

Техніка і технології

УДК 621.577

DOI: 10.31471/1993-9973-2019-4(73)-16-23

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВОДОЗАБІРНИХ СВЕРДЛОВИН ВИРОБНИЧИХ ОБ'ЄКТІВ НАФТОГАЗОВОГО КОМПЛЕКСУ

М. П. Школьний, О. М. Бортняк, І. І. Стеліга, Г. Д. Лялюк-Вітер, В. Я. Шиманський*

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727158,
e-mail: bzhhd@nimg.edu.ua*

Постачання нафтоперекачувальних і компресорних станцій систем магістрального транспорту вуглеводневих енергоносіїв, а також більшості інших виробничих об'єктів нафтогазового комплексу водою забезпечується, зазвичай, з підземних джерел. У такому випадку роль водозабірних споруд відіграють бурові колодязі або спеціальні свердловини, значна частина яких улаштована у нестійких водоносних породах, що передбачає необхідність застосування фільтрів різних конструкцій. У процесі експлуатації систем вододоставання фільтри свердловин і прифільтрові зони водоносних пластів забруднюються механічними частинками, а також нашаруваннями розчинених у підземних водах солей кальцію, магнію, кремнію та інших елементів, що неодмінно призводить до збільшення гідравлічного опору, і відповідно, до зниження притоку води і продуктивності водозаборів. Будівництво нових споруд вимагає додаткових, достатньо суттєвих капітальних вкладень, тому вважається економічно недоцільним і застосовується у крайніх випадках. Більш раціональним способом відновлення дебіту свердловин є очищення фільтрів і прифільтрових зон водоносних горизонтів від кольматаційних відкладень, що дає змогу отримати суттєвий економічний ефект. Аналіз існуючих способів і засобів відновлення водозабірних свердловин свідчить, що, не дивлячись на актуальність питання необхідності покращення водопостачання і раціонального використання підземних вод, пошук найбільш ефективних методів регенерації систем водозабору триває. Розроблення режимів оброблення фільтрів і прифільтрової зони водоносних пластів передбачає сьогодні використання підходів, в яких узагальнено досвід попередніх методів без достатнього теоретичного і експериментального обґрунтування. Авторами запропоновано більш ефективний метод руйнування і диспергування кольматаційних відкладень створенням у порожнині фільтра вібраційного впливу і потужного фільтраційного потоку змінного напрямку шляхом реалізації багатократного регульованого вибуху газоповітряної суміші, що дає змогу використовувати його у достатньо широкому діапазоні гідрогеологічних умов, а також у свердловинах, обладнаних різними типами фільтрів. Такий спосіб відрізняється доступністю, простотою і низькою вартістю. З метою встановлення науково-обґрунтованих критеріїв вибору оптимальних режимів оброблення свердловин зазначеним способом авторами проведено низку досліджень, одним з основних завдань яких було встановлення характеру розповсюдження у водоносному горизонті параметрів пружних гідродинамічних коливань, викликаних вибухом газоповітряної суміші у зоні фільтра водозабірної свердловини.

Ключові слова: поршень-снаряд; зона фільтра свердловини; тиск вибуху; гідродинамічні коливання, газоповітряна суміш.

Водообеспечение нефтеперекачивающих и компрессорных станций систем магистрального транспорта углеводородных энергоносителей, а также большинства других производственных объектов нефтегазового комплекса реализуется, как правило, из подземных источников. В таком случае роль водозаборных сооружений играют буровые колодцы или специальные скважины, значительная часть которых устроена в неустойчивых водоносных породах, что предусматривает необходимость применения фильтров различных конструкций. В процессе эксплуатации систем водоснабжения фильтры скважин и прифильтровые зоны

водоносних пластів закриваються механічними частинками, а також наростаннями розчинених в підземних водах солей кальція, магнія, кремнія і других елементів, що непременно приводить до збільшенню гідравлічного опору і, відповідно, до зниженню притоку води і продуктивності водозаборок. Будівництво нових споруджень потребує додаткових, достатньо суттєвих капітальних вкладень, тому вважається економічно нецелесообразним і використовується дуже рідко. Більш раціональним способом відновлення дебіта скважин вважається очищення фільтрів і прифільтрованих зон водоносних горизонтів від колювативних відкладень, що дозволяє отримати суттєвий економічний ефект. Аналіз існуючих способів і засобів відновлення водозабірних скважин показує, що незважаючи на актуальність питання про необхідність покращення водопостачання і раціонального використання підземних вод, пошук найбільш ефективних методів регенерації систем водозабора продовжується. Розробка режимів обробки фільтрів і прифільтрової зони водоносних пластів передбачає сьогодні використання підходів, в яких обобщені досвід попередніх методів без достаточного теоретичного і експериментального обґрунтування. Авторами запропоновано більш ефективний метод руйнування і диспергування колювативних відкладень створенням в порожнині фільтра вібраційного впливу і потужного фільтраційного потоку змінного напрямку шляхом реалізації багаторазового регульованого вибуху газозовдушною сумішшю, що дозволяє використовувати його в достатньо широкому діапазоні гідрогеологічних умов, а також в скважинах, обладнаних різними типами фільтрів. Запропонований спосіб відрізняється доступністю, простотою і низькою вартістю. З метою встановлення науково-обґрунтованих критеріїв вибору оптимальних режимів обробки скважин вказаним способом, авторами проведено ряд досліджень, однією з основних задач яких було встановлення характеру поширення в водоносному горизонті параметрів еластичних гідродинамічних коливань, викликаних вибухом газозовдушною сумішшю в зоні фільтра водозабірної скважини.

