



УДК 622.276

## О ВЫДЕЛЕНИИ ПЕСКА В ПЛАСТАХ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН С ПОМОЩЬЮ ГЛУБИННЫХ НАСОСОВ

### ABOUT RELEASE OF SAND IN LAYERS AT OPERATION OF OIL WELLS BY MEANS OF DEEP PUMPS

#### Ахмедов З.М.

доктор технических наук, профессор,  
Азербайджанский государственный университет  
нефти и промышленности

#### Гулгезли А.С.

доктор технических наук, доцент,  
Азербайджанский государственный университет  
нефти и промышленности  
alesker.gulgezli@mail.ru

#### Ахмедов А.С.

кандидат технических наук, доцент,  
Азербайджанский государственный университет  
нефти и промышленности  
a.ahmedov@asoiu.edu.az

**Аннотация.** При эксплуатации нефтяных скважин с помощью глубинных насосов уровень нефти в скважине подвергается циклическому изменению. При циклическом изменении уровня нефти возникают циклические напряжения призабойной части горных пород пласта, поры которого заполнены нефтью. Эти циклические изменения напряжений в горных породах пласта приводят к усталостному разрушению скелета горной породы, которое приводит к выделению песка со стороны пласта. Целью данной работы является определения времени до начала выделения песка после применения глубинных насосов для эксплуатации нефтяных скважин.

**Ключевые слова:** горная порода, давление, скважина, напряжение, деформация, цилиндр, радиус, частота, период, время.

#### Akhmedov Z.M.

Doctor of Engineering, Professor,  
Azerbaijani State University of Oil and Industry

#### Gulgezli A.S.

Doctor of Engineering, Associate Professor,  
Azerbaijani State University of Oil and Industry  
alesker.gulgezli@mail.ru

#### Akhmedov A.S.

Candidate of Technical Sciences,  
Associate professor,  
Azerbaijani State University of Oil and Industry  
a.ahmedov@asoiu.edu.az

**Annotation.** At operation of oil wells by means of deep pumps oil level in the well is exposed to cyclic change. At cyclic change of level of oil there is cyclic tension of a bottom-hole part of rocks of layer which time is filled with oil. These cyclic changes of tension in rocks of layer lead to fatigue failure of a skeleton of rock which leads to release of sand from layer. The purpose of this work is definitions of time prior to release of sand after use of deep pumps for operation of oil wells.

**Keywords:** rock, pressure, well, tension, deformation, cylinder, radius, frequency, period, time.

#### Постановка задачи

Пласт будем моделировать как цилиндрическое тело с внутренним отверстием радиуса  $R_1$  и бесконечной толщиной. Если высоту нижней части скважины, которая заполнена нефтью, обозначим через  $H(t)$ , то можно принять, что,

$$H(t) = h - \frac{l}{2} \cos \omega t, \quad (1)$$

где  $h = \text{const}$ , высота нефти со дна скважины при  $\omega t = \frac{\pi}{2}$  или при  $t = \frac{\pi}{2\omega}$ ,  $t$  – время,  $\omega$  – круговая частота колебаний качалки,  $l$  – длина цилиндра насоса.

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad (2)$$

где  $T$  – период колебаний качалки – заданная величина.

С внутренней стороны на дно скважины действует давление:

$$\bar{P} = \rho g H(t), \quad (3)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\rho$  – плотность нефти.



Внешний радиус цилиндрического тела обозначим через  $R_2$ . Начало системы координат выберем в середине цилиндра насоса и ось  $Z$  направим вертикально вниз. Тогда с внутренней стороны на стенки скважины будет действовать давление:

$$\bar{P}_1 = \rho g Z + \frac{l}{2} \cos \omega t, \tag{4}$$

с «наружной» стороны, т.е. в бесконечности будет действовать давление:

$$\bar{P}_1 = \frac{\nu}{\nu - 1} [\rho g(Z + H_0) + P_a], \tag{5}$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона горной породы,  $H_0$  высота скважины, находящейся над глубинным насосом,  $P_a$  атмосферное давление.

