Archive of SID

مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی
تهران، ۲۹ خرداد ماه ۱۳۹۳ مجری: هم اندیشان انرژی کیمیا
تلفن: ۸۸۶۷۱۶۷۶ - ۰۲۱ www.Reservoir.ir

جریان فوم در محیط متخلخل: بررسی تزریق هم‌زمان گاز و ماده فعال کننده سطحی و اثر آن بر بازیافت نفت

حامد نجاتیان دارایی[1*]، مرتضی انصاری[2]، علی رنجکش[3]

[1] دانشگاه صنعتی سهند تبریز

[2,3] شرکت بهره برداری نفت و گاز گچساران

چکیده

به علت نسبت تحرک بالای بین گاز و اکثر نفت‌های خام در شرایط مخزن، سیلابزنی با گاز دارای راندمان جاروبی پایینی می‌باشد. نیاز به کنترل تحرک گاز در طی سیلابزنی با گاز منجر به مطالعه تزریق فوم شد که شامل تزریق هم‌زمان گاز و ماده فعال کننده سطحی، تزریق متناوب گاز و ماده فعال کننده سطحی و یا تزریق فوم پیش آماده است. با توجه به شرایط مخزن نوع تزریق متفاوت خواهد بود. با این حال، تزریق هم‌زمان ماده فعال کننده سطحی و گاز به علت شرایط جاروبی مناسب نفت، بیشتر مورد علاقه محققین قرار گرفته است. در این مقاله به بررسی جریان هم‌زمان گاز و ماده فعال کننده سطحی در محیط متخلخل پرداخته شده است و نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده از سیلابزنی با فوم ذکر شده است. بررسی موجود منبع مفیدی برای مهندسان و محققان علاقه‌مند به جریان فوم در محیط متخلخل است و زمینه‌ای برای تحقیقات آزمایشگاهی و میدانی پروژه‌های سیلابزنی با فوم فرآهم می‌آورد.

واژه‌های کلیدی

ازدیاد برداشت نفت، سیلابزنی با فوم، گاز، ماده فعال کننده سطحی

Hamed.Nejatiyan@gmail.com

www.SID.ir

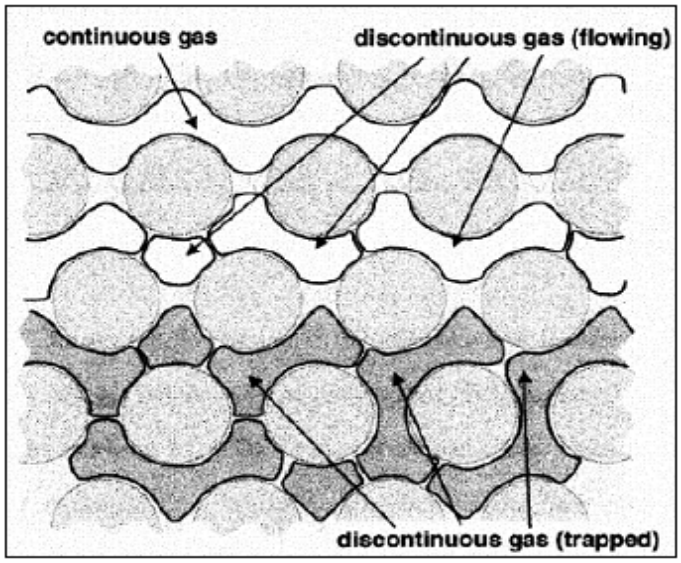
Archive of SID

۱- مقدمه

ایده‌ی استفاده از فوم برای کنترل تحرک گاز به وسیله‌ی باند و هالبروک در سال ۱۹۵۸ ارائه شد و توسط فرآید ادامه یافت [۲،۱]. فوم ترکیبی از گاز، آب و ماده‌ی فعال کننده‌ی سطحی است. ماده‌ی فعال کننده‌ی سطحی به عنوان کف کننده عمل می‌کند. فوم به صورت مجموعه‌ای از لایه‌های مایع و مرزهای مشخص است. این لایه‌ها به گونه‌ای قرار می‌گیرند که کمترین تنش بر آنها وارد شود. فوم نمونه خاصی از جریان دو فازی گاز- مایع است. با تزریق گاز و محلول فعال کننده سطحی در محیط متخلخل فوم تشکیل شده و فاز گاز در فوم توسط لایه‌های مایع به دام می‌افتد و اگر فوم پایداری به‌دست آید، فازهای گاز و مایع با هم با سرعت یکسانی حرکت خواهند کرد [۴،۳]. در این مقاله ضمن مطالعه و بررسی جریان فوم در محیط متخلخل، نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده از سیلابزنی با فوم در ازدیاد برداشت نفت ذکر شده است.