Ключові слова: поршень-снаряд; фільтр скважини; тиск вибуху; гідродинамічні коливання, газозовдушна суміш.

Water for oil pump stations and compressor stations of the main hydrocarbon carriers transmission systems, as well as for most other production facilities of the oil and gas complex is usually supplied from the underground sources. In this case, the function of water intake structures is performed by the bored wells or special wells. As most of them are located in quick ground, they require the use of filters of various designs. In the process of water supply systems operation, wells filters and pre-filter zones of aquifers are contaminated with mechanical particles as well as with the depositions of calcium salt, magnesium salt, silicon salt and other elements dissolved in underground waters. It inevitably leads to the increase in hydraulic resistance and, accordingly, to the decrease in water flow and water intakes productivity. The construction of new buildings requires additional substantial capital investments; therefore it is considered to be economically impracticable and is used very rarely. The more rational way to restore the well flow rate is to clean the filters and the aquifers pre-filter zones off the clogging. It gives a possibility to get a significant economic effect. The analysis of the existing methods and means of water supply wells recovery shows that despite the urgent need to improve water supply and to use groundwater rationally, the search for the most effective methods of regeneration of water take systems is still ongoing. Nowadays, the development of treatment modes for filters and the prefilter zone of aquifers implies the use of approaches that summarize the experience of previous methods which need further theoretical and experimental justification. The authors offer a more effective method for the destruction and dispergation of colmatation deposits. It requires the creation of the vibrational impact inside the filter as well as the creation of a powerful filtration flow of alternating direction by implementing a multi-regulated explosion of the steam-and-gas mixture. It gives an opportunity to use it under a wide range of hydrogeological conditions, as well as in the wells equipped with filters of different types. The suggested method is simple and cost-efficient. In order to find scientifically substantiated criteria for the selection of optimal modes of wells treatment using this method, the authors have made a series of research. One of the main purposes of the studies is to determine the nature of the distribution and the parameters of elastic hydrodynamic oscillations in the aquifer which are caused by the explosion of steam-and-gas mixture in the filter area of the water supply well.

Keywords: piston shell; well filter; explosion pressure; hydrodynamic oscillations, steam-and-gas mixture.

Вступ

Досвід експлуатації систем забору підземних вод засвідчує, що час стабільної роботи водозабірних свердловин із проектним дебітом становить від півтора до двох з половиною років [1]. Надалі відбувається забруднення фільтрів та прифільтрової зони продуктами колювативу, що призводить до падіння дебіту і виходу свердловини з ладу. Підтри-

мання стабільної роботи систем забору підземних вод та вертикальних дренажних свердловин є комплексною проблемою, яка охоплює вибір найбільш ефективного методу регенерації, визначення раціонального міжремонтного періоду з урахуванням особливостей гідрогеологічної будови пласта, конструкції свердловини та умов її експлуатації.

З метою відновлення продуктивності свердловин використовують фізичні методи (вибух детонуючого шнура, пневмовибух, електрогідравлічний удар, імпульсний, ультразвуковий, вібраційний), хімічні (моно- та поліреагентні) та комбіновані [2-9]. Існуючі на даний час методи регенерації свердловин не дозволяють одночасно створити у прифільтрової зоні хімічне, теплове та гідродинамічне збурення, здатне забезпечити високу ступінь відновлення дебіту та збільшення міжремонтного періоду.

Вирішення даної проблеми можливе шляхом гідродинамічного збурення, штучно викликаного багаторазовим регульованим вибухом газоповітряної суміші у поршень-снаряді (рис. 1), розташованому у зоні забруднення свердловини з метою підвищення ефективності очищення фільтра і прифільтрової зони від продуктів кольматанту.

