

Tadeusz Szpunar, Paweł Budak
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Dobór wgłębnych filtrów przeciwpiaaskowych w odwiertach gazowych

Wprowadzenie

Ocenia się, że wydawane w światowym przemyśle naftowym kwoty na zapobieganie wynoszeniu piasku wraz z eksploatowaną ropą i gazem oraz na likwidację spowodowanych tym szkód (konieczność rekonstrukcji odwiertów, naprawy uszkodzonego sprzętu wgłębnego i powierzchniowego) dochodzą do wielu miliardów dolarów w skali roku.

Jednym ze sposobów zapobiegania temu niekorzystnemu zjawisku jest instalowanie wgłębnych filtrów przeciwpiaaskowych. Zgodnie z powszechną opinią [7], w większości przypadków najlepszą kontrolę piaszczenia zapewniają filtry szczelinowe, z uwagi na:

- długą żywotność (trwałość i odporność na uszkodzenia mechaniczne),
- bezpieczne udostępnienie horyzontu produktywnego (zatrzymywanie cząsteczek piasku i umożliwienie przemieszczania się bardzo drobnych cząsteczek oraz ilów),
- ograniczenie do minimum niebezpieczeństwa podciągania wody (niewielkie straty ciśnienia na filtrze),
- wyeliminowanie przepływu płynu złożowego wzdłuż osi filtra (kierunek przepływu jest prostopadły do osi odwiertu),
- zapewnienie długotrwałej eksploatacji odwiertu bez potrzeby konserwacji filtra oraz innych prac w odwiercie,
- ograniczenie do minimum wielkości skin efektu (brak mechanicznych przeszkód dopływu płynu złożowego, zapewnienie dużej powierzchni, przez którą płyn może dopływać do rur oraz możliwość użycia rur wydobywczych o dużej średnicy).

Do zalet filtrów szczelinowych należy zaliczyć również łatwość pomiaru szerokości szczeliny filtra, a także mniejszą skłonność do zatykania filtra przez cząsteczki fazy stałej niż w przypadku innych rodzajów filtrów.

Należy nadmienić, że filtry siatkowe w otworach nieoruroowanych należy stosować ostrożnie – z uwagi na ich tendencje do zatykania oraz to, że w przypadku filtrów wielosiatkowych, w których wykorzystywane są powłoki siatek o rozmaitej wielkości oczek, mogą występować trudności z ustaleniem wymiaru cząsteczek piasku zatrzymywanych na danym filtrze (w razie przesunięcia się siatek filtra względem siebie). W przypadku uszkodzenia takiego filtra następuje zmiana jego parametrów fabrycznych, co nie ma miejsca w przypadku filtrów szczelinowych.

Najczęściej przy doborze wielkości oczek filtra siatkowego przyjmuje się, że filtr ten zatrzymywać będzie cząsteczki piasku horyzontu produktywnego o średnicy do 2,5-krotnie mniejszej od długości boku oczka siatki. W przypadku filtrów z siatką podwójną, potrójną itp. stosuje się odpowiednio inne współczynniki obrazujące wielkość zatrzymywanych cząsteczek piasku. W przypadku filtrów szczelinowych szerokość szczeliny przyjmuje się doświadczalnie [2]; w zakresie od średnicy cząsteczek piasku formacji złożowej odpowiadającej d_{10} (rejon Zatoki Meksykańskiej) do $2d_{10}$, gdzie d_{10} jest wymiarem oczek sita zatrzymującego 10%, a przepuszczającego 90% piasku złoża, odczytywanym z krzywej granulometrycznej.

Jak widać, wszystkie zasady doboru wielkości – zarówno oczek filtrów siatkowych jak i szczelinowych, podobnie jak średnicy żwiru obsypki do granulacji piasku horyzontu złożowego – mają charakter prostych zależności empirycznych, a jedynym modelem doboru szerokości szczeliny filtra do granulacji piasku wykorzystującym wymiary fraktalne rozkładu wielkości cząsteczek piasku oraz elementy statystyki matematycznej jest model opisany w [2], którego główne założenia podano w dalszej części artykułu.

