

---

---

**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

---

---

УДК 622.276.6

**ПРОЦЕССЫ, ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКА ВОЛНОВОЙ ОЧИСТКИ  
ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ ПЛАСТА**© 2022 г. О. Р. Ганиев<sup>1</sup>, Н. А. Шамов<sup>1,\*</sup>, Н. С. Завалишин<sup>1</sup><sup>1</sup>*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия**\*e-mail: shamov.na@mail.ru*Поступила в редакцию 16.12.2021 г.  
Принята к публикации 20.04.2022 г.

Приведены математические модели динамики твердых частиц при волновом восстановлении гидродинамической связи скважины с пластом. Определены условия очистки продуктивной породы от кольматанта в волновом поле при репрессии и депрессии. Представлены результаты применения технологии и техники при режиме депрессионно-волновой очистки прискважинной зоны пласта.

*Ключевые слова:* волны давления, репрессивно-депрессивные волновые процессы и устройства, перфорационные каналы, гидродинамическая связь скважины с пластом, слой кольматации, его декольматация

DOI: 10.31857/S0235711922040083

Существующие технологии по восстановлению продуктивности скважин часто оказываются малоэффективными. Успешность таких работ составляет не более 60%, что связано со сложностью решения поставленных задач и несоответствием выбора скважин и применяемых технологий восстановительных работ [1].

Ухудшение естественной проницаемости продуктивного интервала может возникнуть вследствие кольматации проницаемой породы при бурении ствола скважины, цементировании обсадной колонны труб, набухания глинистых материалов, выпадения солей из пластовых вод, образования стойких эмульсий, отложения смол, парафинов и продуктов коррозии в фильтровой части ствола скважины, гидратации продуктивных пород.

В этой связи большое значение приобретают технологии очистки ПЗП, которые позволяют восстановить фильтрационные характеристики коллектора за счет частичной или полной ликвидации возникающих проблем.

Волновые явления в многофазных системах могут создаваться как с помощью внешних периодических воздействий, так и за счет специфических свойств самой системы, усиливающих их нелинейность [2–9].

**Механизм волновой очистки ПЗП от кольматационных пробок.** При описании динамики частиц кольматанта в дисперсионной среде промывочной жидкости в поровых каналах продуктивной породы приняты следующие допущения: форма частиц сферическая, дисперсионная среда однородна; взаимодействие двух соседних частиц в волновом поле рассматривается без учета влияния других частиц; фронт волны в жидкости перфорационного канала является плоским; проницаемая порода представляет систему каналов, суммарная площадь проходных сечений которых одинакова по направлениям всех трех осей.

Рассмотрим характер прохождения волн давления через перфорационный канал в поровую среду ПЗП со слоем кольматации. В начале движения по каналу волна имеет почти плоскую форму фронта, которая затем при продвижении в цилиндрических полупроницаемых стенках канала, вследствие наличия там частиц кольматанта, приобретает близкую к полусферической форму. Часть энергии волны проходит в скелет горной породы, по которому волны распространяются с большей скоростью, чем в жидкой среде породы. Такие волны, распространяясь по скелету с хаотическим расположением каналов с сужениями и расширениями, создают множество отраженных микроволн и микротечений, а также переменных напряжений в скелете, что позволяет ослабить там адгезионно-адсорбционные связи с кольматационными пробками. Другая часть энергии волны проходит в слой кольматации, в котором производит работу по расшатыванию полидисперсной структуры кольматационной пробки, ослабляя связи между ее частицами и стенками канала породы.

Перфорационные отверстия обычно существенно углублены в проницаемую породу, вокруг них в процессе эксплуатации образуется слой из частиц кольматанта и технологических отложений. В отсутствии слоя кольматации в глубь проницаемой породы пласта от перфорационных каналов может возникнуть почти полусферическая и цилиндрическая зоны фильтрации, вплоть до смыкания последней с такими же зонами соседних каналов.

На рис. 1 представлены участок скважины с обсадной трубой 1, перфорационными каналами 2 диаметром  $D_{pk}$  и концом длиной  $L_{pk}$ , выходящим за слой кольматации 3 толщиной  $l_{kb}$  и образованным в породе пласта при бурении и цементировании скважины, цементным камнем 4 толщиной  $l_{zk}$ , горной породой 5 с поровыми каналами 6, слоем 7 кольматации толщиной  $l_{kk}$ , возникшим при эксплуатации скважины. В отсутствие слоя 7 кольматации в глубь проницаемой породы пласта от перфорационных каналов могут возникнуть зоны фильтрации с почти полусферической 8 и цилиндрической 9 поверхностями, последняя из которых смыкается с такими же зонами соседних перфорационных каналов.