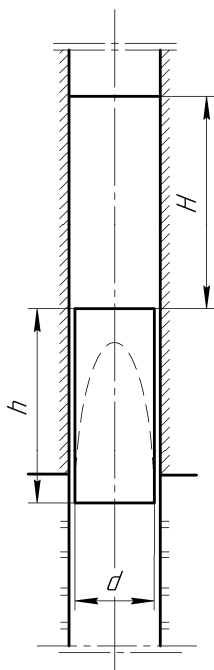


Рисунок 1 – Схема руху поршень-снаряду у стовбурі свердловини

Метою роботи є аналітичні дослідження розповсюдження пружних гідродинамічних коливань у водоносному горизонті, викликаних вибухом газоповітряної суміші у зоні фільтра водозабірної свердловини.

Об'єкт дослідження – водопостачання виробничих об'єктів нафтогазового комплексу.

Предмет дослідження – вплив енергетичного потенціалу газоповітряної суміші на параметри розповсюдження гідродинамічних коливань у фільтрі та прифільтрової зоні водозабірної свердловини.

Методи дослідження: математичне моделювання пружних гідродинамічних коливань

у водоносному горизонті, викликаних вибухом газоповітряної суміші у зоні фільтра водозабірної свердловини.

Розповсюдження хвиль тиску у пласті під час здійснення вибуху у свердловинах з урахуванням тривалості його впливу можна вважати рівномірним в усіх напрямках, тобто розглядати задачу як сферичну. В такому випадку розподіл тиску у пласті може бути поданий у вигляді рівняння [10]

$$\frac{\partial P}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial P}{\partial r} \right); \quad P = P(r, t), \quad (1)$$

де P – зміна тиску внаслідок вибуху;
 a – коефіцієнт п'єзопровідності пласту;
 r – відстань від центра вибуху до довільної точки.

Ввівши заміну

$$U = r \cdot P,$$

зведемо рівняння (1) до вигляду

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial r^2}; \quad U = U(r, t). \quad (2)$$

Розв'язок рівняння (2) передбачає можливість двох випадків: свердловина незакольматована і закольматована.

У першому випадку (рис. 2, а) вибух відбувається всередині сфери радіусом r , тобто рівняння (1) і (2) необхідно розв'язувати для області $r \geq r_0$. Граничні умови рівняння (1) в такому випадку мають вигляд:

– початкові умови

$$P(r, 0) = 0;$$

– відомий розподіл тиску на стінці свердловини

$$P(r_0, t) = f(t).$$

Зміна тиску в зоні фільтра свердловини може бути описана залежністю

$$f(t) = P_{\text{суб}} \sum_{i=1}^n e^{-\beta_i t} \cdot \sin \lambda_i t. \quad (3)$$

