

انواع و کاربرد سیالات شکاف‌زنی در عملیات شکاف‌هیدرولیکی

هادی باقرزاده، مجتبی کریمی^۱ پژوهشگاه صنعت نفت

چکیده

شکافت هیدرولیکی یک تکنیک مناسب برای تحریک بسیاری از چاه‌ها تحت شرایط گوناگون است. در ابتدا این تکنیک برای مخازن گازی با نفوذپذیری پایین به کار گرفته شد و هم‌اکنون نیز نقش اساسی در سازندهای ماسه‌سنگی با نفوذپذیری پایین دارد و به‌طور فزاینده برای تولید از مخازن کربناته، شیلی و زغال‌سنگی با نفوذپذیری پایین استفاده می‌شود. سیال شکاف‌زنی یکی از مهم‌ترین ملزومات شکافت هیدرولیکی موفق به‌شمار می‌رود. سیالات شکاف‌زنی رایج به چهار گروه سیالات پایه آبی حاوی پلیمر، سیالات پایه روغنی (هیدروکربنی)، سیالات پرانرژی و کف‌ها تقسیم می‌شوند. از جمله سیالات شکاف‌زنی غیرمتداول می‌توان به سیالات فاقد پلیمر مانند سورفکتانت‌های ویسکوالاستیک، سیالات حاوی متانول و سیالات پایه دی‌اکسید کربن مایع اشاره کرد. مهم‌ترین سوالی که در ارتباط با سیالات شکاف‌زنی مطرح می‌شوند، به تعداد بسیار زیاد این گروه از سیالات و چگونگی انتخاب مناسب‌ترین سیال برای یک کاربرد خاص مربوط می‌شود. پاسخ به این سوال نیازمند دانش کافی نسبت به انواع این سیالات و کاربرد آن‌هاست. از این‌رو، در این مقاله سعی بر آن است که به شرح سیالات مختلف شکافت، محدودیت‌ها و کاربردهای آن‌ها پرداخته شود.

واژگان کلیدی: شکافت هیدرولیکی، تحریک چاه، سیالات شکاف‌زنی

مقدمه

مقرون به‌صرفه‌ترین راه برای شکاف‌زنی یک سازند، به کارگیری ساده‌ترین سیال شکاف‌زنی است. سیالات پایه آبی یا پایه روغنی با گرانروی پایین و کمترین میزان افزودنی‌ها ساده‌ترین سیالات شکاف‌زنی به‌شمار می‌روند. سیالات مقرون به‌صرفه در کنار مزایای یاد شده از معایبی نیز برخوردارند که از جمله آن‌ها می‌توان به انتقال ضعیف پروپانت‌ها، کنترل محدود نشتی و اصطکاک غیرقابل قبول در سرعت‌های پمپاژ بالا اشاره کرد. اصطکاک را می‌توان با اضافه کردن افزودنی‌های مختلف کنترل کرد اما در صورتی که سازند از اشباع ناسازگار^۶ برخوردار باشد - حتی در سازندهایی با عبوردهی پایین که میزان نشتی در آن‌ها ناچیز است - ممکن است تحریک مطلوب حاصل نشود.

۱- سیالات پایه آبی

سیالات پایه آبی محدوده گسترده‌ای از سیالات، از آب ساده حاوی عوامل کاهنده اصطکاک تا سیالات شبکه‌ای پلیمری پیچیده حاوی افزودنی‌های مختلف را شامل می‌شود. آب، ارزان‌ترین و در دسترس‌ترین سیال روی کره زمین است، اما در برخی از موارد، کیفیت آب کمترین استانداردهای موردنیاز فرآیند شکاف‌زنی را تأمین نمی‌کند. سیالات شکاف‌زنی مدرن را می‌توان به‌صورت اختلاط

یکی از فاکتورهای موثر در موفقیت یک عملیات شکافت هیدرولیکی، سیال شکاف‌زنی مناسب است. خواص و کارکردهای موردنیاز سیال شکاف‌زنی به روش‌های مختلف قابل دستیابی است. به‌همین دلیل، سیالات شکاف‌زنی متعددی برای کاربردهای مختلف وجود دارند. سیالات شکاف‌زنی رایج، شامل سیالات پایه آبی حاوی پلیمر، سیالات پایه روغنی (هیدروکربنی)، سیالات پرانرژی^۱ و کف‌ها^۲ هستند. سیالات فاقد پلیمر مانند سورفکتانت‌های ویسکوالاستیک، سیالات حاوی متانول و سیالات پایه دی‌اکسید کربن مایع^۳ از جمله سیالات شکاف‌زنی نوین می‌باشند^[۱]. برای انتخاب یک سیال شکاف‌زنی مناسب باید نکات زیر را مورد توجه قرار داد:

سازندهای مختلف از خواص لیتولوژی^۴ متفاوتی برخوردارند، در نتیجه، برای انتخاب سیال شکاف‌زنی مناسب، شبیه‌سازی سازندهای مختلف با خواص و ویژگی‌های متفاوت امری ضروری است. از طرفی، اجزای معدنی موجود در سازند، انتخاب سیال شکاف‌زنی را به مواردی که سازگاری کامل میان سیال و سازند وجود داشته باشد، محدود می‌کند. علاوه بر موارد یاد شده، در صورت وجود احتمال وقوع تورم^۵ یا حرکت و مهاجرت رُس، به کارگیری سیالات جایگزین یا افزودنی‌های خاص امری اجتناب‌ناپذیر است.

*نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (karimimoj@ripi.ir)



ایجاد شکاف‌های طولانی در مخازن شیل از طریق پمپ کردن آب با فشار و سرعت بالا و حداقل میزان پروپانت در این مخازن امکان‌پذیر است. از طرفی، به این روش می‌توان شکاف‌های تک‌لایه پروپانتی در مخزن ایجاد کرد. بدون استفاده از کاهنده‌های اصطکاک، میزان اصطکاک در سرعت‌های پمپاژ بالا، بسیار زیاد خواهد بود. رایج‌ترین عامل کاهنده اصطکاک برای آب، پلیمر اکریل آمیدی است که به صورت جزئی هیدرولیز شده است. پلیمرهای پلی‌اکریل آمید معمولاً به عنوان امولسیون‌های غیر روغنی^{۱۱} یا با یک وارون‌گر ذاتی یا با یک وارون‌گر اضافی که امولسیون^{۱۲} را چرخانده و پلیمر را هیدرولیز می‌کند، به کار گرفته می‌شوند. این امر باعث افزایش گرانروی و کاهش اصطکاک سیال می‌شود. از آنجایی که انتقال پروپانت در شرایط جریان آشفته نیاز به گرانروی ندارد، می‌توان با به کارگیری این گروه از سیالات، به جای سیالات شبکه‌ای یا کف‌ها، فرآیند شکافت هیدرولیکی را با صرف هزینه پایین‌تر انجام داد. روش دیگر برای کاهش گرانروی سیال، به کارگیری ژل‌های خطی است. در این حالت، گوار یا مشتقات آن برای افزایش گرانروی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مشتقات گوار عبارتند از هیدروکسی پروپیل گوار (HPG)، کربوکسی متیل گوار (CMG) یا کربوکسی متیل هیدروکسی پروپیل گوار (CMHPG)^[۱].

۱-۲- سیالات شبکه‌ای^{۱۴}

ایجاد اتصالات عرضی، موثرترین راه افزایش گرانروی سیالات به‌شمار می‌رود. ایجاد اتصالات عرضی در حقیقت روشی ساده برای افزایش وزن مولکولی پلیمر است. در سیالات پایه آبی می‌توان در pH های بالا یا پایین اتصالات عرضی ایجاد کرد. سیالات شبکه‌ای pH پایین برای انرژی‌زایی و ایجاد کف توسط CO₂ بسیار مفید هستند. در مخازن دما بالا، می‌توان با ایجاد اتصالات عرضی در پلیمرها، میزان پلیمر مصرفی را تا ۱۰ برابر مقدار موردنیاز پلیمرهای خطی کاهش داد. در گذشته، میزان پلیمر موردنیاز این گروه از سیالات^{۱۵} pptg ۸۰-۴۰ (پوند در هزار گالن) بود اما در حال حاضر، به کارگیری گوارهایی با بازدهی بالا و تکنولوژی‌های پیشرفته برای ایجاد اتصالات عرضی، میزان پلیمر موردنیاز را به مقادیری در بازه ۳۵-۱۲ pptg کاهش داده است^[۱].

۱-۳- سیالات شبکه‌ای بوراتی

متداول‌ترین سیال شکاف‌زنی پایه آبی، سیال شبکه‌ای بوراتی است. در شکل ۱- شماتیکی از ساختار شیمیایی گوار شبکه‌ای بوراتی ارائه شده است.