۲- تشکیل فوم در طی تزریق هم‌زمان گاز و ماده فعال کننده سطحی

فوم ایجاد شده توسط تزریق هم‌زمان گاز و ماده فعال کننده سطحی، به وسیله توزیع اندازه خلل و فرج و گلوگاه خلل و فرج مشخص می‌گردد. یک حباب مجزا یک یا چندین خلل و فرج محیط متخلخل را اشغال می‌کند، به این معنی که فوم به صورت یک فاز پیوسته همگن درون محیط متخلخل، عمل نمی‌کند. به عبارت دیگر، فوم در محیط متخلخل یک فاز ناپیوسته است که در آن حباب‌های گاز از هر حباب دیگر توسط فیلم‌های نازک مایع مجزا هستند [۵]. جریان فوم در محیط متخلخل باعث به‌دام افتادن گاز یا جریان گاز به صورت فازهای پیوسته یا ناپیوسته، می‌شود. به دام افتادن گاز هنگامی روی می‌دهد که فوم به‌طور کامل مسیرهای عبور جریان گاز را مسدود کند. جریان پیوسته گاز در نتیجه وجود کانال‌های جریانی است که به وسیله فیلم‌های مایع مسدود نشده‌اند. به عبارت دیگر، در جریان ناپیوسته‌ی گاز، تمام کانال ها توسط فیلم‌های مایع مسدود شده‌اند و فوم به صورت زنجیرهای به هم پیوسته‌ی حباب‌ها، جریان می‌یابد (شکل ۱).



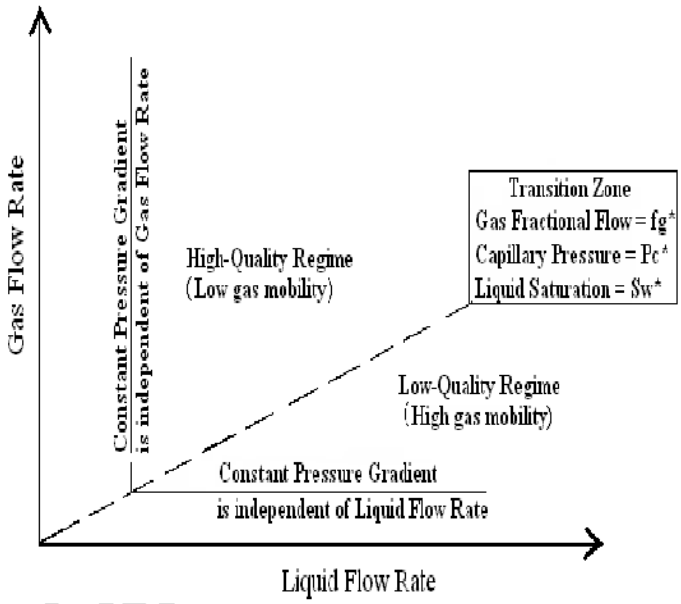
شکل ۱: جریان گاز در محیط متخلخل در حضور فوم [۵]

www.SID.ir

Archive of SID

۲-۱- رژیم‌های جریان فوم در طی تزریق هم‌زمان گاز و ماده فعال کننده سطحی

اوستر لوه و ژانت (۱۹۹۲) نشان دادند که دو رژیم جریان می‌تواند در محیط متخلخل مشخص گردد. رژیم با کیفیت بالا (خشک[۱]) که در گرادیان فشار پایدار[۲] به دبی جریان گاز وابسته نیست و رژیم با کیفیت کم (تر[۳]) که در آن گرادیان فشار به دبی جریان مایع وابسته نیست [۷]. ناحیه گذرا[۴] بین دو رژیم به وسیله کسر بحرانی جریان گاز (f_g^*) مشخص می‌گردد. الوارض و همکارانش (۱۹۹۹) نتایج اوسترلوه و ژانت را تایید کردند و با استفاده از داده‌های جریان فوم، با محیط‌های متخلخل و فرمولاسیون‌های مختلف ماده فعال کننده سطحی، در دبی های جریان متفاوت، نشان دادند که این رفتار جریان فوم یک رفتار عمومی است [۸]. شکل ۲ رژیم های جریان فوم در محیط متخلخل را نشان می دهد.