З віддаленням хвилі тиску затухають

$$P(\infty, t) = 0.$$

У змінних U умови набувають вигляду

$$U(r, 0) = 0;$$

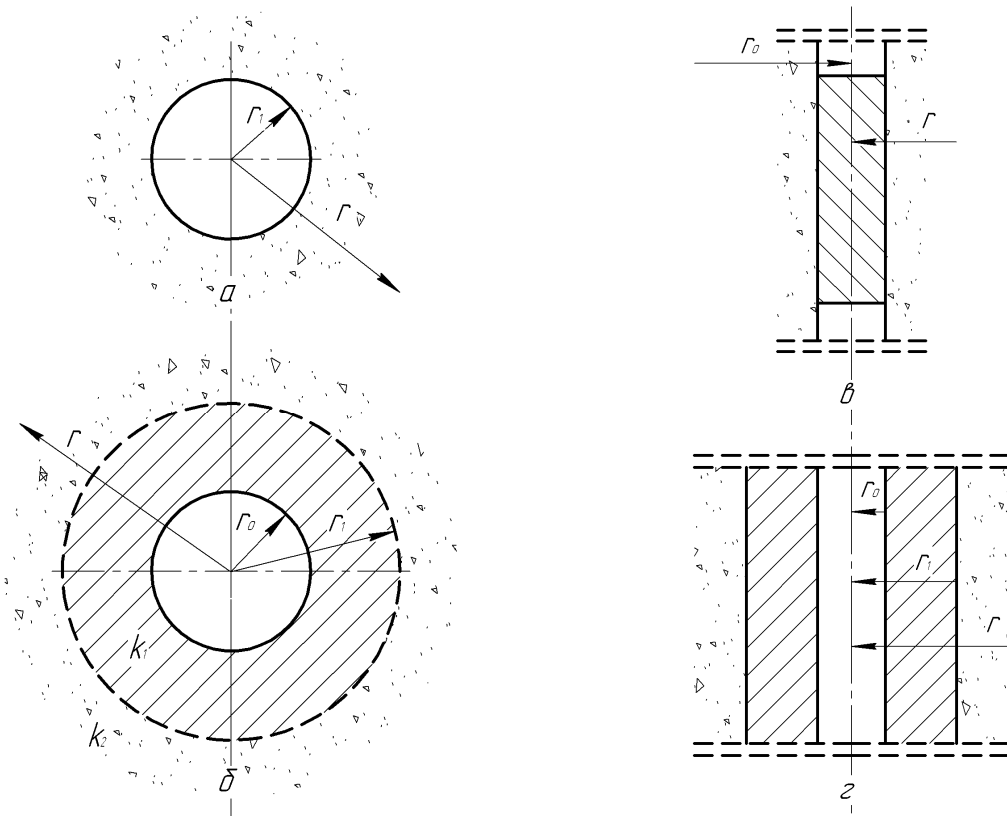
$$U(r_0, t) = r_0 \cdot f(t);$$

$$U(\infty, t) = 0.$$

Розв'язок такої задачі є відомим [1] і має вигляд

$$P = \frac{2r_0}{r \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \int_{\frac{\xi}{\sqrt{t}}}^{\infty} f \left(t - \frac{\xi^2}{\mu^2} \right) \cdot e^{-\mu^2} d\mu; \quad (4)$$

$$\xi = \frac{r - r_0}{2\sqrt{a}}.$$



*а - сферичне розповсюдження вибухової хвилі у незакольматованій свердловині;
 б - сферичне розповсюдження вибухової хвилі у закольматованій свердловині;
 в - осесиметричне розповсюдження вибухової хвилі у незакольматованій свердловині;
 г - осесиметричне розповсюдження вибухової хвилі у незакольматованій свердловині*

Рисунок 2 – Схеми для розрахунку розповсюдження хвиль тиску у водоносному горизонті

Отже, для визначення поля тиску необхідно знати вигляд функції $f(t)$, який встановлюється на основі розв'язку іншої задачі або на основі експериментальних даних.

В другому випадку (рис. 2, б) вихідні рівняння мають вигляд:

$$\frac{\partial P_1}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 P_1}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial P_1}{\partial r} \right); \quad r_0 \leq r \leq r_1; \quad (5)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 P_2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial P_2}{\partial r} \right); \quad r \geq r_1. \quad (6)$$

Граничними умовами даних рівнянь є

$$\begin{aligned} P_1(r, 0) &= P_2(r, 0) = P_2(\infty, t) = 0; \\ P_1(r_0, t) &= f(t) \quad P_1(r, t) = P_2(r, t); \\ k_1 \frac{\partial P_1(r_1, t)}{\partial r} &= k_2 \frac{\partial P_2(r_1, t)}{\partial r}. \end{aligned} \quad (7)$$

У змінних $U = rp_i$ рівняння (5) та (6) набувають вигляду

$$\frac{dU_1}{dt} = a_1 \frac{d^2 U}{dr^2}; \quad (8)$$

$$\frac{dU_1}{dt} = a \frac{d^2 U_2}{dr^2}. \quad (9)$$

Граничні умови для функції U_1 :

$$U_1(r, 0) = U_2(r, 0) = U_2(\infty, 0);$$

$$U_1(r_0, t) = r_0 f(t);$$

$$U_1(r_1, t) = U_2(r_1, t);$$

$$k_1 \left(\frac{1}{r} \frac{\partial U_1}{\partial r} - \frac{U_1}{r^2} \right)_{r=r_1} = k_2 \left(\frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} - \frac{U_2}{r^2} \right)_{r=r_1}. \quad (10)$$

З метою спрощення процесу розв'язання задачі (8)-(10) можна прийняти, що в зоні I ($r_0 \leq r \leq r_1$) рідина є нестисливою, тобто $a \rightarrow \infty$. Така постановка виправдана тим, що у незначній за товщиною $\Delta = r_1 - r_0$ зоні пружні властивості порід чинитимуть слабкий вплив на процес розповсюдження тиску у пласті. У такому випадку вихідна система (8)-(9) набуде вигляду

$$\frac{\partial^2 U_1}{\partial r^2} = 0; \quad \frac{\partial U_2}{\partial t} = a \frac{\partial^2 U}{\partial r^2}. \quad (11)$$