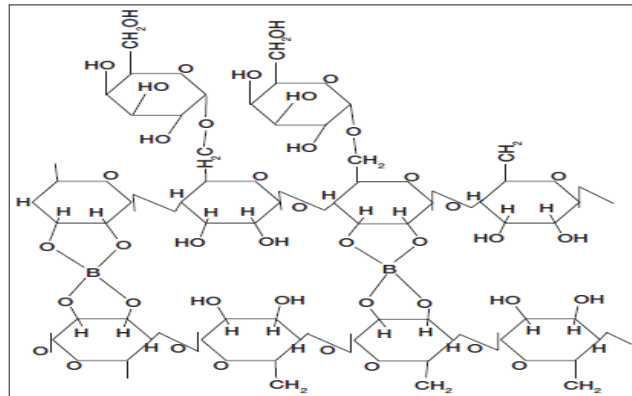
بج^۶ یا اختلاط پیوسته^۸ به چاه تزریق کرد. خواص رئولوژیکی این گروه از سیالات را می‌توان با تنظیم میزان پلیمر و افزودنی‌ها حتی در طول فرآیند شکاف‌زنی تنظیم کرد.

در چاه‌های گازی تحت فشار، برای تسهیل بازیابی سیال باید از سیالات پرانرژی برای فرآیند شکاف‌زنی هیدرولیکی استفاده کرد. سیالاتی که توسط CO₂ انرژی‌دار می‌شوند، به دلیل انحلال CO₂ در آب و تشکیل اسید کربنیک، از pH پایینی برخوردارند. در نتیجه، در این گونه موارد، سیالاتی مورد توجه قرار می‌گیرند که از قابلیت کاربرد و شبکه‌ای شدن در pH های پایین برخوردارند. در pH های پایین زنجیرهای پلیمری در اثر فرآیند هیدرولیز می‌شکنند. این امر تمیز کردن پک‌های پروپانت را تسهیل می‌کند^[۱].

گاهی در مناطق سردسیر مانند کانادا، آلاسکا و روسیه، گرم کردن آب در زمستان امکان‌پذیر نیست. در چنین مواردی، می‌توان با افزودن متانول به سیال شکاف‌زنی، از انجماد آن جلوگیری کرد. از طرفی، در برخی از سازندها، افزودن متانول به سیال شکاف‌زنی برای کاهش اثرات موئینگی شدید، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. در هر صورت، مشتقات گوار در متانول محلول نیست، به گونه‌ای که حتی پس از ترکیب با آب نیز تنها مقدار اندکی متانول را در خود حل می‌کند. برخی از مشتقات گوار^۹ می‌توانند در محلول‌های الکلی با آب^{۱۰} ترکیب شوند. گوار و مشتقات گوار، پس‌ماند^{۱۱} بسیار اندکی دارند که مزیتی عمده در کاهش آسیب به پک پروپانت به‌شمار می‌رود. گوار و مشتقات آن به ترتیب پس‌ماندی کمتر از ۲ و ۰/۵ دارند^[۱].

۱-۱- سیالات پایه آبی با گرانروی پایین

آب با ضریب اصطکاک پایین در اواخر دهه ۱۹۵۰ به عنوان سیال شکاف‌زنی معرفی شده و در دهه ۱۹۶۰ به عنوان رایج‌ترین سیال شکاف‌زنی به‌ویژه برای شکاف‌زنی شیل مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۱ | ساختار شیمیایی گوار شبکه‌ای بوراتی

برابر برش مقاوم هستند، اما تحت تأثیر نیروهای برشی بالا، تجزیه می‌شوند. از طرفی، از آنجایی که این سیالات قابلیت بازیافت برشی ندارند، با قطع شدن نیروهای برشی به حالت اولیه خود باز نمی‌گردند. سیالات شبکه‌ای فلزی pH-بالای متداول عبارتند از سیالات پایه CMG یا سیالات پایه CMHPG. میزان پلیمر موجود در این سیالات پایین بوده و در بازه ۳۵-۱۵ pptg قرار دارد، اما برای افزایش پایداری حرارتی سیالات یاد شده در دماهای بالاتر از ۳۵۰ °F، می‌توان میزان پلیمر موجود در آن‌ها را افزایش داد.

