,9305	57,38
<b>Ст-35Г2 (Д)</b> , при глубине коррозии 0,2668 мм/год	28,84	20,206	0,381	0,82	0,8261	0,9295	57,572

Следовательно, из-за агрессивности сред (морской и сточной воды) толщина стенок штанг утончаются и при нем нагрузка в точке подвески штанг наибольшая.

#### *Расчет напряжений в штангах для условия месторождения Узень*

При нормальной работе насосной установки наибольшие напряжения действуют в точке подвеска штанг. Различают следующие напряжения, действующие в точке подвеса штанг:

Амплитудное напряжение цикла:

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{2} = \frac{(P_{\max} - P_{\min})}{2f_{um}} \quad (6)$$

Приведенное напряжение цикла:

$$\sigma_{np} = \sqrt{\sigma_{\max} * \sigma_a} = \sqrt{\frac{P_{\max}(P_{\max} - P_{\min})}{2f_{um}^2}} \quad (7)$$

Колонна штанг считается правильно выбранной, если  $\sigma_{np} \leq [\sigma_{np}]$ . Максимальная нагрузка при статическом режиме  $P_{\max} = 50,69$  кН.

Так как допускаемое приведенное напряжение для принятой колонны штанг из углеродистой стали  $[\sigma_{np}] = 70$  МПа, а расчетное  $\sigma_{np} = 47,41$  МПа, то выполняется условие, колонна выбрана правильно, в резерве 32,27%.

Вероятную частоту обрывов штанговой колонны марки **Ст-35Г2(С)**, вызванных усталостным разрушением материала штанг по глубине спуска и числу качаний режимов эксплуатации, можно оценить по эмпирической формуле А.С. Вирновского:

$$\tau = C'_n \cdot \left(\frac{D_{nl}}{d_u}\right)^{3,27 \cdot K + 0,13} \cdot \left(\frac{L_H}{1000}\right)^{2K+1} \quad (8)$$

где  $\tau$  – вероятное число обрывов штанг в год;  $C'_n, K$  – числовые коэффициенты, зависящие от усталостной прочности материала штанг и свойств откачиваемой жидкости.

При статистической обработке фактических данных было установлено, что  $K$  для штанг из углеродистой стали, работающих в осложненных условиях эксплуатации, а также при откачке коррозионно-активных жидкостей равен 1,1;  $C'_n = 0,533$ .

Ввиду того, что наибольшее число обрывов (в среднем до 50%) наблюдается, как правило, в верхней части колонны штанг, расчет ведем для верхней ступеней штанг с  $d_u = 22$  мм.

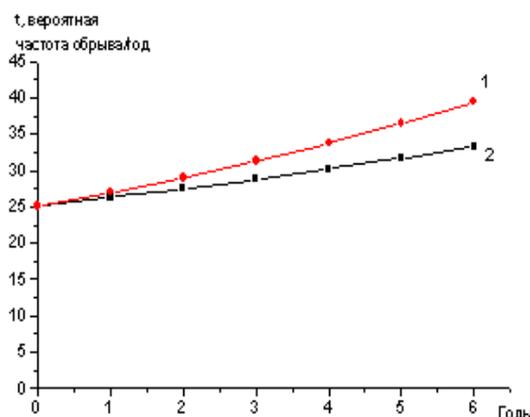
Частота обрыва штанги выражает выносливость штанг, который зависит от группы прочности стали, в данный момент из углеродистой стали. При максимальной нагрузке  $P_{\max} = 57,89 \cdot 10^3$  Н для вновь спущенной штанги, частота обрыва при компоновке штанги 22 мм - 45% и 19 мм – 55%:

При средней глубине коррозии 0,4193 мм/год и 0,2668 мм/год, соответственно; стали марки **Ст-35Г2 (С)** и **Ст-35Г2 (Д)**, была рассчитана вероятная частота обрыва штанг за каждые последующие годы ( $\tau_1$  – через 1 год;  $\tau_2$  – через 2 года;  $\tau_3$  – через 3 года;  $\tau_4$  – через 4 года):

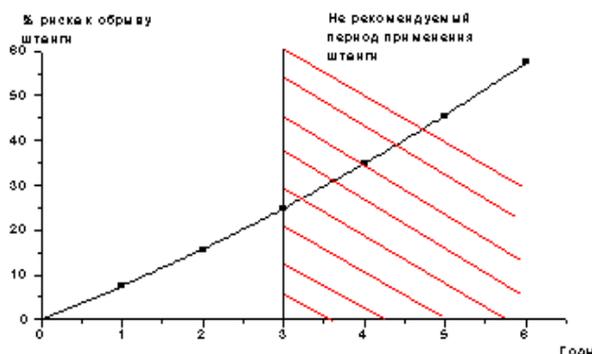
**Таблица 3. Расчетные данные вероятной частоты обрывов штанговой колонны в условия месторождения Узень**

