

Vplyv poškodenia ložiska pri vystrojovaní horizontálnych vrtov

Marina Sidorová¹

Formation damage effects in a horizontal wells completion

Horizontal well completions are considered to reduce concerns about formation damage because the extra completion interval length in the pay zone offset production lost from reduced permeability around the wellbore.

The control of sand flow from unconsolidated formations can be one of the most critical problems in well completion, because holes in weakly consolidated sandstone tend to collapse. Wellbore collapse problems can result in a vertical wellbore completion that performs better than a horizontal completion. It must also be recognized that a workover to remove sand from a horizontal hole may be extremely difficult to perform and very expensive. Remedial efforts will also be endangered by fluids loss to the formation over the long productive interval.

Formation damage in most horizontal wells may not reduce performance to that of a vertical well in the same reservoir, but if the reservoir is a weakly consolidated sandstone the hole will tend to collapse and cause untenable problem.

A sufficient number of horizontal wells have now been drilled and completed in practically as many different reservoir as countries, to make it possible to use them as a guide on how and where horizontal well technology offers the best return on investment. If horizontal holes in weak formation sands can be successfully gravel packed, the result could be significantly higher well productivity than with a liner, screen or pre-packed screen alone

Key words: formation damage, weak formations, slotted liner, screen, gravel packing.

Úvod

V poslednej dobe sa v diskusiách o nových technológiách v ropnom priemysle čoraz viac hovorí o horizontálnom vŕtaní a ťažbe, o zvýšení produkcie, zlepšení vyťažiteľnosti heterogénnych ložísk a zmenšení rýchlosti vytvárania kužeľov vody a plynu pri ťažbe. Horizontálne vrty sa stávajú ešte atraktívnejšími, pretože sa zmenšujú náklady na vŕtanie na mori a v ťažko dosiahnuteľných ložiskách. Ukončenie vrtov horizontálnym spôsobom je predurčené na riešenie problémov súvisiacich s poškodením ložiska, pretože vystrojovanie extra dlhých intervalov vrtu v produktívnej zóne znižujú straty produkcie z obzorov zníženej priepustnosti. Táto technika ukončenia vrtu je najvhodnejšia len v pevných horninách ložiska, pretože otvory vŕtané v málo spevnených horninách majú tendenciu k zavaleniu.

Problémy zavalenia stien vrtu vo vertikálnom vrte sa riešia ľahšie ako vo vrte ukončenom horizontálnym spôsobom. Treba brať do úvahy, že podzemné opravy sond na zabránenie pieskovania v horizontálnych vrtoch môžu byť obťažne vykonané a veľmi drahé. Prekážkou môže byť aj únik produktívnej kvapaliny v dlhom intervale ložiska.

Vplyv poškodenia ložiska

Poškodenie ložiska v okolí horizontálneho vrtu sa vyskytuje v radiálnom smere rovnako ako pri vertikálnom vrte. Výsledkom v oboch geometriách bude valcovitá plocha o zmenšenej priepustnosti v okolí vrtu, avšak poškodená zóna v horizontálnom vrte môže ovplyvňovať produktivitu viac ako vo vertikálnom vrte. Tabuľka 1. porovnáva vplyv poškodenej zóny na produktivitu v horizontálnom a vertikálnom vrte a ukazuje, že rozdiely medzi vypočítanými hodnotami nie sú výrazné. Iba ak rozsah poškodenia je veľmi vážny (zmenšenie priepustnosti do 90%), tak tento vplyv je podstatnejší. V tejto a v nasledujúcich tabuľkách uvedené údaje platia pre rovnaké homogénne a jednofázové ložisko s charakteristikami:

- mocnosť ložiska – 15,24 m,
- polomer vrtu – 0,1 m,
- priepustnosť ložiska – 100 mD,
- polomer ložiska – 284,4 m,
- dĺžka vystrojovacej zóny – 152,4 m.

Tab.1. Vplyv poškodenia ložiska na produktivitu horizontálneho vrtu.

Tab.1. Effect of formation damage an horizontal well productivity.