سیالات pH-پایین نیز مشابه سیالات pH-بالا، سیالات شبکه‌ای پایه CMG یا پایه CMHPG هستند. در pHهای پایین گوار و HPG به آسانی در اثر هیدرولیز اسیدی تجزیه می‌شوند، در حالی که پلیمرهای کربوکسلاتی در برابر هیدرولیز اسیدی بسیار مقاوم هستند. متداول‌ترین اتصال‌دهنده‌ای که در حال حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرد، زیرکونیوم است. اتصال‌دهنده‌ها معمولاً ترکیبات کی‌لیت شده^{۱۹} هستند و به دو گروه اتصال‌دهنده‌های پایه آبی و اتصال‌دهنده‌های پایه الکلی تقسیم می‌شوند. این گروه از سیالات، در دماهای بالا (۴۵۰ °F) نیز با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پلیمرهای کربوکسلاتی مانند CMGها در حضور KCl عملکرد خوبی ندارند، در نتیجه، برای دستیابی به بازدهی بالا، باید پلیمرهای یاد شده را با نمک‌های جایگزین KCl مورد استفاده قرار داد [۵].

۱-۵- سیستم‌های شبکه‌ای تأخیری

با اعمال تغییرات دما یا زمان می‌توان ایجاد اتصالات عرضی را به تأخیر انداخت. مهم‌ترین هدف در به تأخیر انداختن زمان ایجاد اتصالات عرضی^{۲۰}، کاهش نیروی اصطکاک و در نتیجه، کاهش توان مصرفی جهت پمپاژ سیالی با گرانروی بالاست. به علاوه، به تأخیر انداختن زمان اتصال در دهانه چاه که محیطی با نیروهای برشی بالا به‌شمار می‌رود، تخریب سیال و کاهش گرانروی آن را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. می‌توان به کارگیری افزودنی‌های تأخیری با مکانیزم‌های عملکرد مختلف، زمان ایجاد اتصالات عرضی را تنظیم کرد. با این وجود، در صورتی که دمای سیال تا ۱۴۰-۱۲۰ درجه فارنهایت افزایش یابد، اجزای سیال به سرعت توسط اتصالات عرضی به یکدیگر متصل شده و گرانروی سیال افزایش خواهد یافت. سیالات تأخیری که در میدین نفتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، به گونه‌ای طراحی می‌شوند که اتصالات عرضی آن‌ها زمانی برقرار شود که سیال، ۲/۳-۳/۴ طول لوله مغزی را طی کرده باشند. سیستم‌های تأخیری دمایی^{۲۱} به گونه‌ای کی‌لیت می‌شوند که با رسیدن به دمای مشخص، اتصالات عرضی در آن‌ها برقرار شود.

سیالات بورتاتی قابلیت بازیابی برشی را دارند، بدین معنی که این سیالات در صورت اعمال نیروهای برشی، تجزیه شده و از بین می‌روند. اما با قطع نیروی برشی، گرانروی آن‌ها احیا شده و به حالت اولیه باز می‌گردد. دلیل وقوع این پدیده این است که مکانیزم شبکه‌ای شدن در این سیالات بر اساس پیوند هیدروژنی صورت می‌گیرد. طبق نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های صنعتی، سیالات بورتاتی با طراحی مناسب از خواص انتقال پروپانت بسیار مطلوب برخوردارند زیرا گرانروی برشی این گروه از سیالات بسیار پایین (نزدیک صفر) است [۲]. ایجاد اتصالات عرضی در سیالات بورتاتی در pHهای پایین‌تر از ۸، فرآیندی برگشت‌پذیر است. در نتیجه، در صورت وجود آب خنثی و یا pH-پایین در چاه، اتصالات عرضی سیالات بورتاتی باز می‌شوند. جداکننده‌ای که برای باز کردن ژل‌های شبکه‌ای طراحی شده است، ژل‌های شبکه‌ای باز شده را به سهولت از هم جدا می‌کند. سیالات pH-بالا با CO₂ سازگاری ندارند ولی می‌توانند توسط N₂ به سیالات پرانرژی تبدیل شوند.