Текущая площадь поверхности почти полусферической зоны фильтрации в упрощенном виде будет определяться, как

$$S^* = 8x^2 + 2\pi D_{pk}x + D_{pk}^2.$$

Так как распространение колебаний давления от излучающего их источника носит почти полусферический характер, плотность потенциальной энергии звуковой волны будет уменьшаться с удалением от излучателя в глубину пласта, поэтому движение крупных твердых частиц относительно дисперсионной среды будет преобладающим в сторону пласта. На сферическую частицу кольматанта будет действовать сила, возникающая в волне из-за изменения ее потенциальной энергии с удалением в глубь пласта от перфорационных каналов и обусловленная рассеиванием волновой энергии на твердых частицах [10], вследствие разницы плотности частиц твердой фазы и промывочной среды

$$F_S = \frac{\pi p_{0w}^2 d_k^3 D_{pk}^2}{2\rho_g c_g^2 S^*} \left( \frac{\alpha_1 S^* + 8x + \pi D_{pk}}{3S^*} + \frac{\Omega^4 d_k^3 q_p}{16c_g^4} \right) e^{-2\alpha_1 x}, \quad (1)$$

где  $p_{0w}$  – амплитуда колебаний давления в перфорационном канале;  $d_k$  – диаметр частицы кольматанта;  $\alpha_1$  – коэффициент затухания колебаний давления в гидросреде ПЗП скважины;  $\rho_g$  – плотность промывочной или пластовой (дисперсионной) жид-

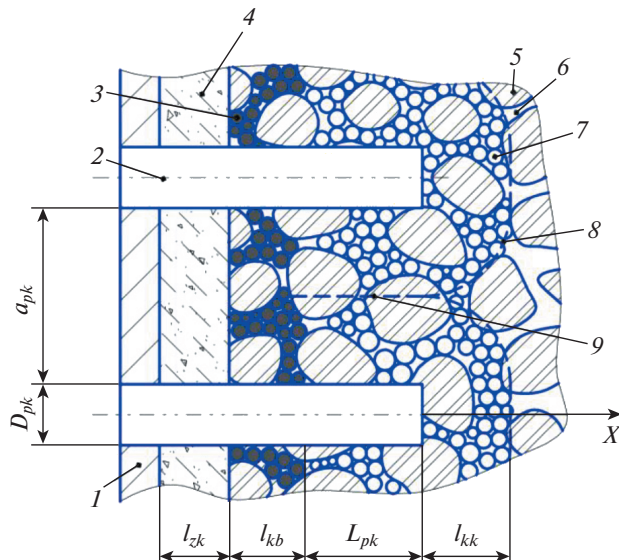


Рис. 1. Схема размещения перфорационных каналов.

кости;  $c_g$  — скорость звука в ней;  $\rho_k$  — плотность частицы колюматанта;  $\Omega$  — круговая частота колебаний

$$q_p = \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\rho_g}{\rho_k} \right) \right] \left( 2 + \frac{\rho_g}{\rho_k} \right)^{-2}.$$

На отделяющуюся из слоя колюматации частицу влияют силы инерции  $F_i$ , сопротивления ее движению в волновом поле относительно промывочной жидкости  $F_c$ , периодическая вынуждающая сила  $F_f$ , обусловленная действием звукового давления волнового поля, а также силы упругости  $F_{up}$ , сил давления при депрессии  $F_{dd}$  или при репрессии  $F_{dr}$  на слой колюматации, молекулярного притяжения между частицами колюматационной пробки  $F_m$ , расклинивающего давления диффузных слоев сольватной оболочки частицы, пленок жидкости и адсорбированных молекул поверхностно-активных веществ (ПАВ)  $F_{ds}$ , сила трения или пластической деформации частицы в сужении порового канала  $F_{tr}$ , силы нелинейного волнового происхождения  $F_s$ .

Периодическая вынуждающая сила  $F_f$ , обусловленная действием звукового давления волнового поля на частицу в слое колюматации, будет равна

$$F_f = \frac{p_{0sk} \Omega \pi d_k^3}{6c_g} \cos \Omega t, \quad (2)$$

где  $p_{0sk}$  — амплитуда звукового давления волны в слое колюматации.

$$p_{0sk} = p_{0w} W_k \sqrt{\frac{8l_{kk}^2 + 2\pi D_{pk} + D_{pk}^2}{D_{pk}^2}},$$

где  $W_k$  — коэффициент прохождения волны в слой колюматации породы.