شکل ۲: پارامترها و رژیم‌های جریان در محیط متخلخل

۲-۲- رابطه بین کسر جزئی جریان گاز و تحرک گاز

اثر فشار موئینه برای هر نوع جریان چند فازی در محیط متخلخل مهم است، مخصوصاً وقتی دبی‌های جریان پایین و ناهمگنی در مغزه بالا است. در تزریق هم‌زمان گاز و ماده فعال کننده سطحی، کسر جزئی جریان گاز (f_g) که کیفیت فوم نیز نامیده می‌شود، اشباع آب یا گاز در مخزن را تغییر می‌دهد. فشار موئینه بحرانی[۵]، فوم را در محیط متخلخل به دو قسمت ناحیه فوم پایدار و ناحیه فوم ناپایدار تقسیم می‌کند. تقسیم بندی این نواحی بر اساس جریان جزئی بحرانی گاز (f_g^*) است و فشار موئینه بحرانی تعیین کننده‌ی f_g^* می‌باشد [۹]. همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، رابطه بین تحرک گاز و f_g به

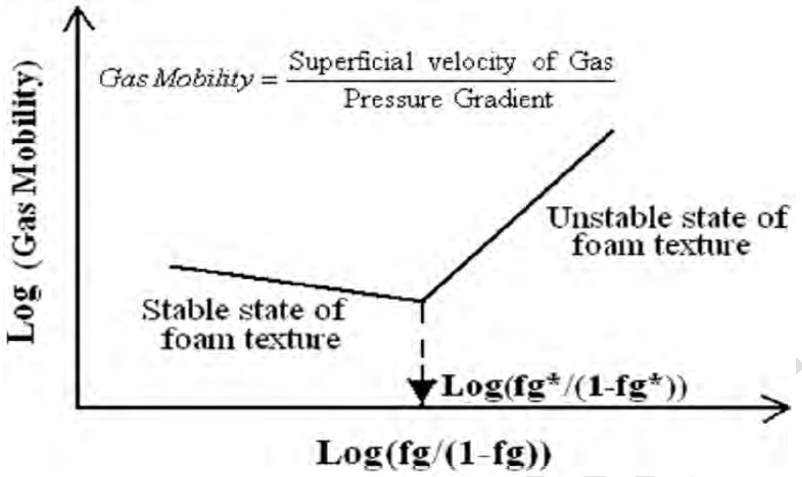
---

[۱] Dry
[۲] Steady State
[۳] Wet
[۴] Transition
[۵] Limiting Capillary Pressure

www.SID.ir

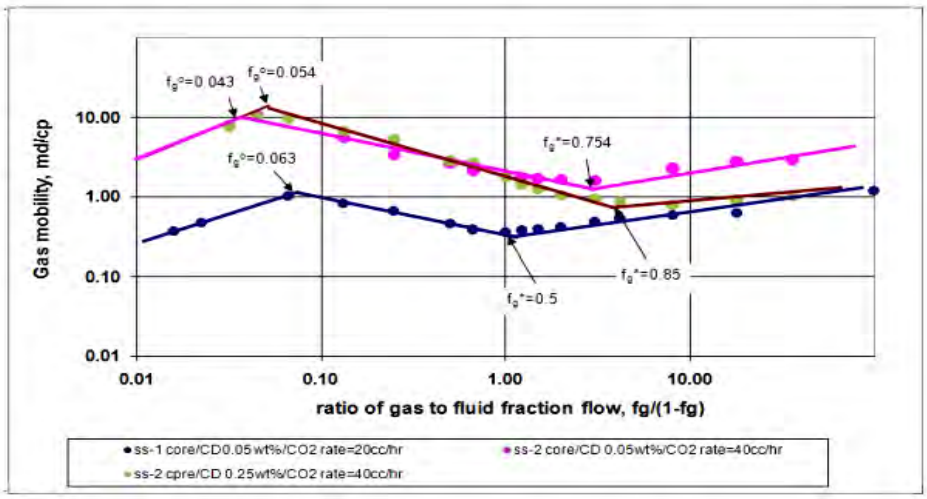
Archive of SID

وسیله دو خط راست که یکدیگر را در کیفیت بحرانی فوم (f_g^*) قطع می‌کنند مشخص می‌گردد (ناحیه گذرای رژیم جریان فوم). در مقادیر f_g زیر f_g^*، تحرک گاز با افزایش f_g به آرامی کاهش می‌یابد یا ثابت می‌ماند، که دلیل آن افزایش به‌دام افتادن و جریان ناپیوسته گاز، می‌باشد. در حالی که در f_g بالاتر (بالای f_g^*) تحرک گاز با افزایش f_g افزایش می‌یابد، که نشان دهنده حالت ناپایدار بافت فوم در نتیجه جریان پیوسته گاز می‌باشد [۹،۱۰].