پیش از پیدایش اورگانوبورات‌ها و اتصال‌دهنده‌های استری بورات^{۱۶} (که در آن‌ها یون بورات در نتیجه هیدرولیز پلیمر استری بورات آزاد می‌شود)، کاربرد سیالات بورتاتی به چاه‌هایی با دمای پایین‌تر از ۲۲۰ °F محدود می‌شد در حالی که سیالات دما بالای جدید می‌توانند در دماهایی بالاتر از ۳۰۰ °F به کار گرفته شوند. با پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه سیالات بورتاتی، قابلیت تولید فرمولاسیون‌های جدید با غلظت‌های بالای KCl به منظور ایجاد سازگاری با سازندهای رُسی نیز فراهم شده است [۳، ۴].

۱-۴- سیالات شبکه‌ای اورگانومتالی

سیالات شبکه‌ای اورگانومتالی در محدوده وسیعی از pH (pHهای بالا و پایین) کاربرد دارند. تا سال ۱۹۹۵ از اتصال‌دهنده‌های عرضی پایه زیرکونیوم، آلومینیوم تیتانیوم، کروم و غیره استفاده می‌شد. به‌استثنای اتصال‌دهنده‌های پایه زیرکونیومی، کاربرد سایر اتصال‌دهنده‌های یاد شده به علت ناپایداری در دماهای بالا و تحت نیروهای برشی و همچنین جنبه‌های زیست‌محیطی متوقف شده است. پیش از پیدایش مشتقات کربوکسیلاتی^{۱۷} گوار، صنعتگران از گوار و HPG برای ایجاد پیوند با اتصال‌دهنده‌های فلزی استفاده می‌کردند. در حال حاضر، CMGها و CMHPGها متداول‌ترین پلیمرهایی هستند که در سیستم‌های شبکه‌ای فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرند. سیستم‌های شبکه‌ای فلزی برای کاربردهای دما بالا طراحی شده‌اند، زیرا عملکرد سیالات مونو بورتاتی^{۱۸} که دارای یک یون بورات هستند، در دماهای بالاتر از ۹۰ °F ۱۶۰ دچار اختلال می‌شود. گرچه سیالات شبکه‌ای زیرکونیومی در



عملیات شکافت هیدرولیکی شیل ها و سایر سازندهای با نفوذپذیری پایین که رویکردهای اقتصادی در آن‌ها از اهمیت به‌سزایی برخوردار است، به کار گرفته می‌شوند. سیالات شبکه‌ای بوراتی که از قابلیت کنترل هرزروی بالایی برخوردارند، گزینه مناسبی برای شکاف‌زنی چاه‌هایی با هرزروی بالا به‌شمار می‌روند. سیالات شبکه‌ای بوراتی را می‌توان با استفاده از N_2 انرژی بخشیده یا به کف تبدیل کرد. هم‌اکنون این سیالات به‌طور گسترده در سراسر دنیا برای شکاف‌زنی چاه‌های نفت و گاز به کار گرفته می‌شوند. کاربرد گسترده این سیالات به قابلیت دست‌یابی به گرانروی بالا در نقاطی نزدیک دهانه چاه و چاه‌های با انحراف بالا، مربوط می‌شود [۹]. از طرفی، سیالات شبکه‌ای بوراتی بهترین سیالات انتقالی هستند که می‌توانند برای انتقال پروپانت‌ها در چاه‌های انحرافی (جهت‌دار)^{۲۶} و افقی به کار گرفته شوند. همچنین، این سیالات می‌توانند جهت انجام عملیات شکافت هیدرولیکی در بستر زغال‌سنگی^{۲۷} سازندهای خاص به کار گرفته شوند. سیالات pH-پایین را که برای شکاف‌زنی مخازن گازی تحت فشار با رس بالا بسیار مناسب هستند، می‌توان با استفاده از CO_2 یا N_2 انرژی بخشیده یا به کف تبدیل کرد. سیالات سازگار با متانول با موفقیت برای شکاف‌زنی چاه‌های گازی با اشباع آب کاهش‌ناپذیر^{۲۸} مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

توانایی تنظیم گرانروی سیالات پایه آبی که به دو صورت پیوسته و مرحله به مرحله قابل اجراست، این سیالات را به مناسب‌ترین گزینه برای شکاف‌زنی چاه‌های گازی با نفوذپذیری پایین تبدیل کرده است؛ زیرا در چاه‌هایی با نفوذپذیری پایین، برای غلبه بر پیچایی^{۲۹} نقاط نزدیک دهانه چاه، به سیالاتی با گرانروی بالا نیاز است، در حالی که برای انتقال بهینه پروپانت‌ها در این چاه‌ها باید از سیالاتی با گرانروی پایین بهره گرفت. از طرف دیگر، شکاف‌زنی چاه‌های دما بالا ($T > 300$) درجه فارینه‌ایت) فقط با سیالات پایه آبی امکان‌پذیر است [۱۰].