Dosah poškodenia v okolí vrtu [m]	0,15	0,31	0,61	0,91	0,15	0,31	0,61	0,91	0,15	0,31	0,61	0,91
Priepustnosť zóny poškodenia [mD]	50	50	50	50	25	25	25	25	10	10	10	10
Pomer produkcie poškodenej a nepoškodenej zóny HV*	0,82	0,76	0,69	0,65	0,61	0,51	0,43	0,38	0,34	0,26	0,20	0,17
Pomer produkcie poškodenej a nepoškodenej zóny VV*	0,90	0,85	0,80	0,78	0,74	0,66	0,58	0,53	0,49	0,39	0,33	0,28

*HV- horizontálny vrt, VV- vertikálny vrt.

¹ Ing. Marina Sidorová, Katedra ropného inžinierstva a využitia zemských zdrojov FBERG TU, Park Komenského 19, 04384 Košice (Recenzované a revidovaná verzia dodaná 28.5.2001)

Ak berieme do úvahy, že intenzita ťažby v horizontálnom vrte je väčšia a s dĺžkou vystrojovacieho úseku rastie v porovnaní s vertikálnym vrtom, ako to vidíme v tabuľke 2, vtedy jediné vážnejšie poškodenie ložiska môže spôsobiť výrazné zmenšenie produktivity vrtu.

Tab.2. Pomer produktivity horizontálneho a vertikálneho vrtu.
Tab.2. Productivity indices ratios of horizontal and vertical wellbores.

Dĺžka vystrojovacieho intervalu [m]	30,48	60,96	121,92	243,84	304,80
Pomer produktivity HV a VV	1,5	2,1	3,4	4,7	5,7

Málo spevnené ložiská

Oveľa vážnejší problém sa vyskytne, ak dôjde k zavaleniu a vyplneniu horizontálneho vrtu v nespevnených alebo málo spevnených pieskovcoch ložiska. V takomto prípade môže dochádzať k úplnému zastaveniu produkcie. Ak je vrt len čiastočne vyplnený, produkcia kvapaliny môže byť obmedzená natoľko, že bude otázná prospešnosť horizontálneho ukončenia. Obvyklým spôsobom riešenia tohto problému je použitie buď perforovaného lineru, filtra ovinutého drôtom, predupchatého (tzv. prepack) filtra alebo filtra naplavovaného hrubým pieskom na stabilizáciu vrtu. Všetky tieto spôsoby môžu nepriaznivo ovplyvniť produktivitu vrtu, čo nie je ekonomicky prijateľné pre vrtanie horizontálnych úsekov.

Perforovaný liner alebo filter môžu zabrániť zavaleniu pieskom málo spevneného vrtu, ale to predovšetkým závisí od konštrukcie a efektívnosti filtra. Dokonca najlepšia konštrukcia filtra nezabráni niektorým čiastočným prúdiť vo vrte, ktoré po dopade na spodnú časť horizontálneho vrtu na nej zostanú až dovtedy kým začne produkovať kvapaliny. Vplyv zaplnenia vrtu pieskom na prúdenie kvapaliny nemusí byť správne predpokladané, pretože množstvo a umiestnenie náplvy nemôže byť presne určené. Skôr, ako podstatná dávka piesku prenikne do filtra, málo spevnené ložisko sa môže zboriť a následovne zaplniť medzikružie filter/vrt. Môže dôjsť k upchatiu otvorov filtra pieskom a výplachovou kôrkou, pretože medzikružie sa zaplní materiálom s nižšou priepustnosťou. Tabuľka 3 udáva možný vplyv zavalenia medzikružia pieskom na produktivitu v porovnaní s produktivitou nepoškodeného otvoreného vrtu.

Tab.3. Vplyv poškodenia ložiska spôsobeného zavalením ložiska okolo filtra alebo perforovaného lineru v horizontálnom vrte (pre priemer filtra 0,063 m).
Tab.3. Effect of formation damage caused by formation collapse around a screen or slotted liner in a horizontal completion (for screen radius 0,208 ft).