Model doboru szerokości szczeliny filtra, zapewniającej eliminację piaszczenia i zatykania szczelin

W przypadku konwencjonalnych metod doboru filtra do granulacji piasku horyzontu złożowego, punktem wyjścia jest wykonanie analizy granulometrycznej oraz prezentacja wyników w postaci wykresu (takiego, jak pokazany na rysunku 1), a także skorzystanie z tradycyjnych zasad doboru szerokości szczeliny (na przykład równa d_{10}). Ponieważ rozkład uziarnienia wykreślany jest w funkcji masy cząsteczek, zatrzymanej na sitach o rozmaitej wielkości oczek, zatem dominujący wpływ na kształt wykresu mają cząsteczki o największych wymiarach. Jednak w przypadku rozpatrywania zagrożeń związanych z zatkanie szczelin filtra należy rozpatrywać przede wszystkim cząsteczki o małych wymiarach, które mogą powodować powstanie wokół szczelin warstwy o zerowej porowatości (gdy w składzie piasku znajdują się również cząsteczki odpowiednio duże, aby zostały zatrzymane w szczelinie filtra). Taka mieszanina piasku musi zatem zawierać cząsteczki duże i mniejsze – mogące wypełniać przestrzeń porową pomiędzy tymi większymi – oraz jeszcze mniejsze, które z kolei zdolne są do wypełnienia przestrzeni porowej pomiędzy cząsteczkami o wymiarach pośrednich itd.; aż do poziomu cząsteczek o wymiarach molekuł.

Z powyższego rozumowania wynika, że w próbce takiego piaskowca występować musi nieskończenie duża liczba nieskończenie małych cząsteczek w nieskończenie małej przestrzeni porowej. W przedstawionym modelu oparto się na wykresie rozkładu ilości cząsteczek o określonych wymiarach – zamiast na konwencjonalnej krzywej granulometrycznej. Jeżeli chodzi o ilość N cząsteczek o wymiarach większych od pewnej określonej średnicy d_i w danej próbce, to obowiązuje zależność [2]:

$$N(d \geq d_i) = K \left(\frac{1}{d_i} \right)^f \quad (1)$$

Równanie (1) można także przedstawić w postaci:

$$\lg N(d \geq d_i) = \lg K - f \lg d_i \quad (2)$$

z której wynika, że wykreślając wartość N w zależności od d_i w układzie podwójnie logarytmicznym otrzymamy linię prostą o nachyleniu f – nazywanym wymiarem fraktalnym uziarnienia próbki. We wzorach (1) i (2) znaczenie poszczególnych symboli jest następujące:

$N(d \geq d_i)$ – ilość cząsteczek próbki o średnicy większej od d_i ,
 d_i – średnica cząsteczki,

K – stała proporcjonalności (zależna od wielkości próbki; nie jest ona istotna dla charakterystyki uziarnienia).

Rozważania teoretyczne wykazały, że część materiału próbki, dla której $2 < f < 3$ ma porowatość i przepuszczalność bliską zeru, a zatem piasek taki może zatykać szczeliny filtra. Badania doświadczalne wykazały, że na wykresie $\lg N(d \geq d_i)$ vs. $\lg d_i$, dla pewnej średnicy cząsteczek d_K obserwuje się zmianę nachylenia prostej z f_1 na f_2 . Dla średnic $d > d_K$ nachylenie f jest na ogół większe od wartości 2, a dla $d < d_K$ – na ogół mniejsze od 2. W piaskach, gdzie $f > 2$ i $d > d_K$, mniejsze ziarna wypełniają przestrzeń porową pomiędzy większymi i piasek jest stabilny. Mniejsze ziarna nie mogą się przemieszczać w przestrzeni porowej utworzonej przez ziarna większe, a jeżeli d_K nie jest zbyt małe to wówczas warstwa takiego piasku ma określoną porowatość i przepuszczalność, ponieważ istnieje w nim system porów o wymiarach $\approx d_K$. Natomiast w przypadku piaskowca, którego cząsteczki mają wielkość $d < d_K$ i $f < 2$ należy się spodziewać, że cząsteczki mniejsze nie wypełniają całkowicie przestrzeni pomiędzy cząsteczkami większymi i w pewnych warunkach mogą migrować przez przestrzeń porową utworzoną przez cząsteczki większe.