۲- سیالات پایه روغنی

در سال‌های اخیر، تکنولوژی‌های مرتبط با سیالات شکاف‌زنی پایه روغنی پیشرفت چشم‌گیری داشته است. روند رشد تکنولوژی‌های یاد شده از پلیمرهای پیوندی^{۳۰} کربوکسیلات سدیم آغاز شده و با گذر از پلیمرهای پیوندی کربوکسیلات آلومینیوم به پلیمرهای پیوندی فسفات آلومینیوم رسیده است. در دهه اخیر، سیالات پایه روغنی با سیستم‌های استری فسفات آهن جایگزین شده‌اند.

نخستین سیالات شکاف‌زنی پایه روغنی با استفاده از ترکیباتی مانند فلزات آلکالینی^{۳۱} یا کربوکسیلات آلومینیوم تهیه شدند. این دسته از مواد ژلی ناپالم^{۳۲} نامیده می‌شوند. نمک‌های کربوکسیلات آلومینیوم

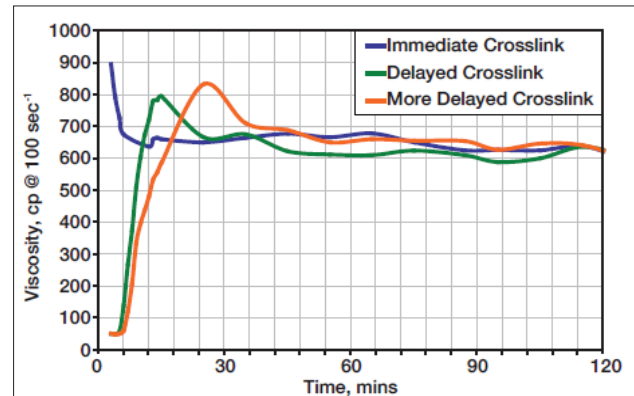
معمولاً سیستم‌های شبکه‌ای دوگانه^{۳۲} با این نوع اتصال‌دهنده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این سیستم‌ها، ابتدا در دمای محیط، اتصالات عرضی ضعیفی در سیال برقرار می‌شود. در ادامه، اتصالات عرضی ثانویه در دمای مشخص شده برقرار می‌گردند. اتصالات عرضی اولیه امکان انتقال پروپانت‌ها از سطح به داخل چاه را فراهم می‌آورند، در حالی که اتصالات عرضی ثانویه شرایط موردنیاز جهت انتقال و تعلیق پروپانت‌ها در شکاف‌های ایجاد شده را در دماهای ته‌چاهی فراهم می‌سازند. در شکل ۲- گرانروی یک سیستم تأخیری بر حسب زمان ارائه شده است. گرانروی سیال شکاف‌زنی با استفاده از ویسکومتر Fann 50 اندازه‌گیری شده است. بر اساس نمودار به‌دست آمده، گرانروی سیالات تأخیری با گذشت زمان از مقادیر بسیار پایین تا مقادیر ثابتی در بازه ۷۰۰-۶۰۰ cp افزایش یافته است [۶، ۷].

۱-۶- عملکرد جداکننده‌ها^{۳۳} در سیالات پایه آبی

تأثیرات منفی جذب عوامل کاهنده‌ی اصطکاک بر سازندهای شیل و تراکم جزئی پروپانت‌های تک‌لایه که منجر به به‌کارگیری اکسنده‌ها^{۳۴} و اکسنده‌های کپسوله^{۳۵} جهت کاهش آسیب‌های احتمالی می‌گردد، باعث بروز نگرانی‌هایی در این زمینه شده است. هرچند میزان عوامل کاهنده‌ی اصطکاک در سیال ناچیز است، حجم مصرف بالای سیالات شکاف‌زنی می‌تواند باعث ایجاد مشکلات اساسی گردد، اما به کارگیری جداکننده‌های مناسب می‌تواند مشکلات احتمالی را به‌میزان چشم‌گیری کاهش دهد. نکته‌ای که باید در مورد جداکننده‌ها در نظر گرفت این است که پلیمرهای گوار و مشتقات گوار توسط اکسنده‌ها و جداکننده‌های آنزیمی تخریب می‌شوند [۸].