**Решение задачи**

Будем считать, что горная порода находится в упругом состоянии, то распределение напряжений в нем можно принять как решение задачи Ламе. Тогда

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{R_2^2 R_1^2 (\bar{P}_2 - \bar{P}_1)}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \frac{1}{r^2} + \frac{R_2^2 \bar{P}_1 - R_1^2 \bar{P}_2}{R_2^2 - R_1^2} \\ \sigma_\varphi &= \frac{R_2^2 R_1^2 (\bar{P}_2 - \bar{P}_1)}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \frac{1}{r^2} + \frac{R_2^2 \bar{P}_1 - R_1^2 \bar{P}_2}{R_2^2 - R_1^2} \end{aligned} \right\}, \tag{6}$$

где  $\sigma_r$  и  $\sigma_\varphi$  – соответственно радиальное и тангенциальное составляющие напряжения,  $r$  – текущий радиус.

Когда  $R_2 \rightarrow \infty$  из (6) имеем:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{R_1^2}{r^2} (\bar{P}_2 - \bar{P}_1) - P_2 \\ \sigma_\varphi &= \frac{R_1^2}{r^2} (\bar{P}_2 - \bar{P}_1) - P_2 \end{aligned} \right\}; \tag{7}$$

$$\sigma_z = -(\rho g(Z + H_0) + P_a), \tag{8}$$

$\sigma_z$  – напряжение в направлении оси цилиндра.

В работе [4] получено выражение для числа асимметрических циклов, после которых происходит усталостное разрушение материала для произвольного напряженного состояния в следующем виде:

$$N = \frac{2\sigma_7^2}{[J_1^2 + 2(1+\nu)J_2 - (1+\nu)\sigma'_{ij}\sigma_{ij} + \nu J_1 \cdot J_1](1-k_0)}, \tag{9}$$

где  $J_1 = \sigma'_{ij} \cdot g_{ij}$ ;  $\sigma_{ij}$ ,  $\sigma'_{ij}$  – в начале и в конце полуцикла,  $g_{ij}$  – компоненты метрического тензора, по повторяющимся индексам  $i, j$  идет суммирование от 1 до 3.

$$k_0 = \sqrt{\frac{2\sigma_8^2}{J_1^2 + 2(1+\nu)J_2} - 1}, \tag{10}$$

$\sigma_8$  – предел выносливости горной породы,  $J_1$ ,  $J_2$  – соответственно первый и второй инварианты тензора напряжений.

Для рассматриваемой задачи:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{R_1^2}{r^2} (\bar{P}_2 - \rho gh) - \bar{P}_2 \\ \sigma_\varphi &= \frac{R_1^2}{r^2} (\bar{P}_2 - \rho gh) - \bar{P}_2 \\ \sigma_z &= \bar{P}_2 \cdot \frac{\nu - 1}{\nu} = -(\rho g(Z + H_0) + P_a) \end{aligned} \right\}; \tag{11}$$



$$\left. \begin{aligned} \sigma'_r &= \frac{R_1^2}{r^2} [\bar{P}_2 - \rho g(h-l)] - \bar{P}_2 \\ \sigma'_r &= \frac{R_1^2}{r^2} [\bar{P}_2 - \rho g(h-l)] - \bar{P}_2 \\ \sigma'_z &= \sigma_z = -[\rho g(h+H_0) + P_a] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Известно, что независимо от того, давление внутреннее или внешнее, разрушение происходит с внутренней стороны, т.е. при  $r = R_1$ . Тогда подставляя  $r = R_1$  в (11) и (12) получаем:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -\rho gh \\ \sigma_\phi &= \rho gh - 2\bar{P}_2(h) \\ \sigma_z &= -[\rho g(h+H_0) + P_a] \end{aligned} \right\}; \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -\rho g(h-l) \\ \sigma_\phi &= \rho g(h-l) - 2\bar{P}_2(h) \\ \sigma_z &= \bar{P}_2(h) - [\rho g(h+H_0) + P_a] \end{aligned} \right\}. \quad (14)$$

С помощью (13) и (14) вычислим инварианты тензора напряжений:

$$J_1 = \sigma_r + \sigma_\phi + \sigma_z = -3\bar{P}_2(h) = -3[\rho g(h+H_0) + P_a];$$

$$J'_1 = \sigma'_r + \sigma'_\phi + \sigma'_z = -3\bar{P}_2(h) = -3[\rho g(h+H_0) + P_a];$$