Розв'язок першого рівняння

$$U_1 = A_1 \cdot r + B_1.$$

Звідки

$$\frac{\partial U_1}{\partial r} = A.$$

Виходячи з умови (10), отримаємо

$$A_1 \cdot r_0 + B_1 = r_0 f(t),$$

звідки

$$B_1 = -A_1 \cdot r_0 + r_0 f(t).$$

Тоді

$$U_1 = r_0 f(t) + A_1 \cdot (r - r_0).$$

З граничної умови випливає

$$U_1|_{r=r_1} = U_2|_{r=r_1},$$

$$r_0 f(t) + A_1 \cdot (r_1 - r_0) = U_2(r_1, t),$$

звідки

$$A_1 = \frac{U_2(r_1, t) - r_0 f(t)}{r_1 - r_0}.$$

Отже,

$$U_1 = r_0 f(t) + \frac{U_2(r_1, t) - r_0 f(t) \cdot (r - r_0)}{r_1 - r_0}. \quad (12)$$

Підставляючи отримане значення у вихідний вираз, отримаємо

$$\left(\frac{1}{r} \frac{\partial U_1}{\partial r} - \frac{U_1}{r^2} \right)_{r=r_1} = \frac{U_2(r_1, t) - r_0 f(t)}{r_1(r_1 - r_0)} - \frac{U_2(r_1, t)}{r_1^2} = \frac{k_2}{k_1} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial U_2(r_1, t)}{\partial r} - \frac{U_2(r_1, t)}{r_1^2} \right]$$

або

$$\frac{\partial U_2}{\partial r} \Big|_{r=r_1} - \beta U_2|_{r=r_1} = \mathcal{E} f(t),$$

звідки

$$\beta = \frac{1}{r_1} \left(1 + \frac{r_0}{\sigma \cdot \Delta} \right); \quad \Delta = r_1 - r_0; \quad \sigma = \frac{k_2}{k_1};$$

$$\mathcal{E} = -\frac{r_0}{\sigma \Delta}.$$

Тобто замість виразів (8)-(10), отримуємо задачу

$$\frac{\partial U_2}{\partial t} = a \frac{\partial^2 U_2}{\partial r^2}; \quad U_2(r, 0) = U_2(\infty, t) = 0;$$

$$\frac{\partial U_2}{\partial r} \Big|_{r=r_1} - \beta U_2|_{r=r_1} = \mathcal{E} f(t),$$

для розв'язання якої застосуємо перетворення Лапласа

$$\bar{U} = \int_0^\infty e^{-s\tau} \cdot U \, d\tau.$$

Тоді отримаємо

$$\frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial r^2} - \frac{s}{a} \bar{U} = 0; \quad U_2(\infty) = 0;$$

$$\frac{\partial \bar{U}_2}{\partial r} - \beta \cdot \bar{U}_2 = \mathcal{E} \cdot \bar{f}(s);$$

$$\bar{f}(s) = \int_0^\infty e^{-s\tau} \cdot f(\tau) \, d\tau;$$

$$\bar{U}_2 = A \cdot e^{qr} + B e^{-qr}; \quad q = \sqrt{\frac{s}{a_2}}.$$

Виходячи з умови

$$U_2(\infty) = 0 \rightarrow A = 0,$$

отримаємо

$$\bar{U}_2 = B \cdot e^{-qr};$$

$$-B \cdot q \cdot e^{-qr} - \beta \cdot e^{-qr} = \mathcal{E} \cdot \bar{f}; \quad B = -\frac{\mathcal{E} \cdot \bar{f} \cdot e^{-qr}}{q + \beta};$$

$$\bar{U}_2 = -\mathcal{E} \frac{\exp[-q(r-r_1)]}{q + \beta} \bar{f}(s).$$

Переходимо до початкової функції за допомогою теореми про згортку

$$U_2 = -\mathcal{E} \int_0^t \frac{\sqrt{a_2}}{\sqrt{r_1}} \cdot \frac{f(t-\tau)}{\sqrt{\tau}} \cdot \exp\left[-\frac{(r-r_1)^2}{4a_2 \cdot \tau}\right] \partial \tau +$$

$$+ \beta \cdot a_2 \cdot \mathcal{E} \int_0^t \exp\left[\beta(r-r_1) + a_2 \cdot \beta^2 \cdot \tau\right] \times$$

$$\times f(t-\tau) \operatorname{erfc}\left[\frac{r-r_1}{2\sqrt{a_2 \cdot \tau}} + \beta \cdot \sqrt{a_2 \cdot \tau}\right] \partial \tau. \quad (13)$$

Звідси отримаємо вираз для визначення тиску

$$P_2 = \frac{U_2}{r} = \frac{\mathcal{E} \cdot \sqrt{a_2}}{r \cdot \sqrt{r_1}} \cdot \int_0^t \frac{f(t-\tau)}{\sqrt{\tau}} \cdot \exp\left[-\frac{(r-r_1)^2}{4a_2 \cdot \tau}\right] \partial \tau +$$

$$+ \frac{\beta \cdot a_2 \cdot \mathcal{E}}{r} \int_0^t \exp\left[\beta(r-r_1) + a_2 \cdot \beta^2 \cdot \tau\right] \times$$

$$\times f(t-\tau) \operatorname{erfc}\left[\frac{r-r_1}{2\sqrt{a_2 \cdot \tau}} + \beta \cdot \sqrt{a_2 \cdot \tau}\right] \partial \tau. \quad (14)$$