Efektívna priepustnosť piekovo-výplachovej výplne vo filter/vrt medzikruží [mD]	100	75	50	25	10
Pomer produktivity poškodeného vrtu a nepoškodeného nezapaženého vrtu	0,98	0,95	0,90	0,76	0,53

Z tabuľky vidieť, že ak priepustnosť piesku, ktorým sa zaplavuje medzikružie je najmenej 50% pôvodnej priepustnosti ložiska, obmedzenie prúdenia nie je podstatné. Ak sú jednotlivé otvory filtra zanesené pieskom a výplachom, kombinácia upchatého filtra a materiálu s nízkou priepustnosťou v medzikruží je neprijateľná. Keď efektívna priepustnosť tejto kombinácie má len 10% pôvodnej priepustnosti ložiska, môže dôjsť k zníženiu veľkosti produktivity vrtu o polovicu v porovnaní s produktivitou nepoškodeného ložiska.

Z tabuľky 4 vidieť, že aj pri malom rozsahu poškodenia ložiska dochádza k podstatnému zníženiu produktivity.

Tab.4. Vplyv poškodenej zóny a zavalenia okolo filtra na produktivitu horizontálneho vrtu s priemerom filtra 0,063 m.
Tab.4. Effect of damage zone and collapse around a screen on horizontal well productivity with screen radius 0,208 ft.

Dosah poškodenia v okolí vrtu [m]	0,15	0,31	0,61	0,91	0,15	0,31	0,61	0,91	0,15	0,31	0,61	0,91
Priepustnosť zóny poškodenia [mD]	50	50	50	50	25	25	25	25	10	10	10	10
Pomer produkcie poškodenej a nepoškodenej zóny HV	0,48	0,46	0,43	0,42	0,40	0,36	0,32	0,30	0,27	0,22	0,18	0,16

Kritickými faktormi na dosiahnutie požadovanej veľkosti produktivity horizontálnych vrtov v poradí dôležitosti sú:

1. Zabránenie úplného zavalenia vrtu.
2. Udržiavanie vysokej priepustnosti v medzikruží.
3. Zabránenie upchatia filtra.
4. Minimalizácia hĺbky invázie ložiskového poškodenia.
5. Minimalizácia vplyvu ložiskového poškodenia na priepustnosť poškodenej zóny.

Zabránenie zavalenia stien vrtu

Ako už bolo vyššie spomenuté, na zabránenie úplného zavalenia vrtu sa môžu použiť perforovaný liner alebo filter, u ktorých je však tendencia k upchatiu. Dokonalejším riešením je použitie prepack filtra, vyrobeného z vysoko priepustného materiálu, zvyčajne z hrubého piesku zlúčeného s plastom. Ale aj v tomto prípade môže dôjsť k zaneseniu filtra drobným materiálom, nečistotami, atď., počas montáže filtra pred uvedením sondy do

ťažby. Prepack filter sa vyrába z hrubého piesku spojeného s plastom o okatosti 20/40 meshov a s priepustnosťou 50 D (darcy). (Číslo mesh je počet drôtikov alebo ôk na dĺžke jedného palca (25,4 mm)).

Invázia aj malého množstva výplachu a ložiskového drobného materiálu v póroch hrubého piesku môže takmer úplne upchať prepack filter. Je veľmi dôležité odstránenie všetkých výplachových kôrok a ložiskového materiálu z vrtu pred montážou prepack filtra a udržanie čistej kvapaliny vo vrte počas zapúšťania filtra. Po odstránení všetkých nečistôt a začatí cirkulácie čistej kvapaliny, majú málo spevnené horniny tendenciu k zavaleniu. V tomto prípade by bolo vhodné zapúšťať a montovať filter vo výplachu s použitím rozpustnej kyseliny, rozpustnej ropy a ochranného povrchu filtra na zabránenie zanesenia filtra. Pred uvedením sondy do ťažby, môže byť ochranný povrch filtra odstránený kyselinou, ropou alebo roztokom.

Úspešná montáž filtra a udržanie maximálnej priepustnosti pri ťažbe ešte neznamená, že okamžite bude zastavená invázia ložiskového piesku a drobného materiálu. Všetko závisí len od veľkosti úlomkov, pre ktoré bol filter konštruovaný. Veľkosť hrubého piesku používaného v prepack filtroch je zvyčajne skoro 6 krát väčšia ako veľkosť stredného zrna ložiskového piesku. Priemer úlomkov hrubého piesku filtra s okatnosťou 20/40 meshov musí byť väčší ako 600 mikrónov na zastavenie ložiskového piesku s veľkosťou stredného zrna väčšieho ako 100 mikrónov. Vzhľadom na to, že skoro polovička zrn piesku je menšia ako veľkosť stredných zrn piesku, póry hrubého piesku budú zanesené pred dosiahnutím stabilizácie vrtu.