Jeżeli ziarna o największych rozmiarach w pierwszej partii piasku ($d > d_K$ i $f > 2$) są dostatecznie duże, aby mogły zostać zatrzymane w szczelinach filtra, to z punktu widzenia kontroli piaszczenia piasek taki ma charakterystykę optymalną, gdyż stworzy wokół filtra stabilną, przepuszczalną warstwę. Piasek próbki, dla którego $f < 2$ będzie mógł się przemieszczać w przestrzeni porowej piasku dla którego $f > 2$ i nie będzie zatykał tej przestrzeni oraz szczelin filtra. Wnioski te znajdują potwierdzenie w badaniach laboratoryjnych. Stwierdzono [2], że piaski o niekorzystnej wartości f (dla małych cząsteczek) mają tendencję do zatykania szczelin filtra o większej szerokości niż piaski, dla których f jest bliskie 1. Przy określaniu ilości ziarenek piasku, w celu konstrukcji wykresu $\lg N(d > d_i)$ vs. $\lg d_i$ zakładamy, że cząsteczki mają kształt zbliżony do kuli.

Ponieważ cząsteczki mniejsze ($d < d_K$ i $f < 2$) będą migrować w przestrzeni porowej utworzonej przez cząsteczki większe ($d > d_K$ i $f > 2$) – co umożliwi usunięcie z tej przestrzeni bardzo drobnych cząsteczek ilów i łupków; zatem doboru szerokości szczeliny filtra należy dokonać dla partii materiału o średnicy cząsteczek $d > d_K$. Konieczne jest w tym celu wykreślenie konwencjonalnej krzywej granulometrycznej dla danej partii próbek i ustalenie szerokości szczeliny dla d_{90} , d_{50} , d_{40} i d_{10} z uwzględnieniem f_1 i f_2 , przy czym wielkości d_- i d_+ (szerokości szczeliny) należy traktować jako dolną i górną wartość graniczną, natomiast d_i i d_+ – jako szerokości szczeliny ograniczające wielkość optymalną.

Algorytm doboru optymalnej szerokości szczeliny filtra

W celu obliczenia szerokości szczeliny konieczne są następujące dane wejściowe uzyskane z analizy granulometrycznej:

W_i – masa próbki [g],
 ρ – gęstość próbki [g/cm³],

N – ilość sit w zestawie do analizy granulometrycznej,
 K – ilość próbek,
 H_i – głębokość pobrania próbki [m],
 d_0 – wymiar oczek pierwszego sita, przez które przechodzi cały materiał próbki [mm].

Tablica 1. Wyniki analizy granulometrycznej dla każdej głębokości H_i pobrania próbki

H_1 [m]	Wielkość oczek sita – d_i [mm]	d_1	d_2	...	d_i	...	d_N
	Masa zatrzymana na sicie – w_i [g]	w_1	w_2	...	w_i	...	$w_{N/1}$
H_2 [m]	Wielkość oczek sita – d_i [mm]	d_1	d_2	...	d_i	...	d_N
	Masa zatrzymana na sicie – w_i [g]	$w_{1/2}$	$w_{2/2}$	...	$w_{i/2}$	...	$w_{N/2}$
...							
H_j [m]	Wielkość oczek sita – d_i [mm]	d_1	d_2	...	d_i	...	d_N
	Masa zatrzymana na sicie – w_i [g]	$w_{1/j}$	$w_{2/j}$	...	$w_{i/j}$	...	$w_{N/j}$
...							
H_K [m]	Wielkość oczek sita – d_i [mm]	d_1	d_2	...	d_i	...	d_N
	Masa zatrzymana na sicie – w_i [g]	$w_{1/K}$	$w_{2/K}$	...	$w_{i/K}$	...	$w_{N/K}$