Рівняння (14) дозволяє встановити характер зміни тиску в часі і його величину в радіальному напрямку від осі свердловини. Знаючи величину тиску P_k , необхідного для руйнування кольматанту, і радіус r_k , на якому він повинен діяти, виходячи з (14), можна визначити необхідну величину тиску в зоні вибуху газоповітряної суміші. З цією метою розроблений і реалізований у програмному забезпеченні алгоритм розв'язку рівняння (14) на основі методу Сімпсона.

Порівняльний аналіз отриманих на основі експериментальних досліджень даних з встановленими значеннями міцності кольматанту дає підстави зробити висновок, що розрахункові напруження перевищують межу міцності на відстанях $r < 10$ см.

В пластах достатньо малої потужності задачу можна розглядати як осесиметричну. У такому випадку, якщо пласт є однорідним

(рис. 2, в), вихідне рівняння і крайові умови набувають вигляду

$$\frac{\partial P}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial P}{\partial r} \right); \quad r \geq r_0; \quad (15)$$

$$P(r, 0) = P(\infty, t) = 0; \quad P(r_0, t) = f(t). \quad (16)$$

Розв'язання поставленої задачі не є складним.

В пластах із замуленим або закольматованим фільтром (рис. 2, г)

$$\frac{d}{dr} \left(r \cdot \frac{dP_1}{dr} \right) = 0; \quad r_0 \leq r \leq r_1; \quad (17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 P_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial P_2}{\partial r} \right); \quad r > r_1. \quad (18)$$

Граничні умови

$$P_1(r_0) = f(t); \quad P_1(r, t) = P_2(r_1, t);$$

$$\frac{\partial P_1(r_1, t)}{\partial r} = \sigma \frac{\partial P_2(r_1, t)}{\partial r}; \quad \sigma = \frac{k_2}{k_1};$$

$$P_1 = A \ln r + B; \quad A \ln r_0 + B = f(t);$$

або

$$P_1 = A \ln \frac{r}{r_0} + f(t).$$

З умови рівності тисків у разі

$$A \ln \frac{r_1}{r_0} + f(t) = P_2(r_1, t) \rightarrow A = \frac{P_2(r_1, t) - f(t)}{\ln \frac{r_1}{r_0}}.$$

Тоді

$$P_1 = \frac{P_2(r_1, t) - f(t)}{\ln \frac{r_1}{r_0}} \ln \frac{r}{r_0} + f(t). \quad (19)$$

З умови рівності потоків

$$\frac{P_2(r_1, t) - f(t)}{\ln \frac{r_1}{r_0} \cdot r_1} = \sigma \frac{\partial P_2(r_1, t)}{\partial r}$$

або

$$\begin{aligned} & \frac{\partial P_2(r_1, t)}{\partial r} - \frac{1}{\sigma r_1 \ln \frac{r_1}{r_0}} P_2(r_1, t) = \\ & = \frac{1}{\sigma r_1 \ln \frac{r_1}{r_0}} = \frac{\partial P_2}{\partial r} - \beta P_2 = -\beta f(t)|_{r=r_1}; \end{aligned}$$

$$\beta = \frac{1}{\sigma r_1 \ln \frac{r_1}{r_0}}.$$

Тобто отримуємо задачу

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 P_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P_2}{\partial r} = \frac{1}{a} = \frac{\partial P_2}{\partial t}; \\ & P(r, 0) = P(\infty, t) = 0; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial r} - \beta P_2|_{r=r_1} = -\beta f(t).$$

Перетворення Лапласа

$$\bar{P}_2 = \int_0^\infty e^{-s\tau} P_2 d\tau;$$

$$\frac{\partial^2 \bar{P}_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{P}_2}{\partial r} - \frac{\bar{P}_2}{d} = 0; \quad \bar{P}_2(\infty) = 0;$$

$$\frac{\partial \bar{P}_2}{\partial r} - \beta \bar{P}_2|_{r=r_1} = -\beta f(s);$$

$$f_1(s) = \int_0^\infty e^{-s\tau} f(\tau) d\tau.$$

Розв'язок

$$\bar{P}_2 = AI_0(qr) + BK_0(qr); \quad A = 0; \quad q = \sqrt{\frac{S}{a}};$$

$$\bar{P}_2 = BK_0(qr); \quad \frac{\partial \bar{P}_2}{\partial r} = BqK_1(qr);$$

$$-BqK_1(qr_1) - \beta BK_0(qr_1) = -\beta f(s);$$

$$B = \frac{\beta f(s)}{\beta K_0(qr_1) + qK_1(qr_1)};$$

$$\bar{P}_2 = \frac{\beta f_1(s) K_0(qr)}{\beta K_0(qr_1) + qK_1(qr_1)}.$$

З метою спрощення встановлення розрахункових залежностей досліджуємо малі моменти часу, коли S є достатньо великим.