۱-۷- سیالات پایه آبی در چاه‌های گاز

سیالات شکاف‌زنی با گرانروی پایین، سال‌هاست که با موفقیت در



شکل ۲ | روند افزایش گرانروی سیال شبکه‌ای تأخیری زیرکونیوم.

یاد شده در هیدروکربن‌های پالایش شده‌ای مانند بنزین، دیزل و نفت سفید^{۳۳} پخش می‌شدند. در سال‌های نخست، ژل‌کننده‌های (ژل‌سازها)^{۳۴} کربوکسیلات آلومینیومی از نظر گران‌روی، عملکرد بسیار مطلوبی داشتند اما یکی از مهم‌ترین معایب این ترکیبات، عدم توانایی آن‌ها برای ژل‌سازی نفت‌های خام مختلف بود. در آن برهه از زمان، تصور می‌شد که برخی از نفت‌های خام فاقد نوع و یا میزان خاصی از ترکیبات آلی خطی هستند که برای تشکیل یک ژل موثر ضروری هستند. در واقع، این فرآیند شیمیایی به ژل شدن هیدروکربن‌های پالایش شده که خود از ناپایداری برخی از انواع نفت خام ناشی می‌شود، محدود می‌شد.

سیستم‌های ژل بعدی، دیسپرژن‌های کلوئیدی^{۳۵} پایه صابونی بودند که بسیاری از خواص یک سیال مطلوب را در خود داشتند. مایسل‌های^{۳۶} صابون به دلیل پایداری در نفت‌های حاوی آسفالتین، جایگزین ژل‌های کربوکسیلات آلومینیوم شدند. مایسل‌ها تجمعی از مولکول‌های سورفکتانت پخش شده در یک مایع کلوئیدی بودند. از طرف دیگر، سیالات ژلی کربوکسیلات آلومینیوم، فشار اصطکاکی بسیار بالایی از خود نشان می‌دادند. ژل‌های روغنی که از تکنولوژی دیسپرژن صابون کلوئیدی استفاده می‌کردند، سیستم‌های ژلی مطلوبی تشکیل می‌دادند. این سیالات قادر بودند بدون افزایش گران‌روی، ذرات ماسه را به خوبی انتقال دهند[۱۱].

مهم‌ترین ویژگی دیسپرژن‌های صابونی این است که مشابه دیگر سیالات شبه پلاستیک^{۳۷} در حضور نیروهای برشی بالا، گران‌روی آن‌ها کاهش می‌یابد. نوع و غلظت صابون و نوع هیدروکربن تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر خواص و عملکرد رئولوژیکی سیال دارد.

نمک‌های فلزی استرهای اورتوفسفات آلکیل اسیدی^{۳۸} نسل بعدی سیالات پایه روغنی بودند که در مقایسه با سیستم‌های هیدروکربنی ژلی صابونی، عملکرد بهتری داشتند. سیستم‌های اورتوفسفات اسیدی آلکیل آلومینیوم بالاترین بازدهی را در عملیات شکافت هیدرولیکی از خود نشان داده‌اند. این سیستم‌ها به‌عنوان عوامل ژل‌کننده سیالات شکافت‌زنی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای این منظور، استر اورتوفسفات آلکیل اسیدی آلومینیوم در هیدروکربن پخش شده و در ادامه، با افزودن محلول بازی یا یک آمین قوی، مخلوط به‌دست آمده فعال می‌شود. در سال‌های بعد، یون‌های آهن جایگزین نمک‌های آلومینیوم شدند[۱۲، ۱۳، ۱۴].

در سیستم‌های جدیدتر، گران‌روی با افزودن مقدار اندکی افزودنی به میزان چشم‌گیری افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، گران‌روی این سیالات در مدت کوتاهی افزایش می‌یابد و آب موجود در سیالات پایه روغنی، بر عملکرد آن‌ها تأثیری ندارد. سیالات یاد شده، بر

خلاف سیستم‌های پایه آلومینیومی نسبت به غلظت و غلظت نسبی افزودنی‌ها حساس نیستند. به همین دلیل، پمپ کردن آن‌ها در مقایسه با سیستم‌های پیشین، به مراتب آسان‌تر است.