Сила расклинивающего давления диффузных слоев сольватной оболочки частицы кольматанта и адсорбированных молекул поверхностно-активных веществ (ПАВ) [11]

$$F_{ds} = \pi \zeta \varepsilon_o \varepsilon d_k \varphi_{\sigma}^2 \frac{\chi_{ds} e^{-\chi_{ds} h_t}}{1 + e^{-\chi_{ds} h_t}} - \frac{A^* d_k}{24 h_t}. \quad (3)$$

Молекулярное притяжение частицы кольматанта к другим частицам или горной породе [12]

$$F_m = \frac{B}{h_t}. \quad (4)$$

Сила сопротивления движению частицы кольматанта в волновом поле относительно промывочной жидкости

$$F_c = \delta_c (x'_k - u_g), \quad (5)$$

где  $\delta_c$  – коэффициент сопротивления движению частицы кольматанта в промывочной жидкости;  $x'_k$  – скорость движения частицы кольматанта в волновом поле;  $u_g$  – скорость течения промывочной или пластовой жидкости в поровом канале или трещине породы, порожденная колебаниями давления;

$$x'_k = \Omega \sqrt{M_{dk}^2 + N_{dk}^2} \sin(\Omega t + \varphi),$$

где

$$M_{dk} = \frac{m_k (F_{0f} + \delta_c U_{0g}) (\omega_k^2 - \Omega^2) + m_k \delta_c a_{0g} \omega_k^2 \Omega}{m_k^2 (\omega_k^2 - \Omega^2)^2 + \delta_c^2 \Omega^2},$$

$$N_{dk} = \frac{(F_{0f} + \delta_c U_{0g}) \delta_c \Omega + m_k^2 a_{0g} \Omega^2 (\omega_k^2 - \Omega^2)}{m_k^2 (\omega_k^2 - \Omega^2)^2 + \delta_c^2 \Omega^2},$$

где  $m_k$  – масса частицы кольматанта;  $F_{0f}$  – амплитудное значение периодической вынуждающей силы, порожденной колебаниями давления;  $U_{0g}$  – амплитудное значение скорости течения промывочной или пластовой жидкости в поровом канале породы порожденной колебаниями давления;  $a_{0g}$  – амплитудное значение перемещения жидкости в волне давления;  $\omega_k$  – собственная частота колебаний частицы кольматанта

$$u_g = U_{0g} \cos \Omega t = \frac{p_{0sk}}{\rho_g c_g} \cos \Omega t, \quad \omega_k = \sqrt{\frac{3 \rho_g c_g}{2 t_r d_k \rho_k}},$$

где  $t_r$  – период релаксации пластовой гидросреды.

Сила инерции частицы, возникающая при ее колебаниях в волновом поле

$$F_i = m_k x''_k, \quad (6)$$

где  $x''_k$  – ускорение частицы кольматанта в волновом поле;

$$x''_k = -\Omega^2 \sqrt{M_{dk}^2 + N_{dk}^2} \sin(\Omega t + \varphi).$$

Сила упругости промывочной жидкости

$$F_{up} = K_g (x_k - a_g), \quad (7)$$

где  $x_k$  – колебания частицы кольматанта в волновом поле в промывочной или пластовой жидкости;  $a_g$  – колебания жидкости в волновом поле;  $K_g$  – коэффициент упру-

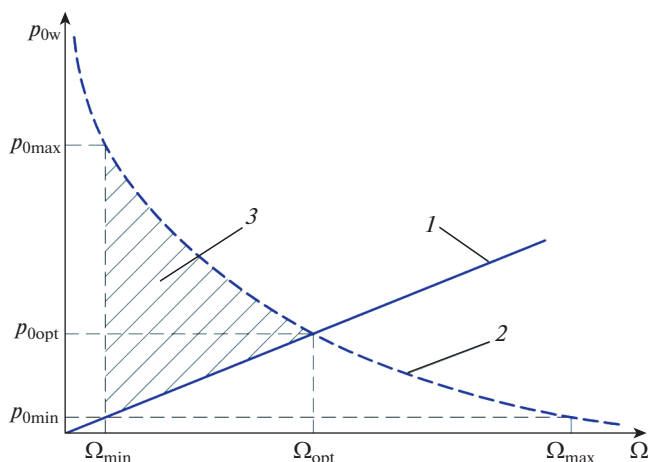


Рис. 2. Область выбора характеристик волнового поля при декольматации.