Марка стали	$\tau$ , обр./год	$\tau_1$ , обр./год	$\tau_2$ , обр./год	$\tau_3$ , обр./год	$\tau_4$ , обр./год	$\tau_5$ , обр./год	$\tau_6$ , обр./год
Ст-35Г2(С), при глубине коррозии - 0,4193 мм/год	25,1	27	29	31,3	33,8	36,5	39,5
Ст-35Г2 (Д), при глубине коррозии 0,2668 мм/год	25,1	26,3	27,5	28,8	30,2	31,7	33,3

На рисунке 1 представлена зависимость частот обрыва штанг Ст-35Г2(С) и Ст-35Г2(Д) от времени, при условии глубины коррозии 0,4193 мм/год и 0,2668 мм/год соответственно.



**Рис.1. Зависимость частоты обрыва штанг марки Ст-35Г2 от времени:**  
1 – марка стали «С»; 2 – марка стали «Д»

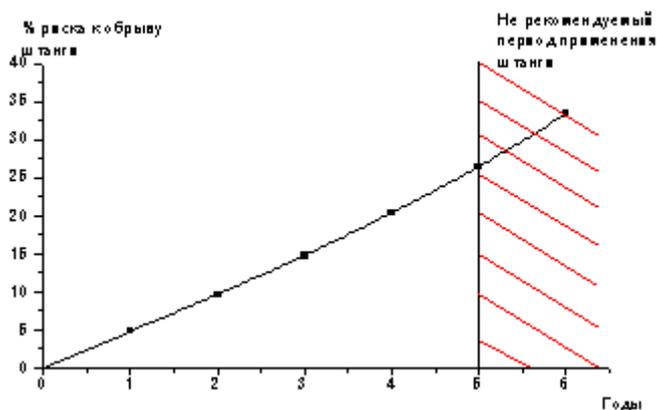


**Рис.2. Зависимость процента риска к обрыву штанг марки Ст-35Г2 (С) от времени**

На рисунке 2 отражена зависимость процента риска к обрыву штанг от времени. Как видно из рис.2 по истечении времени, процент риска к обрыву штанги увеличивается. Через 3 года процент риска составляет 24,7%, что соответствует 76,5% запаса прочности приведенного напряжения. При расчете не учтены свойства стали штанги, которые в первый год до эксплуатации имели идеальную поверхность (обработка поверхности высокочастотным током), затем по истечению двух и трех лет подвергаются коррозионной активности нефтяной эмульсии, тем самым

ухудшая поверхностные свойства стали и свыше трех лет увеличивается процент обрыва штанг на 34,7%.

На рисунке 3 отражена зависимость процента риска к обрыву штанг от времени.



**Рис.3. Зависимость процента риска к обрыву штанг марки Ст-35Г2 (Д) от времени**

Как видно из рис.3 по истечению времени процент риска к обрыву штанги увеличивается. Через 5 лет процент риска составляет 26,3%, что соответствует 81,5% запаса прочности приведенного напряжения. По истечении пяти лет сталь подвергается коррозионной активности нефтяной эмульсии, тем самым ухудшая поверхностные свойства стали, и свыше шести лет увеличивается процент обрыва штанг на 33,3%.

Срок эксплуатации насосных штанг приведена в таблице 5.3.1.

**Таблица 4. Сроки эксплуатации стали штанг «С» и «Д»**

Условие эксплуатации	Марка стали	При глубине коррозии, мм/год	Срок эксплуатации, год
Для скважин месторождения Узень	Ст-35Г2 Группа прочности «С»	0,4193	3
	Ст-35Г2 Группа прочности «Д»	0,2668	5

**Рекомендации:**

С целью снижения количества ремонтов при эксплуатации связанных с обрывом штанг на месторождениях ближе к условиям месторождения Узень рекомендуется применять штанги, изготовленные из марок стали Ст-35Г2 группы прочности «Д», провести ревизию с выбраковкой штанг подверженных коррозионному износу в пределах 1,35мм. По истечении 5 лет заменить полную подвеску штанг на новую, а в случае применения штанг, изготовленных из стали марок Ст-35Г2 группы прочности «С», срок надежной эксплуатации снижается и составляет 3 года.

## Литература:

1. Гоник А.А. Коррозия нефтепромыслового оборудования и меры ее предупреждения. М.: Недра, 1976. 58 с.
2. Легезин Н.Е., Глазов Н.П., Кесельман Г.С., Кутовая А.А. Защита от коррозии промышленных сооружений в газовой и нефтедобывающей промышленности. М.: Недра, 1973. 121 с.
3. Мищенко И.Т. Расчеты в добыче нефти. М.: Недра, 1989. 178 с.
4. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти. М.: Нефть и газ, 2003. 625 с.