$$K_V(Z) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2Z}} \exp(-Z);$$

$$\bar{P}_2 = \frac{\beta f_1(s) \sqrt{\pi} \cdot e^{-qr}}{\sqrt{2qr} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{2qr_1}} \cdot e^{-qr} (\beta + q)} =$$

$$= \frac{\beta f_1(s) \exp[-q(r - r_1)]}{\sqrt{\frac{r}{r_1}} (\beta + q)} \approx \quad (20)$$

$$\approx \frac{\beta f_1(s) \exp[-q(r - r_1)]}{\sqrt{\frac{r}{r_1}} \cdot q};$$

Оригінал даного виразу дорівнює

$$P_2 = \frac{\beta}{\sqrt{r_1}} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_0^t \exp\left[-\frac{(r - r_1)^2}{4a(t - \tau)}\right] = \frac{f(t) \partial \tau}{\sqrt{t - \tau}}; \quad (21)$$

$$P_{2|r=r_1} = \beta \sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_0^t \frac{f(\tau) \partial \tau}{\sqrt{t - \tau}}. \quad (22)$$

Використовуючи отримані залежності $P(r, t)$ і знаючи величину тиску P_k , необхідно для руйнування продуктів кольматанту на відстані r від осі свердловини, можна знайти необхідний тиск вибуху у вибуховій камері поршень-снаряду.

Важливим завданням реалізації процесу впливу вибуху газоповітряної суміші у поршень-снаряді, розташованого у зоні оброблення свердловини, є також питання вибору раціональної періодичності імпульсної дії. У такому випадку період часу між двома вибухами повинен бути не меншим періоду переміщення поршень-снаряду у стовбурі свердловини, викликаного дією попереднього вибуху, і відповідати моментам часу, коли рівень рідини у свердловині буде мати максимальне значення. Тому, з точки зору розроблення технології процесу оброблення свердловини, важливим є питання встановлення характеру коливань рівня рідини у стовбурі свердловини. Загалом, рівень рідини у свердловині може бути описаний рівнянням виду

$$H(t) = z_0 + \frac{\Delta P(t)}{\rho g}, \quad (23)$$

де z_0 – статичний рівень у свердловині.

Швидкість зміни рівня

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{\rho g} + \frac{\partial P}{\partial t}. \quad (24)$$

Використовуючи вираз для коливань тиску, викликаних вибухом, у вигляді рівняння (3), отримаємо залежність швидкості зміни рівня

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\rho g} (\lambda_i \cos \lambda_i t - \beta \sin \lambda_i t) e^{-\beta t}. \quad (25)$$

У момент досягнення екстремального значення рівня рідини у свердловині швидкість її переміщення дорівнюватиме нулю. Тому такі моменти часу можуть бути знайдені, виходячи з рівняння

$$\frac{\partial H}{\partial t} = 0$$

або

$$\lambda \cos \lambda t - \beta \sin \lambda t = 0,$$

на основі чого

$$t_n = \frac{1}{\lambda} (\arctg \frac{\lambda}{\beta} + \pi n).$$

У такому випадку парні значення n будуть відповідати мінімальному значенню рівня рідини в свердловині, а непарні – максимальному. У результаті, з усієї множини значень t_n слід вибрати такі $t_j (j \in n)$, для яких

$n = (2j + 1)$, де $(j = 0, 1, 2, \dots, n)$. Іншими словами, максимальний рівень рідини у свердловині досягається у момент часу

$$t_j = \frac{1}{\lambda} \left[\arctg \frac{\lambda}{\beta} + \pi(2j + 1) \right]. \quad (26)$$

Кожний наступний вибух газоповітряної суміші у вибуховій камері поршень-снаряду повинен співпадати за часом з моментами t_j , у разі виконання умови

$$t_j > \tau,$$

де τ – повний час руху поршень-снаряду.

Таким чином, для визначення функції $H(t)$ необхідно знати розподіл тиску у пласті і в зоні фільтра у будь-який момент часу. У процесі вибуху розподіл тиску $f(t)$ у стовбурі свердловини може бути описаний рівнянням (3).

Наукова новизна результатів досліджень полягає у встановленні закономірностей впливу величини зусиль у будь-якій точці водоносного пласта на ступінь руйнування кольматанту за умов оброблення водозабірних свердловин з метою підвищення їх дебіту вибухом газоповітряних сумішей.