гости системы промывочной или пластовой жидкости с кольматантом в поровом пространстве ПЗП;

$$K_g = \frac{\pi d_k^2 \rho_g c_g}{4t_r}; \quad x_k = \sqrt{M_{dk}^2 + N_{dk}^2} \sin(\Omega t + \varphi); \quad a_g = a_{0g} \sin \Omega t = \frac{p_{0sk}}{\Omega \rho_g c_g} \sin \Omega t.$$

Сила трения частиц кольматанта при продавливании через сужение в канале породы

$$F_{tr} = \pi \tau_c d_{ks} \sqrt{(d_k^2 - d_{ks}^2)}, \quad (8)$$

где  $\tau_c$  – напряжение сдвига при пластической деформации;  $d_{ks}$  – диаметр сужения порового канала.

Верхний и нижний пределы амплитуд звукового давления определяются по двум зависимостям 1 и 2, область выбора 3, приведенным на рис. 2, на котором показаны максимальные, минимальные и оптимальные значения амплитуд давления  $p_{0max}$ ,  $p_{0min}$ ,  $p_{0opt}$  и круговой частоты колебаний волнового поля  $\Omega_{max}$ ,  $\Omega_{min}$ ,  $\Omega_{opt}$ .

Для достижения эффективного воздействия на слой кольматации (зависимость 1)

$$p_{0sk} \geq \Omega \rho_g c_g d_k, \quad (9)$$

где  $p_{0sk}$  – амплитуда давления волны, прошедшей в слой кольматации.

Для предупреждения усталостного разрушения породы ствола канала

$$p_{0gp} = \left( \frac{C_{up}}{\Omega t_{ob}} \right)^{1/m_{gp}}, \quad (10)$$

где  $p_{0gp}$  – амплитуда давления волны, прошедшей в скелет горной породы;  $C_{up}$  – константа кривой 2 усталостной прочности породы;  $m_{gp}$  – показатель степени данной кривой;  $t_{ob}$  – продолжительность волнового воздействия.

**Депрессионно-волновая декольматация.** Рассмотрим силы, действующие на твердую частицу в условиях более низкого давления жидкости в скважине чем в пласте, при монохроматическом волновом процессе. Условием осуществления начала декольма-

тации будет нарушение устойчивости хотя бы одной из частиц кольматанта пробки в канале породы под воздействием сил

$$F_{dd} \geq F_f - F_{ds} + F_s + F_m + F_c + F_i + F_{up} + F_{tr}. \quad (11)$$

Сила, порожденная депрессией в скважине на отдельную частицу слоя кольматации или иных отложений в поровых каналах породы, равна

$$F_{dd} = \frac{\pi}{4} \Delta P_d d_k^2, \quad (12)$$

где  $\Delta P_d$  – перепад давления в слое кольматации в условиях депрессии.

$$\Delta P_d = \frac{\mu_g Q_f}{2\pi} \left\{ \frac{1}{2Ak_k} \ln \frac{a_{pk}(B+A) + (B^2 - A^2)}{a_{pk}(B-A) + (B^2 - A^2)} + \frac{1}{h_{pl}k_0} \ln \frac{R_1}{R_c + \frac{a_{pk}}{2} + L_{pk}} + \frac{1}{2Ak_k} \ln \frac{[a_{pk}(B+A) + 2(B^2 - A^2)][a_{pk}(B-A) + B^2 - A^2]}{[a_{pk}(B-A) + 2(B^2 - A^2)][a_{pk}(B+A) + B^2 - A^2]} \right\}, \quad (13)$$

где  $\mu_g$  – вязкость пластовой жидкости;  $Q_f$  – объемная скорость фильтрации жидкости из пласта в перфорационный канал с глубины от половины расстояния  $L_{pk}$  между каналами;  $k_k$  – проницаемость слоя кольматации в породе пласта;  $h_{pl}$  – толщина пласта;  $k_0$  – проницаемость незагрязненной породы ПЗП;  $R_1$  – средний радиус залегания слоя кольматации от оси скважины;  $R_c$  – радиус ее ствола;

$$A = \sqrt{\frac{(\pi D_{pk} + 2L_{pk})^2}{8} - \frac{D_{pk}^2}{8} + \frac{D_{pk}L_{pk}}{2}}; \quad B = \frac{\pi D_{pk} + 2L_{pk}}{8}.$$

Допустимая депрессия на пласт  $\Delta P_{ddop}$  определяется с учетом выполнения следующих условий [13]:

– преодоление сопротивления течению жидкости, выносу технологических отложений и кольматанта из пласта

$$\Delta P_{ddop} \triangleright P_{pl} - P_{skw}, \quad (14)$$

где  $P_{pl}$  – давление жидкости в пласте;  $P_{skw}$  – давление жидкости в скважине;

– обеспечение прочности цементного камня

$$\Delta P_{ddop} \leq P_{pl} - (P_{wg} - \gamma_d \alpha_{gd} h_{ck}), \quad (15)$$

где  $P_{wg}$  – давление жидкости в водоносном горизонте;  $\alpha_{gd}$  – допустимый градиент давления на цементный камень;  $\gamma_d$  – коэффициент, учитывающий влияние волн давления на допустимый градиент;  $h_{ck}$  – высота камня между интервалом перфорации и водоносным горизонтом;

– обеспечение условия устойчивости горной породы ПЗП

$$\Delta P_{ddop} \leq \frac{\tau_z \sigma_{sgp}}{2} - \frac{\nu}{1-\nu} (\rho_{gp} g H_{spl} - P_{pl}), \quad (16)$$

где  $\tau_z$  – коэффициент, учитывающий влияние на предел прочности породы циклических воздействий (в том числе волн давления), их продолжительности;  $\sigma_{sgp}$  – предел прочности на сжатие;  $\nu$  – коэффициент Пуассона для породы пласта;  $\rho_{gp}$  – плотность

породы;  $g$  – ускорение свободного падения;  $H_{spl}$  – глубина залегания пласта по вертикали;

– предупреждение смыкания трещин в трещиноватых коллекторах

$$\Delta P_{dop} \leq \frac{\varepsilon_d \delta_{tr} E}{4l_{tr}(1 - \nu^2)}, \quad (17)$$

где  $\varepsilon_d$  – коэффициент, учитывающий влияние волн давления при депрессии;  $\delta_{tr}$  – ширина раскрытия трещин;  $l_{tr}$  – длина трещин;  $E$  – модуль упругости породы;

– предотвращение выделения газа с прорывом в скважину

$$\Delta P_{dop} \approx P_{pl} - 0.6\xi P_{ng}, \quad (18)$$

где  $\xi$  – коэффициент, учитывающий влияние волн давления;  $P_{ng}$  – давление насыщения нефти газом.

Таким образом, депрессионно-волновая очистка ПЗП осуществляется за счет действия сил (1)–(8), а обеспечение требований по устойчивости породы ПЗП, прочности цементного камня и так далее определяется выполнением условий (9), (10), (14)–(18).

**Репрессионно-волновая декольматация.** Силы, действующие на твердую частицу в слое кольматации при избыточном давлении промывочной жидкости в скважине над пластовым давлением (репрессии)

$$F_{dr} \geq F_i - F_{ds} - F_f - F_s + F_c + F_m + F_{up} + F_{tr}. \quad (19)$$

Превышение давления в скважине над пластовым давлением может оказать заметное влияние на динамику частиц кольматанта в поровых каналах породы.

Сила, порожденная репрессией в скважине на отдельную частицу слоя кольматации и иных отложений в поровых каналах породы

$$F_{dr} = \frac{\pi}{4} \Delta P_r a_k^2, \quad (20)$$

где  $\Delta P_r$  – репрессия в слое кольматации, выражение аналогично формуле (13).

$$\Delta P_r = \frac{\mu_g Q_f}{2\pi} \left\{ \frac{1}{2Ak_k} \ln \frac{a_{pk}(B+A) + (B^2 - A^2)}{a_{pk}(B-A) + (B^2 - A^2)} + \frac{1}{h_{pl}k_0} \ln \frac{R_1}{R_c + \frac{a_{pk}}{2} + L_{pk}} + \frac{1}{2Ak_k} \ln \frac{[a_{pk}(B+A) + 2(B^2 - A^2)][a_{pk}(B-A) + B^2 - A^2]}{[a_{pk}(B-A) + 2(B^2 - A^2)][a_{pk}(B+A) + B^2 - A^2]} \right\}.$$

Условием осуществления начала декольматации будет нарушение устойчивости хотя бы одной из частиц кольматанта пробки в канале породы, описываемых формулами (1)–(8), (20).

Верхний и нижний пределы амплитуд звукового давления определяются по двум зависимостям (9) и (10).