Algorytm obliczeń

⇒ Dla każdej głębokości konstruowana jest tablica dla H_j , gdzie $j \in (1, K)$.
 Średnią wielkość średnicy ziaren obliczamy jako średnią arytmetyczną:

$$d_{sr_i} = \frac{1}{2}(d_{sr_{i-1}} + d_{sr_i})$$

a ilość cząsteczek zatrzymywanych przez i -te sito obliczamy wzorem:

$$n_i = (2,3885)(10^2) \frac{w_i [\text{g}]}{\rho \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) d_i^3 [\text{mm}^3]}$$

⇒ Na podstawie danych tablicy 2 (wiersze 2 i 5) konstruujemy rysunek 1, w skali półlogarytmicznej.
 Ponieważ sumaryczną ilość cząsteczek próbki większych od d_i określa wzór:

$$N(d \geq d_i) = K \left(\frac{1}{d_i} \right)^f \quad (3)$$

gdzie:

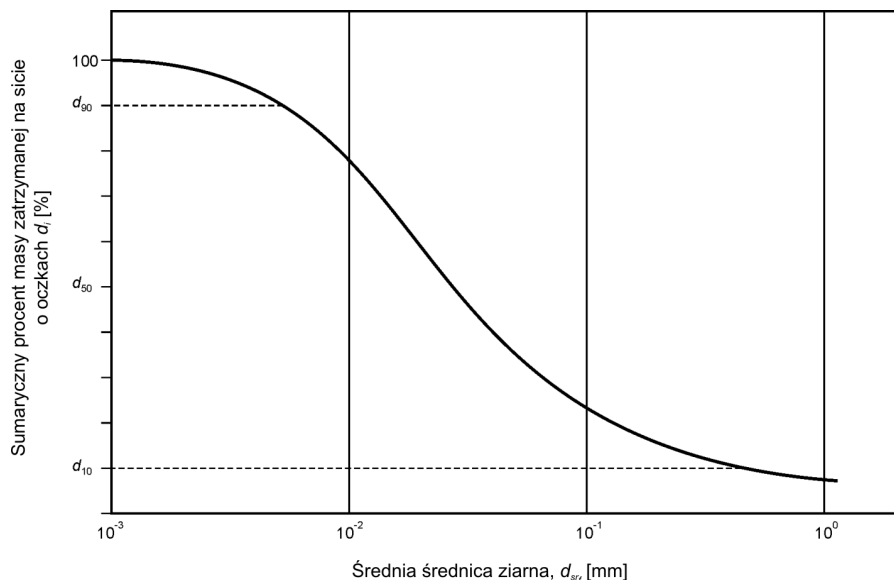
d_i – średnica cząsteczki,

K – stała,

f – tzw. „wymiar fraktalny” próbki; wielkość charakterystyczna dla próbki o danej granulacji.

Tablica 2.

1.	Wielkość oczek sita – d_i [mm]	d_1	d_2	...	...	d_i	...	d_N
2.	Średnia średnica ziaren – d_{sr} [mm]	d_{sr1}	d_{sr2}	...	...	d_{sr_i}	...	d_{sr_N}
3.	Masa zatrzymana na sicie – w_i [g]	w_1	w_2	...	...	w_i	...	w_N
4.	Procent masy zatrzymanej na sicie – d_i	(%) ₁	(%) ₂	...	...	(%)_i	...	(%) _{d_N}
5.	Sumaryczny procent masy zatrzymanej przez sito o oczkach d_i	(%) ₁	\sum_1^2 (%)	...	...	\sum_1^i (%)	...	\sum_1^N (%) = 100%
6.	Ilość cząsteczek zatrzymywanych na sicie o oczkach d_i	n_1	n_2	...	...	n_i	...	n_N
7.	Ilość cząsteczek próbki większych od d_i	0	n_1	\sum_1^2 n	...	\sum_1^{i-1} n	...	\sum_1^{N-1} n_N