Jedno riešenie na zabránenie pieskovej invázie je získavanie vzorky jadra z celého horizontálneho úseku a meranie rozdielov veľkosti častíc každej stopy (30,5 cm) jadra na určenie veľkosti hrubého piesku. Táto metóda nie je praktická. Druhá možnosť je použitie menšej veľkosti hrubého piesku s dostatočujúcou priepustnosťou na udržanie prijateľnej produkcie kvapaliny. Na dosiahnutie lepšieho výsledku s prepack filtrom sa používa hrubý piesok, priepustnosť ktorého je len 10 D. Konečná priepustnosť takého piesku počas ťažby bude vyššia v porovnaní s prípadným použitím hrubého piesku s 20/40 alebo 40/60 meshov.

Tabuľka 5 porovnáva účinok prepack filtrov rôznej priepustnosti za predpokladu, že ložiskový piesok vyplňuje medzikružie filter/vrt, invázia poškodenia ložiska dosahuje 0,15 m a priepustnosť porušenej zóny je 0,05 D. Tieto údaje ukazujú, že nie je podstatný rozdiel medzi produktivitou vrtov vystrojených prepack filtermi s efektívnou priepustnosťou v rozmedzí od 80 D až po 10 D. Výpočty sú urobené pre filter s vnútorným polomerom 0,043 m a vonkajším polomerom 0,076 m.

Tab.5. Účinok prepack filtra na produktivitu horizontálneho vrtu.

Tab.5. Effect of prepacked screen on horizontal well productivity.

EP* prepack filtra [D]	80	40	10	1	0,1	80	40	10	1	0,1	80	40	10	1	0,1
EP medzikružia filter/vrt [D]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Q_F / Q_N^*	0,91	0,91	0,91	0,90	0,82	0,86	0,86	0,86	0,85	0,58	0,62	0,62	0,62	0,62	0,58
Q_{FP} / Q_N^*	0,95	0,95	0,95	0,94	0,82	0,95	0,95	0,95	0,94	0,82	0,95	0,95	0,95	0,94	0,82

* EP- efektívna priepustnosť, Q_F/Q_N - pomer produkcie vrtu s prepack filtrom a nepoškodeného nezapaženého vrtu, Q_{FP}/Q_N - pomer produkcie vrtu s prepack filtrom naplaveným hrubým pieskom a nepoškodeného nezapaženého vrtu.

Zapaženie vrtu uľahčí bezproblémové zapúšťanie filtra, ale nie je zaručené, že cement bude správne umiestnený okolo horizontálnej pažnice v málo spevnenom ložisku, pretože vycentrovanie rúr v takom ložisku je obtiažne. Iný problém sa vyskytne počas vytlačania výplachu oddelovacou kvapalinou pri cementácii, pretože po odstránení výplachovej kôrky je vrt náchylný k zavaleniu. Ak nedôjde k dostatočnému odstráneniu výplachovej kôrky, tak sa nevytvorí dostatočná súdržnosť cementu so stenami ložiska. To dokazuje, že vo vrte ukončenom v jednej vrstve ložiska nie je potrebná zonálna izolácia cementom a prietok cez cementový kanál môže dokonca zvýšiť produkciu. To je jeden z dôvodov, prečo sú nezapažené vrty uprednostňované pri vystrojovaní horizontálnych vrtov.