Допустимое значение репрессии на пласт  $\Delta P_{rdop}$  будет определяться с учетом выполнения следующих условий:

– преодоление сопротивления течению жидкости, перенос технологических отложений и кольматанта в глубь пласта

$$\Delta P_{rdop} \triangleright P_{skw} - P_{pl};$$

– обеспечение прочности цементного камня

$$\Delta P_{rdop} \leq P_{skw} - (P_{wg} - \alpha_{dgd} h_{ck}).$$

Приведенные выше условия обеспечат процесс декольматации без потери устойчивости горной породы пласта с соблюдением прочности цементного камня, развитием имевшихся, восстановлением сомкнувшихся и возможным появлением новых трещин в трещиноватых коллекторах.

**Влияние кавитации на процессы волновой декольматации породы.** Слой кольматации в пористой породе, представляющий собой полидисперсную систему, каркас которой образован из крупных частиц, в пространстве между которыми находятся более мелкие, содержит множество капиллярных и субкапиллярных каналов, малопроницаемых в обычных условиях для гидросред скважины и пласта.

На изменение коллекторских свойств пласта может повлиять кавитационно-абразивное разрушение поверхности сужений поровых и иных каналов в горной породе, приводящее к увеличению ее проницаемости. Так гранулярная горная порода представляет собой структуру, сложенную из мелких и крупных абразивных зерен, сцементированных по местам контакта друг с другом менее твердым материалом. Стенка перфорационного канала, образованная в такой породе, имеет неровную шероховатую поверхность с множеством микроканалов. Кавитация, прежде всего, зарождается на границе раздела фаз, особенно на твердой и шероховатой поверхности, где при захлопывании кавитационных пузырьков вблизи от входа в поровый канал или микротрещину возникает эффект “фокусировки” ударной микроволны [10, 14].

При создании длительной депрессии в 5–7 МПа из глубины пласта начинает поступать в ПЗП более горячая пластовая жидкость, что приводит также к интенсивному росту количества и размеров кавитационных пузырьков газа. Кроме того, порождаемые волновым полем газодиффузионные кавитационные процессы сопровождаются выделением тепла, способствующего разогреву асфальтосмолистых и парафинистых отложений в слое кольматации, вязкость которых существенно снижается, что облегчает очистку от них ПЗП.

Пульсация кавитационных газовых пузырьков и рост температуры на их границах приводит к испарению жидкости и возникновению микропузырьков пара, что существенно усиливает процесс кавитации, порождаемый волновым полем у поверхности закольматированной породы. Возникает звукокапиллярный эффект, сопровождающийся аномально высокой мгновенной фильтрацией промывочной среды через капиллярные каналы в слой кольматации, что вызывает разупрочняющее действие на пробки кольматанта расклинивающего давления пленок пластовой или промывочной жидкости, а также поверхностно-активных веществ, образуемых на поверхности частиц и породы. Эти пленки играют роль смазки между частицами слоя кольматации, ослабляющей структурно-механическую устойчивость слоя и адгезионное взаимодействие кольматанта с поверхностью породы.

Ударные микроволны давления и высокоскоростные микроструйки среды вызывают разрушение цемента зерен породы, а сами абразивные зерна скелета породы попадают в промывочную среду и способствуют кавитационно-абразивной эрозии породы.

Возникновение кавитации на глубине залегания продуктивных пластов подтверждается исследованиями характера разрушения в процессе бурения на глубинах 1500–2500 м стволов скважин в Западной Сибири керамических волновых кавитационно-вихревых генераторов, размещенных в стальной оболочке и выполненных в форме стакана, имеющего торцевую глухую стенку в цилиндрической вихревой камере и одно выходное отверстие. Характерная кавитационная эрозия стальной оболочки возникла вокруг входного тангенциального отверстия генератора и в виде образовавшегося в центре торцевой стенки сквозного отверстия диаметром до 5 мм. В то время