Rys. 1.

d_{10} – wymiar ziarna próbki, od którego 10% ziaren ma średnicę większą, a 90% mniejszą; bądź wymiar oczka sita, które zatrzymuje 10% i przepuszcza 90% materiału próbki,

d_{50} – wymiar ziarna próbki, od którego 50% ziaren ma średnicę większą, a 50% mniejszą (tzw. mediana); bądź wymiar oczka sita, które zatrzymuje 50% i przepuszcza 50% materiału próbki.

Analogicznie należy interpretować d_{40} i d_{90} .

Mamy zatem z (3):

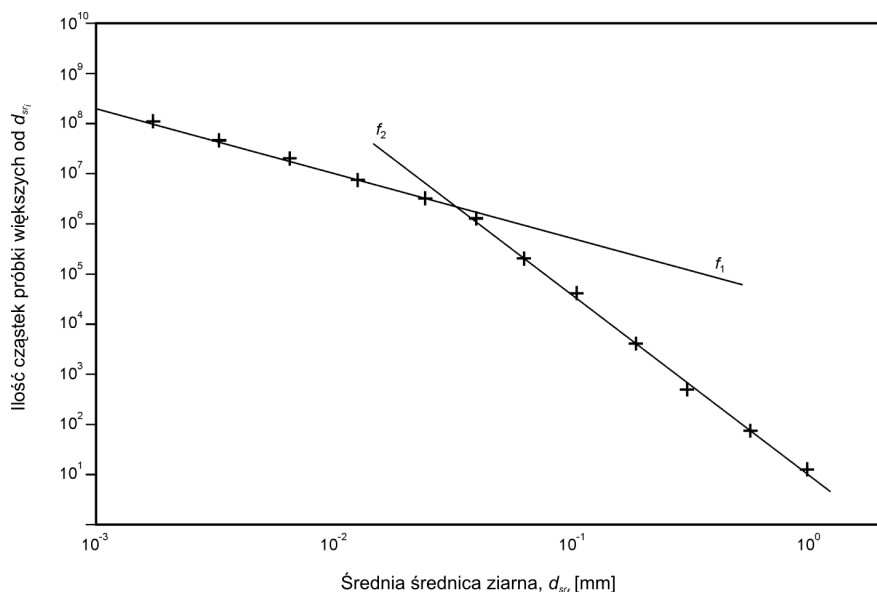
$$\lg N = \lg K - f \lg d_i \quad (4)$$

⇒ Na podstawie danych z tablicy 2 (wiersz 7 i 2) sporządzamy rysunek 2 (w skali podwójnie logarytmicznej); zależności ilości cząsteczek większych od d_{sr_i} od średnicy ziaren d_{sr_i} .

Metodą najmniejszych kwadratów, przez punkty pomiarowe początkowe i końcowe prowadzimy linie proste, których nachylenie – zgodnie z (4) – równe będzie f_1 i f_2 (wymiary fraktalne, cząstkowe materiału próbki). Odczytujemy wymiar ziarna d_c – odpowiadający punktowi przecięcia prostych o nachyleniach f_1 i f_2 .