Практична цінність отриманих результатів

У результаті аналітичних досліджень розповсюдження гідродинамічних коливань у водоносному горизонті встановлені залежності, які дають змогу визначити величину тиску вибуху, необхідну і достатню для забезпечення руйнування кольматанту і раціональної періодичності проходження імпульсів тиску.

Висновок

На основі аналітичних досліджень побудовано математичну модель пружних гідродинамічних коливань у водоносному горизонті, яка дає змогу визначити величину напружень у будь-якій точці оброблення прифільтрової зони свердловини і відповідно встановити необхідний ступінь руйнування кольматанту. За отриманими результатами експериментального дослідження вибуху газоповітряної суміші у поршень-снаряді у стовбурі свердловини встановлено, що потужність вибуху визначає частоту руху поршень-снаряду, яка впливає на вібраційні характеристики системи «фільтр-прифільтрова зона-водоносний горизонт».

Література

1. Бортняк О.М., Школьний М.П., Долішній Б.В., Кулик М.П. Регенерація водозабірних свердловин вибухом газоповітряних сумішей. *Проблеми екологічної безпеки: матеріали XV Міжнар. наук.-техн. конф. Кременчук, 2017.* С. 131 - 132.
2. Абрамов С. К., Алексеев В. С. Забор воды из подземного источника. М.: Колос, 1980. 239 с.
3. Алексеев В.С., Волоховский Г.А., Гребенников В.Т. Учебная книга мастера по ремонту скважин на воду. М.: Колос, 1983. 253 с.
4. Алексеев В.С., Волоховский Г.А., Андреев К.Н., Гребенников В.Т. Руководство по применению реагентных методов восстановления производительности скважин. М.: Труды ВНИИ ВОДГЕО, 1977. 50 с.
5. Алексеев В. С., Щоголев Е. Ю. Импульсные методы освоения и регенерации скважин на воду. М.: ОЦИНТИВИЭМР, 1977. 25 с.
6. Алексеев В.С., Гаврилко В.М. Фильтры буровых скважин. М.: Недра, 1976. 345 с.
7. Ловля С. А. Взрывные работы в водозаборных скважинах. М.: Недра, 1974. 111 с.
8. Романенко В. А. Электрофизические способы восстановления производительности водозаборных скважин. Л.: Недра, 1980. 79 с.
9. Шляйферт М.А., Вольницкая Э.М. Увеличение дебита водяных скважин взрывом. М.: Недра, 1970. 63 с.
10. Карлслон Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1974. 487 с.

References

1. Bortniak O.M., Shkolnyi M.P., Dolishnyi B.V., Kulyk M.P. Reheneratsiia vodozabirnykh sverdlovyn vybukhom hazopovitrianykh sumishei. *Problemy ekolohichnoi bezpeky: materialy XV Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. Kremenchuk, 2017.* P. 131-132. [in Russian].
2. Abramov S. K., Alekseev V. S. Zabor vody iz podzemnogo istochnika. Moscow: Kolos, 1980. 239 p. [in Russian].
3. Alekseev V.S., Volohovskiy G.A., Grebennikov V.T. Uchebnaya kniga mastera po remontu skvazhin na vodu. Moscow: Kolos, 1983. 253 p. [in Russian].
4. Alekseev V.S., Volohovskiy G.A., Andreev K.N., Grebennikov V.T. Rukovodstvo po primeneniyu reagentnykh metodov vosstanovleniya proizvoditelnosti skvazhin. M.: Trudy VNI VODGEO, 1977. 50 p. [in Russian].
5. Alekseev V.S., Schogolev E.Yu. Impulsnyie metodyi osvoeniya i regeneratsii skvazhin na vodu. Moscow: OTsINTIVIEMR, 1977. 25 p. [in Russian].
6. Alekseev V.S., Gavrilko V.M. Filtryi burovyyih skvazhin. Moscow: Nedra, 1976. 345 p. [in Russian]
7. Lovlya S.A. Vzryivnyie robotyi v vodozabornyh skvazhinah. Moscow: Nedra, 1974. 111 p. [in Russian].
8. Romanenko V.A. Elektrofizicheskie sposobyi vosstanovleniya proizvoditelnosti vodozabornyih skvazhin. Leningrad: Nedra, 1980. 79 p. [in Russian].
9. Shlyayfert M.A., Volnitskaya E.M. Uvelichenie debita vodyanyih skvazhin vzryivom. Moscow: Nedra, 1970. 63 p. [in Russian].
10. Karlslou G., Eger D. Teploprovodnost tverdyih tel. Moscow: Nauka, 1974. 487 p. [in Russian].