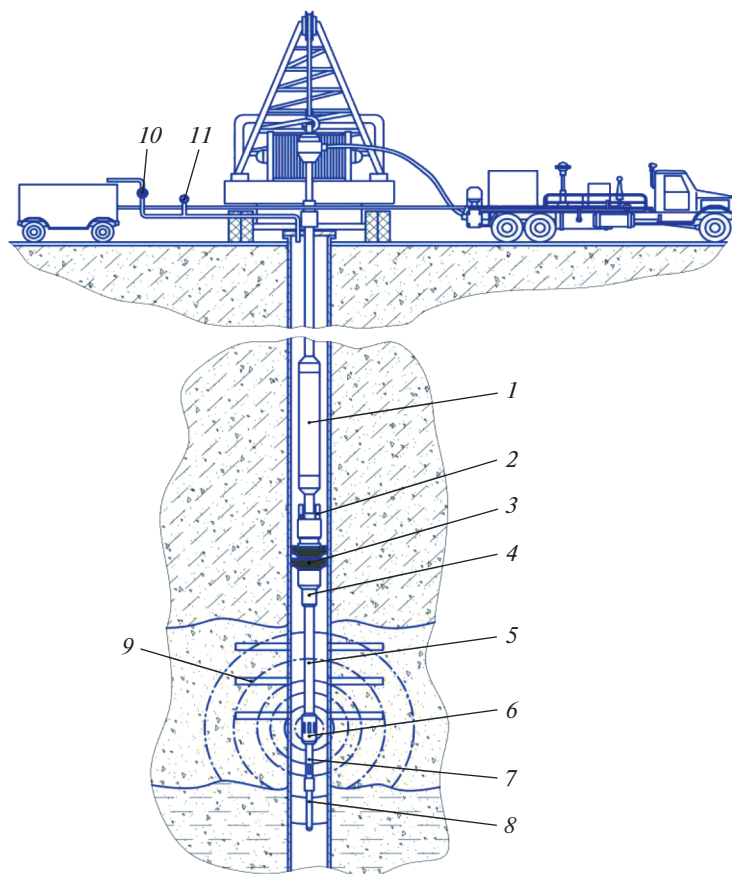


Рис. 3. Схема репрессивно-депресссионной волновой обработки ПЗП.

как в условиях меньшего гидростатического давления в процессе проведения лабораторно-стендовых экспериментов при гидростатическом давлении 1.5 МПа зона кавитации принимала кольцевую форму в месте стыка цилиндрической и торцевой стенок вихревой камеры.

**Промысловые испытания технологии и техники волновой очистки ПЗП.** В качестве базы для их разработки послужили способ и устройство для его осуществления [2], которые в настоящее время существенно усовершенствованы.

Устройство для репрессивно-депресссионной волновой обработки (рис. 3) состоит из турбинного привода 1, струйного насоса 2, гидравлического пакера 3, роторно-пульсационного генератора 4, трубы-волновода 5, волновода 6, контейнера с автономным термоманометром 7.

В настоящее время оно может включать и регистратор 8 волн давления. В связи с отсутствием в 2016 году автономного регистратора характеристик волн давления во время проведения пробных скважинных испытаний пользовались расчетными данными. Частота создаваемых роторно-пульсационным генератором колебаний давления находилась в пределах 80–100 Гц с амплитудой 1.5–2.5 МПа.

Дата и место проведения опытно-промысловых работ (ОПР) – с 02.10.2016 по 05.10.2016 г., скважина № 8666 Ново-Елховского месторождения ПАО “Татнефть”, продуктивный пласт – карбонатные отложения турнейского яруса, интервал 9 перфорации 1138–1148 м. Перед спуском устройства закачали в ПЗП скважины растворитель асфальто-смолистых и парафинистых отложений объемом  $10 \text{ м}^3$ .

Затем компоновка подсоединялась к насосному агрегату, гидравлически связанному с желобной емкостью. К емкости от скважины подводилась сливная линия с регулятором *10* и регистратором *11* давления на устье скважины.

При проведении депрессионно-волновой обработки ПЗП скважины с циркуляцией  $30 \text{ м}^3$  нефти в течение 11 ч 35 мин было извлечено из пласта  $35.2 \text{ м}^3$  жидкости, содержащей технологические отложения, в том числе и продукты растворения АСПО. Средний приток из пласта в скважину составил  $4.5 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Репрессионно-волновое воздействие на пласт не проводилось.

Результаты гидродинамических исследований ПЗП скважины до и после депрессионно-волновой обработки [16] были следующие.

Прирост дебита по нефти в октябре 2016 года составил 2 т/сут.

Последующие два месяца работы сохранялась положительная динамика со средним дебитом по жидкости  $6 \text{ м}^3/\text{сут}$ , по нефти – 4.6 т/сут, при обводненности 9% и давлении на забое – 22–23 ат.

По результатам гидродинамических исследований достигнуто увеличение коэффициента продуктивности с  $0.303 \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{ат})$  по КВУ 10.10.2016 до  $1.587 \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{ат})$  по КВУ от 17.10.2016.

Глубина забоя уменьшилась на 2 м, очевидно, выпали, выносимые из пласта более крупные и тяжелые механические примеси.