Z rozważań teoretycznych [7] wynika, że:

- cząsteczki, dla których $d > d_c$ a $f > 2$ będą wypełniać przestrzeń porową pomiędzy większymi cząsteczkami i piasek będzie stabilny. Mniejsze cząsteczki nie będą mogły przemieszczać się przez matrycę utworzoną przez cząsteczki większe. Piaskowiec taki będzie miał określoną przepuszczalność i porowatość oraz będzie stabilny,
- cząsteczki, dla których $d < d_c$ a $f < 2$ tworzą luźną, nieskonsolidowaną warstwę. Mniejsze ziarna nie wypełniają całkowicie przestrzeni porowej pomiędzy ziarnami większymi i w pewnych warunkach mogą migrować w matrycy skalnej. Ich wynoszenie na powierzchnię w początkowej fazie eksploatacji jest pożądane, a konstrukcję filtra należy dobierać do partii piasku, dla której $d > d_c$.



Rys. 2.

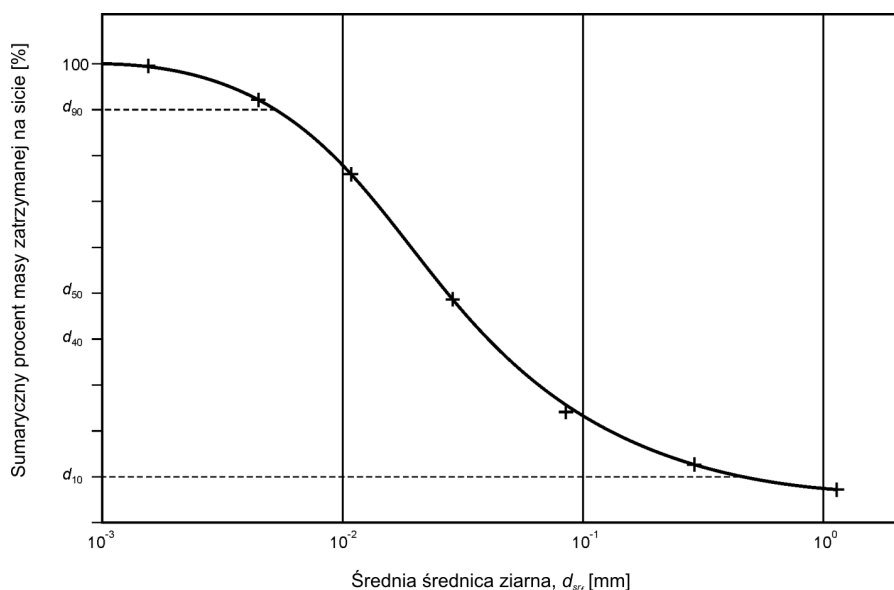
⇒ W tablicy 2 znajdujemy d_{sr_i} – odpowiadające d_c ; $d_c = d_{sr_i} \pm \Delta d_{sr}$.

⇒ Korygujemy masę próbki: $W = W - \Sigma W_i$, gdzie ΣW_i – suma mas dla $d_{sr} < d_c$.

⇒ Przeliczamy w tablicy 2 wiersze 4 i 5, tj.: „Sumaryczny procent masy zatrzymanej przez sito o oczkach d_i ” oraz „Ilość cząsteczek zatrzymywanych na sicie o oczkach d_i ”.

⇒ Konstruujemy rysunek 3 – identyczny jak rysunek 1, z tym że brana jest pod uwagę tylko część materiału próbki dla $d_{sr_i} > d_c$.

⇒ Z rysunku 3 odczytujemy średnice ziaren d_{sr_i} – odpowiadające d_{10} , d_{40} i d_{90} .



Rys. 3.

⇒ Dla materiału danej próbki, dla każdej wielkości d_{sr_i} odpowiadającej d_{10} , d_{40} , d_5 i d_{90} określamy optymalną szerokość szczeliny filtra (S):