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} \cdot \sigma'_{ij} &= \sigma_r \cdot \sigma'_r + \sigma_\phi \cdot \sigma'_\phi + \sigma_z \cdot \sigma'_z = \rho^2 g^2 h(h-l) + (\rho gh - 2\bar{P}_2(h))[\rho g(h-l) - 2\bar{P}_2(h)] + [\rho g(h+H_0) + P_a]^2 = \\ &= \rho^2 g^2 h(h-l) + [\rho gh - 2(\rho gh + \rho gH_0 + P_a)] \cdot [\rho gh - \rho gl - 2(\rho gh + \rho gH_0 + P_a)] + [\rho g(h+H_0) + P_a]^2; \end{aligned}$$

Введем обозначение:

$$P = \rho g(h+H_0) + P_a; \quad P_1 = \rho gh; \quad P_2 = \rho g(h-l); \quad (15)$$

подставляя (15) в последнем равенстве получаем:

$$\sigma_{ij} \cdot \sigma'_{ij} = P_1 \cdot P_2 + (P_1 - 2P)(P_2 - 2P) + P^2 = 2P_1P_2 - 2P(P_1 - P_2) + 5P^2;$$

$$J_2 = -(\sigma_r \cdot \sigma_\phi + \sigma_z \cdot \sigma_\phi + \sigma_\phi \cdot \sigma_z) = -[-P_1(P_1 - 2P) + P_1 \cdot P - (P_1 - 2P) \cdot P] = P_1^2 - 2PP_1 - 2P^2.$$

подставляя эти выражения в (9), для  $N$  получаем:

$$N = \frac{\sigma_T^2}{(1+\nu)} \cdot \frac{1}{(6P^2 + P_1^2 - PP_1 - P_1P_2) \cdot (1-k_0)},$$

теперь преобразуем  $k_0$  из (10):

$$k_0 = \sqrt{\frac{2\sigma_\phi^2}{9P^2 + 2(1+\nu)(P_1^2 - 2PP_1 - 2P^2)}} - 1. \quad (17)$$

Если учитывать, что горная порода-тело пористое и поры заполнены с несжимаемой жидкостью можно считать, что  $\nu \approx 0,5$ . Кроме этого учитывая, что атмосферное давление  $P_a$  намного меньше давления столба жидкости при больших глубинах, можно принять:

$$P = \rho g(h+H_0); \quad P_1 = \rho gh; \quad P_2 = \rho g(h+l); \quad (18)$$

из (17):

$$k_0 = \sqrt{\frac{2\sigma_\phi^2}{9P^2 + 3(P_1^2 - 2PP_1 - 2P^2)}} - 1 = \sqrt{\frac{\sigma_T^2}{6P^2 + 3P_1^2 - 6PP_1}} - 1. \quad (19)$$

При получении (19) мы учитывали, что:

$$\sigma_T^2 \approx \sqrt{2\sigma_\phi^2}. \quad (20)$$



Зная число циклов  $N$ , необходимых для усталостного разрушения и период –  $T$  одного цикла, можно определить время, через которого, происходит усталостное разрушение, т.е. начинается выделение песка со стороны горных пород пласта, т.е.:

$$t = N \cdot T = N \cdot \frac{2\pi}{\omega} = \frac{N}{n}, \tag{21}$$

где  $n$  – число циклов в единицу времени, которое измеряется в международной системе единиц в секундах в степени минус один.

Подставляя (16) в (21) для времени выделения песка со стороны горной породы пласта получаем:

$$t = \frac{\sigma_T^2}{(1+\nu)n} \cdot \frac{1}{(6P^2 + P_1^2 - PP_1 - P_2P_1) \cdot (1-k_0)}. \tag{22}$$

Построим график зависимости времени образования песка от глубины скважины  $H_0$ , при этом остальные параметры будем считать фиксированными.