**Заключение.** Получены математические модели динамики частиц кольматанта при депрессии и репрессии на пласт в процессе волновой очистки породы ПЗ, определены условия ее осуществления.

Оценены допустимые значения депрессии в процессе волновой обработки при выполнении следующих условий: преодоление сопротивления течению жидкости, обеспечение выноса технологических отложений и кольматанта из ПЗП в скважину; обеспечение прочности цементного камня и устойчивости породы ПЗП; предупреждение смыкания трещин в трещиноватых коллектора; предотвращение выделения газа с прорывом в скважину.

Допустимые значения репрессии в процессе волновой обработки определяются при выполнении следующих условий: преодоление сопротивления течению жидкости, перенос технологических отложений и кольматанта в глубь пласта; обеспечение прочности цементного камня.

Оценено ожидаемое влияние кавитации на процессы очистки породы ПЗП при волновой декольматации на больших глубинах залегания пластов.

Предложена гипотеза механизма возникновения газодиффузионной и парогазовой кавитации. Приведены доказательства ее возникновения при анализе характера эрозийного износа участков волновых вихревых генераторов.

Разработаны техника и технология депрессионно-репресссионной волновой очистки ПЗП, подтверждены их эффективность при проведении ОПР.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Апасов Т.К., Апасов Г.Т., Саранча А.В.* Использование виброволнового воздействия для восстановления продуктивности скважин. Тюмень: ж-л “Современные проблемы науки и образования”. ФГБОУ ВПО “Тюменский государственный нефтегазовый университет”, 2015. № 1–1.
2. *Шамов Н.А.* РФ Патент 1762602, 1993.
3. *Ганиев Р.Ф.* Волновые машины и технологии (Введение в волновую технологию). М.: Научно-издательский центр “Регулярная и хаотическая динамика”, 2008. 192 с.
4. *Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е., Андреев В.Е., Котенев Ю.А.* Проблемы и перспективы волновой технологии многофазных систем в нефтяной и газовой промышленности. СПб.: Недра, 2008. 185 с.
5. *Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е.* Нелинейная волновая механика и технология. Волновые и колебательные явления в основе высоких технологий. Изд. 2-е, дополн. М.: Институт компьютерных исследований; Научно-издательский центр “Регулярная и хаотическая динамика”, 2011. 780 с.
6. *Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е., Ганиев О.Р.* Приложение эффектов нелинейной волновой механики в процессах нефтегазодобычи // VI Конгресс нефтепромышленников России. Секция В “Проблемы освоения трудноизвлекаемых запасов углеводородов”. Научные труды. Уфа, 2005. С. 10.
7. *Ганиев О.Р., Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е.* Резонансная макро- и микромеханика нефтяного пласта. Интенсификация добычи нефти и повышения нефтеотдачи. Наука и практика. М., Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. 256 с.
8. *Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е., Фролов К.В.* Волновой механизм ускорения движения жидкости в капиллярах и пористых средах // Доклады АН СССР. 1989. Т. 306. № 4.
9. *Шамов Н.А.* Особенности динамики твердых частиц суспензии в моно- и полихроматическом звуковых полях // Механика и процессы управления, раздел Механика жидкости и газа: труды XXXIII Уральского семинара РАН. Миасс: Урал. отд. РАН, 2003. С. 72.
10. *Ультразвук: Маленькая энциклопедия / Под ред. И.П. Галяминой.* М.: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.
11. *Шукин Е.Д., Перцев А.В., Амелина Е.А.* Коллоидная химия. М.: Изд-во МГУ, 1982. 348 с.
12. *Воюцкий С.С.* Курс коллоидной химии. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Химия, 1976. 512 с.
13. *Булатов А.И., Качмар Ю.Д., Макаренко П.П., Яремичук Р.С.* Освоение скважин. М.: Недра, 1999. 472 с.
14. *Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф.* Кавитация. М.: Мир, 1974. 687 с.
15. *Шамов Н.А., Лягов А.В., Зинатуллина Э.Я. и др.* Технология и технические средства улучшения гидродинамической связи скважины с пластом // Электронный научный журнал “Нефтегазовое дело”. 2006. № 1. С. 47.
16. *Дубинский Г.С., Андреев В.Е., Котенев Ю.А., Устенко И.Г., Шамов Н.А., Фаттахов И.Г.* Анализ результатов опытно-промышленных работ по интенсификации притока нефти из карбонатов. Уфа: Вестник академии наук РБ. 2017. Т. 25. № 4.