$$S_1 = Ld_{10},$$

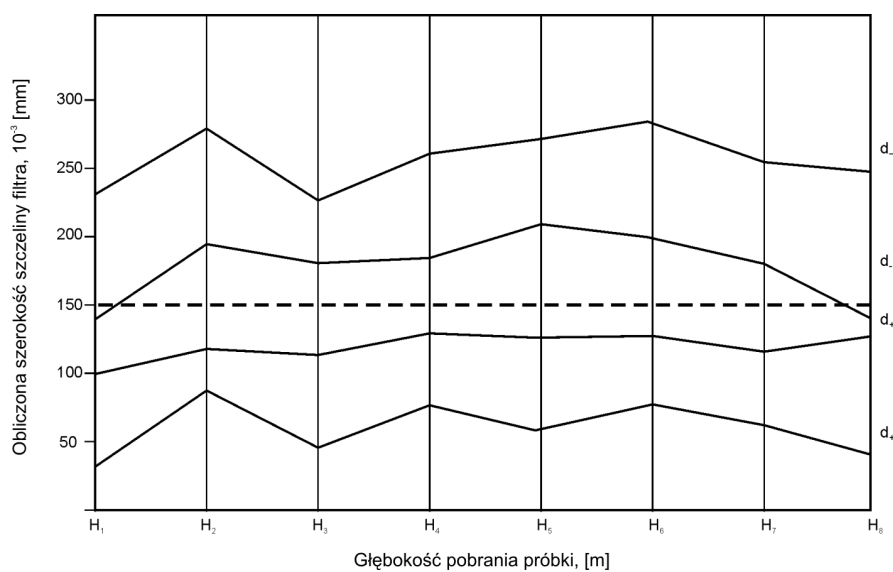
$$S_2 = Ld_{40},$$

$$S_3 = Ld_{50},$$

$$S_4 = Ld_{90},$$

gdzie L – współczynnik zależny od danych analizy sitowej, obliczany metodami statystycznymi.

⇒ Przedstawiony cykl obliczeń wykonujemy dla materiału wszystkich próbek, pobranych ze wszystkich głębokości H_j interwału produkcyjnego.



Rys. 4.

⇒ Na podstawie obliczonych (dla wszystkich próbek) szerokości szczeliny filtra (cztery wielkości S dla każdej próbki) konstruujemy rysunek 4.

⇒ Pomiedzy środkowymi liniami wykresów prowadzimy linię poziomą w taki sposób, aby w jak najmniejszej ilości punktów przecinała ona wykresy d_+ i d_- . Linia ta wyznacza optymalną szerokość szczeliny filtra, którą odczytujemy na osi pionowej. Oznaczenia d_{++} , d_+ , d_- , d_- należy traktować jako:

d_- – szczelina największa jaką można przyjąć w przypadku częstego zatykania się filtra,

d_- – szczelina najmniejsza przyjmowana w sytuacji, gdy nie obserwuje się zatykania filtra,

d_+ – szczelina największa przyjmowana w przypadku, gdy wynoszenie piasku nie jest spodziewane,

d_{++} – szczelina najmniejsza przyjmowana w przypadku, gdy spodziewane jest ciągłe wynoszenie piasku.

Położenie tej linii określamy w sposób następujący:

Oznaczmy szerokości szczelin filtra, wyznaczone dla poszczególnych głębokości pobrania próbek H_i – określone dla d_- i d_+ jako d_i , gdzie $i = 1, 2 \dots 2K$, a K jest to ilość pobranych próbek. W celu określenia optymalnej szerokości szczeliny należy znaleźć współczynniki a i d_{opt} , minimalizujące sumę:

$$S = \sum_{i=1}^{2K} (d_i - aH_i - d_{opt})^2$$

Ponieważ jej nachylenie (a) ma być równe zero, otrzymamy:

$$\frac{\partial S}{\partial d_{opt}} = -2 \sum_{i=1}^{2K} (d_i - d_{opt})$$

skąd:

$$\sum_{i=1}^{2K} d_i - 2Kd_{opt} = 0$$

$$d_{opt} = \frac{1}{2K} \sum_{i=1}^{2K} d_i$$

gdzie d_{opt} jest optymalną szerokością szczeliny filtra.