شکل ۳: رابطه بین کیفیت فوم و تحرک گاز

اما طبق بررسی‌های یین و همکارانش رابطه‌ی بین تحرک گاز و f_g می‌تواند به وسیله سه خط راست متقاطع در f_g^* و کسر جریان شبه تک فازی (f_g^o)، مشخص گردد. هنگامی که $f_g < f_g^o$، با افزایش f_g تحرک گاز افزایش می‌یابد. هنگامی که $f_g^o < f_g < f_g^*$ با افزایش f_g تحرک گاز کاهش می‌یابد و اگر $f_g > f_g^*$ با افزایش f_g تحرک گاز افزایش می‌یابد. بنابراین همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، رژیم جریان فوم می‌تواند به سه ناحیه تقسیم گردد: ناحیه تک فازی ($f_g < f_g^o$)، ناحیه جریان جزئی پایین گاز ($f_g^o < f_g < f_g^*$) و ناحیه جریان جزئی بالای گاز ($f_g > f_g^*$) [۱۱].



شکل ۴: رژیم‌های جریان فوم [۱۱]

www.SID.ir

Archive of SID

نوع ماده فعال کننده سطحی و فرمولاسیون (غلظت) آن فاکتورهای مهم در تعیین مقدار f_g^* هستند. الوارض و همکارانش به مطالعه اثر تراوایی و دبی جریان بر f_g^* پرداختند و شرح دادند که افزایش دبی جریان یا تراوایی باعث افزایش f_g^* می‌گردد، که با نتایج به‌دست آمده توسط یین و همکارانش یکسان است [۸].