Для фиксированных параметров примем следующие значения:

$$\rho = 2000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; h = 20 \text{ м}; \sigma_T = 1,5 \cdot 10^8 \text{ Па}; n = 0,5 \text{ сек}^{-1}; \nu = 0,3; g = 10 \frac{\text{М}}{\text{сек}^2}; l = 3 \text{ м}.$$

С учетом этих данных в (18) получаем:

$$P = \rho gh + \rho gH_0 = 2 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 20 + 2 \cdot 10^4 H_0 = 4 \cdot 10^5 + 2 \cdot 10^4 H_0 \text{ (Па)};$$

$$P_1 = \rho gh = 4 \cdot 10^5; P_2 = 2 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 17 = 3,4 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Таблица 1

$H_0$	1000 м	1200 м	1400 м	1600 м	1800 м	2000 м
$k_0$	3	2,5	2,15	1,82	1,68	1,51
$t$	28	23	20	17	15,5	14

При принятых значениях параметров,  $P_1$  и  $P_2$  на два порядка меньше  $P$ , поэтому с погрешностью 2–3 % процента можно считать, что:

$$\left. \begin{aligned} k_0 &= \sqrt{\frac{\sigma_T^2}{\sigma P^2} - 1} = \frac{\sqrt{\sigma_T^2 - 6P^2}}{\sqrt{6P}} \\ t &= \frac{\sqrt{6}\sigma_T}{(1+\nu) \cdot n \cdot \rho} \end{aligned} \right\}. \tag{23}$$

Задавая значения параметру  $H_0$  от 1000 м до 2000 м шагом 200 м получаем значения  $k_0$  и  $t$  показанные в таблице 1. Если построить график  $t$  от  $H_0$  получим, что с увеличением глубины скважины уменьшается время образования песка, т.е.  $t$  обратно пропорционально  $H_0$  (рис. 1):

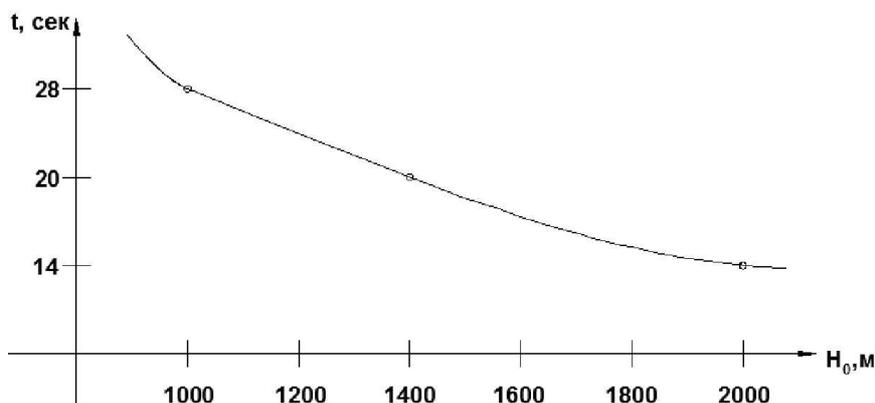


Рисунок 1 – Зависимость времени образования песка от глубины скважины



Как видно из таблицы 1, поры в породах пласта теряют устойчивость через несколько секунд после начала циклического нагружения. Это объясняется тем, что во всех шести значениях  $H_0$ ,  $k_0 > 1$ , т.е. имеют место пластические деформации, а это означает, что разрушение в порах должно произойти после первых же циклов.

#### **Основной вывод**

При больших глубинах, когда скважина эксплуатируется глубинными насосами выделяется песок сразу же, после начала первых циклов нагружения.

#### **Литература:**

1. Амензаде Ю.А. Теория упругости. – М. : Высшая школа, 1976. – 272 с.
2. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика горных пород. – М. : Недра, 1975. – 270 с.
3. Гулгезли А.С. Пластичность и ползучесть при повторном нагружении. – Saarsbrücken, Deutschland : LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – 170 с.
4. Гулгезли А.С., Аббасов С.Н., Бабаев А.М. Новая энергетическая теория выносливости при асимметричном нагружении // The USA Journal of Applied Sciences. – 2016. – № 3. – P. 31–35.

#### **References:**

1. Amenzade Yu.A. Theory of elasticity. – M. : The higher school, 1976. – 272 p.
2. Baklashov I.V., Kartoziya B.A. Mechanics of rocks. – M. : Nedra, 1975. – 270 p.
3. Gulgezli A.S. Plasticity and creep at repeated loading. – Saarsbrücken, Deutschland: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – 170 p.
4. Gulgezli A.S., Abbasov S.N., Babayev A.M. The new power theory of endurance at asymmetric loading // The USA Journal of Applied Sciences. – 2016. – No. 3. – P. 31–35.