Naplavovanie hrubého piesku

Horizontálne vrty v málo spevnenom ložisku môžu byť naplavené hrubým pieskom, čo podstatne zvýši produktivitu vrtu v porovnaní s vrtmi vystrojenými linerom, filtrom alebo prepack filtrom. V tabuľke 5 je porovnaná produktivita vrtu vystrojeného filtrom a vrtu navyše naplaveným hrubým pieskom s 20/40 meshov za predpokladu, že naplavený hrubý piesok je umiestnený v nezapaženom vrte pri ideálnych podmienkach bez možného poškodenia. V skutočnosti nie je možné úplne zabrániť porušeniu ložiska pri naplavení hrubého piesku. Úspešné naplavenie hrubého piesku v dlhom horizontálnom úseku bude obtiažne z týchto príčin:

- Vrt má tendenciu k zavaleniu počas naplavenia hrubého piesku.
- Môžu vzniknúť ťažkosti s vycentrovaním filtra v dlhom horizontálnom úseku nezapaženého vrtu, pretože pružné centrátoary budú osadené v málo spevnených horninách ložiska.
- Strata kvapaliny do ložiska cez dlhý interval bude dôvodom ložiskového poškodenia a zmenšenia rýchlosti kvapaliny potrebnej k transportu a naplaveniu hrubého piesku.

Pre naplavenie hrubého piesku sú vhodné ložiská, ktoré obsahujú „sytké“ pieskovce za predpokladu, že nedôjde k výnosu veľkého množstva piesku po krátkom produkovaní vrtu a „polovhodné“ piesky, ktoré

nezavalia vrt pred úplným zaplavením hrubého piesku. Také ložiská sú relatívne pevné, ale stále dochádza k výnosu piesku počas ťažby ropy a plynu. V dlhých horizontálnych úsekoch je menší predpoklad úspešného transportu a naplavenia hrubého piesku cez celú dĺžku.

Naplavovanie hrubého piesku môže byť použité so špeciálne konštruovaným filtrom ovitým drôtom alebo prepack filtrom, keď sú zaliate kyselinou alebo ropným roztokom a v medzikruží filter/vrt cirkuluje suspenzia hrubého piesku vysokej hustoty. Aby sa zmenšilo usadenie hrubého piesku, po jeho naplavení sa použije koncentrácia hrubého piesku najmenej 15ppg ($1,8 \text{ gcm}^{-3}$) pokiaľ je možné 20ppg ($2,4 \text{ gcm}^{-3}$).

Každý filter má obmedzený počet otvorov na stopu (30,5 cm) v základnej rúre filtra a vyhradené kanály laterálneho toku, aby nedošlo k nahradeniu kvapaliny počas pôsobenia kyseliny a preplachovania vrtu s rozpúšťadlom. To umožní odstránenie dočasného pokrytia filtra a pomôže pri budúcich opravných prácach. Taká konštrukcia musí byť špeciálne vyrobená pre vrtné podmienky.

Prepack filter sa používa ako podpora pre naplavenie hrubého piesku v málo spevnených ložiskách. To zaručí reguláciu pieskovania v zónach, v ktorých nedošlo k úplnému naplaveniu hrubého piesku, alebo kde je riziko naplavenia medzikružia pieskom.

Zhrnutie

Poškodenie ložiska vo väčšine horizontálnych úsekoch málo spevneného ložiska spôsobí značné problémy v dôsledku zavalenia vrtu a zmenšenia výkonnosti produktívnej zóny. Keď sa hodnotia potenciálne výhody vrtov ukončených horizontálne v špecifických ložiskách, treba pozorne prehodnotiť ekonomickú efektívnosť vrtania, vystrojovania a ťažby. Pri výbere vhodného vystrojovania horizontálnych úsekov treba počítať s možnými problémami, obtiažnymi a drahými prácami podzemnej opravy sond. Vystrojenie vrtu perforovaným linerom alebo filtrom v málo spevnenom ložisku bude možné do vyčerpania ložiskového tlaku, alebo ak vodná produkcia spôsobí zanesenie filtra a vyplnenie vrtu pieskom. Prepack filter s priepustnosťou 10 D je vhodný k zabezpečeniu a udržiavaniu vyššej produktivity vrtu v porovnaní s hrubým pieskom s 20/40 alebo 40/60 meshov. Naplavovanie hrubého piesku v medzikruží prepack filter/vrt dáva dokonca lepšie výsledky.

PodĎakovanie: Práca vznikla s podporou Slovenskej grantovej agentúry VEGA, v rámci riešenia projektu č. 1/6248/99.

Literatúra

- MILNE, A.: Horizontal well. Completion and stimulation technology, 1991.
SPARLIN, D.D., HAGEN, R.W.: Controlling sand in a horizontal completion. Texas, 1991.