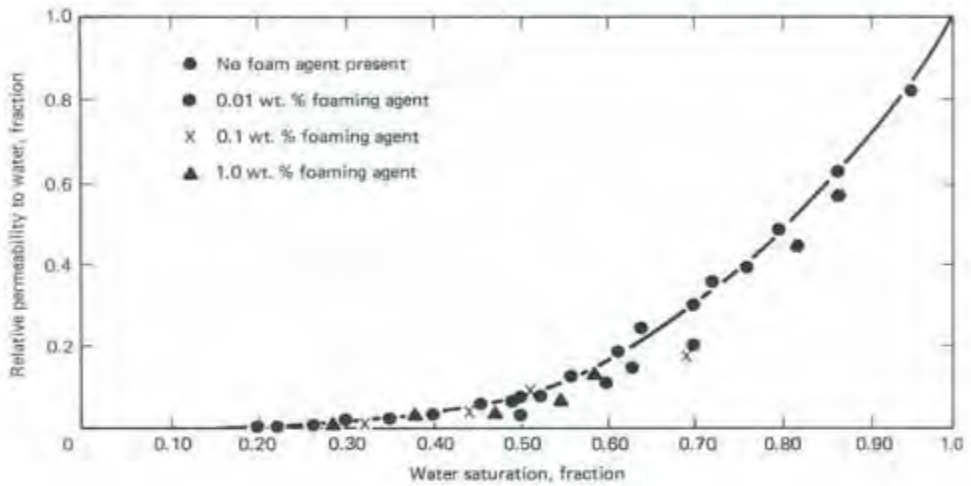
۲-۳- تحرک گاز

تحرک گاز با تشکیل فوم در محیط متخلخل کاهش می‌یابد. فوم پخش حباب‌های گاز در فاز تر (محلول فعال کننده سطحی) است، که این حباب‌ها توسط فیلم‌های نازک مایع از یکدیگر جدا شده‌اند. این فیلم‌های مایع می‌توانند غیر متحرک یا در حرکت باشند. فیلم‌های مایع ثابت، گاز را به دام می‌اندازند و آن را غیر متحرک می‌سازند، در حالی که فیلم‌های مایع متحرک توسط نیروی کشش سطحی و نیروهای دراگ[۶] عمل کننده بر آنها، باعث مقاومت در برابر جریان گاز می‌شوند. در هر دو حالت تحرک گاز با دو مکانیسم متفاوت کاهش می‌یابد. در حالت اول، تراوایی نسبی گاز با افزایش اشباع گاز به دام افتاده توسط فیلم‌های مایع ثابت (غیر متحرک)، کاهش می‌یابد. در حالت دوم، ویسکوزیته‌ی ظاهری گاز توسط فیلم‌های مایع متحرک افزایش می‌یابد. بنابراین فوم با افزایش ویسکوزیته‌ی ظاهری گاز و با کاهش تراوایی نسبی گاز، باعث کاهش تحرک گاز می‌گردد [۱۲].

۲-۴- تحرک مایع

در حالت تئوری انتظار می‌رود با تشکیل فوم در محیط متخلخل و افزایش اشباع گاز به دام افتاده در لایه‌های مایع، اشباع مایع کاهش یابد، که نتیجه‌ی آن کاهش غیر مستقیم تراوایی نسبی مایع است. با کاهش تراوایی نسبی مایع، تحرک مایع کاهش می‌یابد.

با این حال، نتایج آزمایشگاهی روند مخالفی را نشان می‌دهند. برای مثال، داده‌های آزمایشگاهی برنارد و همکارانش (۱۹۶۵) نشان داد که اشباع گاز و عامل کف کننده بر تراوایی نسبی مایع اثر گذار نیستند. در این حالت، تراوایی نسبی مایع با افزایش اشباع مایع افزایش یافت (شکل ۵) [۱۳].



شکل ۵: اثر فوم بر تراوایی نسبی مایع [۱۳]

[۶] Drag Forces

www.SID.ir

Archive of SID

۳- نتایج آزمایشگاهی حاصل از سیلابزنی با فوم

اگر درک کاملی از رفتار فوم در مخزن مورد نظر وجود داشته باشد، فوم می‌تواند به طور مؤثری باعث ازدیاد برداشت نفت شود. چانگ و گریگ (۱۹۹۸) به بررسی اثر کیفیت فوم و دبی جریان بر رفتار دی‌اکسید کربن فوم در دما و فشار مخزن پرداختند [۱۴]. در این مطالعه سه دبی جریان و پنج کیفیت فوم متفاوت مورد بررسی چگونگی اثر دبی جریان و کیفیت فوم بر تحرک فوم، مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که تحرک فوم با افزایش دبی جریان و افزایش کیفیت فوم افزایش می-یابد. لی‌یو، گریگ و اسوک (۲۰۰۶) تحرک فوم و جذب آن در مخازن کربناته را مورد بررسی قرار دادند [۹]. در این بررسی از مغزه‌های کربناته، گاز نیتروژن، مواد فعال کننده سطحی تجاری در شرایط مخزن، استفاده شد. نتایج این بررسی نشان داد که در یک دبی ثابت جریان گاز، تحرک گاز تقریباً با افزایش کیفیت تا رسیدن به کیفیت بحرانی فوم، کاهش می‌یابد، و با افزایش کیفیت فوم بالای کیفیت بحرانی فوم، تحرک فوم افزایش می‌یابد.