Podsumowanie

Jednym ze sposobów zapobiegania wynoszeniu piasku z odwiertu wraz z eksploatowaną ropą i gazem, a także związanych z tym szkód (wymagających m.in. wykonywania rekonstrukcji oraz napraw uszkodzonego uzbrojenia wglębnego i powierzchniowego odwiertów) jest instalowanie wglębnych filtrów przeciwpiaaskowych. Najbardziej popularne z nich są filtry siatkowe i szczelinowe. W większości przypadków zapewniają one najlepszą kontrolę piaszczenia, m.in. z uwagi na ich trwałość i odporność na uszkodzenia mechaniczne oraz zatrzymywanie cząsteczek piasku – a równocześnie umożliwienie przemieszczania się bardzo drobnych cząsteczek i ilów, niewielkie straty ciśnienia na filtrze oraz mniejszą skłonność do zatykania przez cząsteczki fazy stałej. Przedstawiona w artykule

metodyka doboru szerokości szczeliny filtra do granulacji piasku – wykorzystująca wyniki analiz granulometrycznych (wymiary fraktalne rozkładu wielkości cząsteczek piasku) oraz elementy statystyki matematycznej – pozwala na określenie optymalnej szerokości szczeliny filtra, ustalonej na podstawie obliczonych wielkości szczeliny:

- największej jaką można przyjąć w przypadku częstego zatykania filtra,
- najmniejszej, przyjmowanej gdy nie obserwuje się zatykania filtra,
- największej, przyjmowanej gdy wynoszenie piasku nie jest spodziewane,
- najmniejszej, przyjmowanej gdy spodziewane jest ciągłe wynoszenie piasku.

Artykuł nadesłano do Redakcji 23.11.2010 r. Przyjęto do druku 13.01.2011 r.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Józef Raczkowski

Literatura

- [1] Bennett C., Gilchrist J.M., Pitoni E., Burton R.C., Hodge R.M., Troncoso J., Ali S.A., Dickerson R., Parlar M., Smith C.P.: *Design Methodology for Selection of Horizontal Open-Hole Sand Control Completions Supported By Field Case Histories*. SPE 65140, 2000.
- [2] Markestad P., Christie R.F., Espedal A., Rarrvik O.: *Selection of Screen Slot Width to Prevent Plugging and Sand Production*. SPE 31087, 1996.
- [3] Moen T., Terje Gunnerød T., Kvernstuen O.S.: *A New Sand Screen Concept. No Longer the Weakest Link of the Completion String*. SPE 68937, 2001.
- [4] Pearson R.M.: *Sand Control*. IHRDC, 1988.
- [5] Saucier R.J.: *Gravel pack design considerations*. SPE 4030 BSC, Shell Oil Co., 1972.
- [6] Schwartz D.H.: *Successful sand control design for high rate signal oil and water wells*. SPE 2330 RMP, Signal Oil and Gas Co., 1968.
- [7] *Screen Design Methodology*. Materiały firmy Reslink.
- [8] Szpunar T., Budak P.: *Problem stateczności ścian otworów wiertniczych w warstwach ilastych w warunkach dynamicznych, w ujęciu ilościowym*. Dok. INiG, Kraków, listopad 2005.



Dr inż. Tadeusz SZPUNAR – adiunkt w Zakładzie Inżynierii Naftowej Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie. Autor szeregu opracowań z zakresu inżynierii złożowej, eksploatacji, wiertnictwa, magazynowania gazu w kawernach solnych, zagadnień związanych z mechaniką górotworu oraz innych. Autor i współautor kilkudziesięciu publikacji naukowych oraz patentów.



Mgr inż. Paweł BUDAK – starszy specjalista naukowo-badawczy w Zakładzie Inżynierii Naftowej INiG w Krakowie. Zajmuje się realizacją prac naukowych i naukowo-badawczych; głównie z zakresu inżynierii złożowej, wiertnictwa i eksploatacji podziemnych magazynów gazu w kawernach solnych oraz tworzeniem oprogramowania na potrzeby przemysłu naftowego i gazowniczego.