با وجود کاهش تحرک گاز در طی تزریق هم‌زمان گاز و ماده فعال کننده سطحی، در مخازن نفت سنگین به علت بالا بودن ویسکوزیته نفت، راندمان جاروبی ضعیف خواهد بود. بنابراین لازم است ویسکوزیته نفت در مخازن نفت سنگین کاهش یابد. شوبائو تیان و همکارانش (۲۰۰۸)، به بررسی اثر تزریق هم‌زمان بخار، CO_2 و ماده فعال کننده سطحی بر بازیافت از مخازن نفت سنگین پرداختند [۱۵]. در این بررسی چهار سناریوی مختلف بازیافت بررسی گردید، که شامل تزریق بخار به تنهایی، تزریق هم‌زمان بخار با CO_2، تزریق هم‌زمان بخار همراه با ماده فعال کننده سطحی و تزریق هم‌زمان بخار همراه با CO_2و ماده فعال کننده سطحی بود. بر اساس این نتایج بازیافت نفت در اثر تزریق هم‌زمان بخار، CO_2 و ماده فعال کننده سطحی بیشتر از بازیافت نفت در اثر تزریق بخار، تزریق بخار با CO_2 و تزریق بخار با ماده فعال کننده سطحی می‌باشد. اگر چه طبق این نتایج تزریق همزمان بخار، CO_2 و ماده فعال کننده سطحی موجب بازیافت مطلوب نفت گردید، اما تزریق هم‌زمان ماده فعال کننده سطحی همراه بخار مستلزم استفاده از مواد فعال کننده سطحی با مقاومت دمایی بالا است که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست. از طرفی دمای بالای بخار منجر به هیدرولیز شدن ماده فعال کننده سطحی و کاهش خاصیت مطلوب ماده فعال کننده سطحی می‌گردد.

یین، گریگ و اسوک (۲۰۰۹) به بررسی بازیافت نفت در سیلابزنی با دی‌اکسید کربن- فوم در مخازن ماسه سنگی پرداختند [۱۱]. این مطالعه در مغزهای ماسه سنگی بریا[۷] انجام گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که در شرایط یکسان، میزان نفت بازیافتی نهایی در سیلابزنی با دی‌اکسید کربن- فوم حدود ۱۷ درصد بیشتر از میزان نفت بازیافتی نهایی در تزریق هم-زمان دی‌اکسید کربن- آب نمک می‌باشد. علت این افزایش بازیافت می‌تواند به علت تشکیل فوم در محیط متخلخل در طی تزریق هم‌زمان دی‌اکسید کربن و ماده فعال کننده سطحی بوده باشد.

برای دست‌یابی به بازیافت مطلوب نفت در مخازن نفت سنگین، حجم بالایی از گاز و ماده فعال کننده سطحی مورد نیاز است. به نظر می‌رسد نوع گاز استفاده شده در فرآیند سیلابزنی با فوم در مخازن نفت سنگین مهم باشد. گاز CO_2 می‌تواند در نفت حل شود و ویسکوزیته نفت را کاهش دهد. در حالی که دیگر گازها مانند N_2 دارای این خاصیت نمی‌باشند. طبق بررسی-های عمادی و همکارانش (۲۰۱۱) سیلابزنی با دی‌اکسید کربن- فوم می‌تواند به طور موثری بازیافت نفت خام سنگین را بهبود دهد و مقدار CO_2 تزریق شده را کاهش دهد. بر اساس این بررسی، تزریق یک توده محلول ماده فعال کننده سطحی قبل از سیلابزنی با فوم تاثیر کافی بر بهبود بازیافت نفت سنگین ندارد؛ با این حال، به فرآیند شکل گیری فوم پایدار و سپس فرآیند جابجایی نفت سرعت می‌بخشد [۱۶].

[۷] Berea

www.SID.ir

Archive of SID

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله جریان فوم در محیط متخلخل در طی تزریق هم‌زمان گاز و ماده فعال کننده سطحی، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از سیلابزنی با فوم ذکر گردید. نتایج به‌دست آمده از این مطالعه به شرح زیر است:

۱. با افزایش کیفیت فوم (کسر جریان گاز) به بالای کیفیت بحرانی، تحرک گاز به شدت افزایش می‌یابد. بنابراین در کاربردهای آزمایشگاهی و میدانی فوم لازم است که کیفیت فوم در مقداری کمتر از مقدار بحرانی انتخاب گردد. این خاصیت مستقل از نوع گاز استفاده شده می‌باشد.

۲. نوع ماده فعال کننده سطحی و فرمولاسیون (غلظت) آن فاکتورهای مهم در تعیین مقدار کیفیت بحرانی فوم هستند. افزایش دبی جریان یا تراوایی باعث افزایش کیفیت بحرانی فوم می‌گردد.

۳. اگر درک کاملی از رفتار فوم در مخزن مورد نظر وجود داشته باشد، فوم می‌تواند به طور مؤثری باعث ازدیاد برداشت نفت شود.

۴. سیلابزنی با فوم می تواند به طور موثری باعث بهبود بازیافت نفت از مخازن نفت سنگین شود.

۵. در مخازن نفت سنگین به‌کارگیری روش‌های حرارتی ازدیاد برداشت نفت به صورت ترکیبی با سیلابزنی با فوم می‌تواند با کاهش ویسکوزیته نفت باعث افزایش راندمان جاروبی شود.

۶. در مخازن نفت سنگین تزریق هم‌زمان CO_2 و ماده فعال کننده سطحی نسبت به دیگر گازها مؤثرتر است.

تشکر و قدردانی

از دکتر اقبال صحرایی و دکتر الناز خداپناه به خاطر راهنمایی ایشان کمال تشکر را داریم.

منابع

1. Bond, D.C and Holbrook, O.C., "Gas Drive Oil Recovery Process", U. S. Patent No. 2,866,507, 1958.
2. Fried, A.N., "The Foam Drive Process for Increasing the Recovery of Oil", Report RI-5866, U.S. Bureau of Mines, Washington, 1961.
3. Schramm, L. L. and Wassmuth F., "Foam: Basic Principles , In: Schramm, L. L. (ed), Foams: Fundamentals and Application in the Petroleum Industry," Washington, DC, USA: American Chemical Society, 1994.
4. Vikingstad A., K., and Aarra M. G., "Comparing the Static and Dynamic Foam Properties of a Fluorinated and an Alpha Olefin Sulfonate Surfactant," Journal of Petroleum Science and Engineering, 2009. Vol. 65, Issues(1-2): p. 105-111.

www.SID.ir

Archive of SID

5. W. Yan.: "Foam for Mobility Control on Alkaline/Surfactant/ Enhanced Oil Recovery Process," PhD Dissertation, Rice University, Houston, Texas, 2006.
6. D. Tanzil.: "Foam Generation and Propagation in Heterogeneous Porous Media," PhD Dissertation, Rice University, Houston, Texas, USA, 2001.
7. Osterloh, W.T., and Jante, M.J. (1992), 'Effects of Gas and Liquid Velocity on Steady-State Foam Flow at High Temperature', Paper Presented at the SPE/DOE Enhanced Oil Recovery Symposium, April 22-24, 1992. Tulsa, OK, USA, SPE 24179.
8. Alvarez, J.M., Rivas, H.J. and Rossen, W.R.(1999), 'Unified Model for Steady-State Foam Behavior at High and Low Foam Qualities', Paper Presented at the Annual Technical Conference and Exhibition of Society of Petroleum Engineers, 3-6 October 1999. Houston, Texas, USA. SPE 56825.
9. Liu Y., Grigg R. B.., and Svec R. K., "Foam Mobility and Adsorption in Carbonate Core," SPE Paper 99756,SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, Oklahoma, 22-26 April 2006.
10. Khatib Z. L., Hirasaki G. J. and Falls A. H., "Effects of Capillary Pressure on Coalescence and Phase Mobilities in Foams Flowing through Porous Media," SPERE, August 1988 :p. 919–926.
11. Yin G., Grigg R. B.., and Yi Svec., "Oil Recovery and Surfactant Adsorption during CO_2-Foam Flooding," SPE Paper 19787 ,Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 4-7 May 2009.
12. F. Friedmann, W. H. Chen and P. A. Gauglitz.: "Experimental and Simulation Study of High-Temperature Foam Displacement in Porous Media," Society of Petroleum Engineers and Research Engineers, SPE Reservoir Engineering, , 1991: p. 37–45
13. G. G. Bernard and W. L. Jacobs.: "Effect of Foam on Trapped Gas Saturation and on Permeability of Porous Media to Water," SPE Journal 1204, 1965 Vol. 5, No. 4: p. 295 - 300.
14. Chang S. H. and Grigg R. B., "Effects of Foam Quality and flow Rate on CO_2-Foam Behavior at Reservoir Conditions," SPE Paper 39679,SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, 19-22 April 1998.
15. S. Tian and S. He.: "Investigating the Effect of Steam, CO_2, and Surfactant on the Recovery of Heavy Oil Reservoirs," SPE Paper 117394, International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium, Calgary, Alberta, 20-23 October 2008.
16. A. Emadi, M. Sohrabi and M. Jamiolahmady.: "Mechanistic Study of Improved Heavy Oil Recovery by CO_2-Foam Injection," Paper SPE 143013,Kuala Lumpur, 2011.

www.Reservoir.ir

www.SID.ir