ژل‌ها با حل شدن تدریجی افزودنی‌هایی مانند اکسید کلسیم، اکسید منیزیم یا کربنات‌ها می‌شکنند. برخی از این سیستم‌ها با نفت‌های خام انتخابی^{۳۹} نیز سازگاری دارند. در هر حال، هر ماده آسفالتینی موجود در نفت خام می‌تواند با آهن واکنش داده و پایداری ژل را مختل کند. در برخی از سازنده‌های ماسه‌ای در کانادا، ژل‌های پایه هیدروکربنی با موفقیت جهت تحریک سازنده‌های گازی حساس به آب با نفوذپذیری پایین به کار گرفته شده‌اند[۱۵].

۳- سیالات پرانرژی

سیالات شکافت‌زنی به‌منظور کاهش میزان سیال مصرفی برای شکافت‌زنی سازند و بهبود بازیابی سیال توسط N_2 یا CO_2 به سیالات پرانرژی تبدیل می‌شوند. سیالاتی جزو سیالات پرانرژی محسوب می‌شوند که در آن‌ها، نسبت حجم عامل انرژی‌زا به حجم کل سیال (که به‌عنوان کیفیت سیال تعریف می‌شود) کمتر از ۵۳ درصد باشد. در صورتی که این نسبت از ۵۳ درصد بیشتر باشد، سیالات در گروه کف‌های شکافت‌زنی قرار می‌گیرند[۱۶]. در کاربردهای صنعتی معمولاً ۳۰-۲۵ درصد حجمی عامل انرژی‌زا برای انرژی بخشیدن به سیالات شکافت‌زنی به کار می‌رود. افزودن عوامل انرژی‌زا به سیال شکافت‌زنی باعث می‌شود که حجم سیال تزریقی به چاه نیز به میزان قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یابد. سیالات پرانرژی، گزینه مناسبی برای شکافت‌زنی چاه‌های گاز تحت فشار به‌شمار می‌روند، به گونه‌ای که در اکثر چاه‌های گازی غرب کانادا، از این گروه از سیالات برای انجام عملیات شکافت هیدرولیکی استفاده شده است. چنانچه پیش‌تر اشاره شد، برای انرژی بخشیدن به سیالات شکافت‌زنی، می‌توان از N_2 یا CO_2 استفاده کرد. تفاوت‌های روشنی میان این دو عامل انرژی‌زا وجود دارد که در ادامه به آن‌ها خواهیم پرداخت.

در اکثر نقاط N_2 در مقایسه با CO_2 در دسترس‌تر بوده و قیمت آن نیز پایین‌تر است. N_2 گازی بی‌اثر است که با سازند ترکیب نمی‌شود. در نتیجه، هیچ‌گونه واکنش شیمیایی میان این عامل انرژی‌زا و سازند رخ نمی‌دهد. از آنجایی که چگالی N_2 در مقایسه با سیال شکافت‌زنی بسیار پایین‌تر است، می‌تواند به آسانی از سیال در حال نشست جدا شده و به سازند نفوذ کند. در نتیجه، بازیابی سریع سیالاتی که برای انرژی‌بخشی به آن‌ها از N_2 استفاده شده است، پس از اتمام عملیات پمپاژ امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. در غیر این صورت، نمی‌توان انرژی مورد نیاز جهت بازیابی سیال را فراهم



کرد. از آنجایی که N_2 در اکثر سیالات شکاف زنی نامحلول بوده و pH آن‌ها را تغییر نمی‌دهد، می‌تواند جهت انرژی بخشی به محدوده وسیعی از سیالات شکاف زنی مورد استفاده قرار گیرد. N_2 نیز مشابه گازهای دیگر، تحت فشارهای بالا شدیداً تغییر حجم می‌دهد، از این رو طراحی سیستمی که قابلیت کار کرد در شرایط مخزن را داشته باشد، کاری پیچیده و دشوار است.

از طرف دیگر، CO_2 تحت شرایط پمپ کردن به صورت مایع یا سیال فوق بحرانی^{۴۰} است. CO_2 در حالت فوق بحرانی از دما و فشاری بالاتر از دما و فشار نقطه بحرانی ترمودینامیکی CO_2 که به ترتیب برابر ۳۱.۱ و ۳۱.۱ درجه فارنهایت و ۱۰۷۰ پوند بر اینچ مربع است، برخوردار می‌باشد. سیال‌های فوق بحرانی قادرند همانند گازها در حفره‌ها نفوذ کنند، در حالی که چگالی آن‌ها برابر چگالی مایع است. CO_2 از لحاظ شیمیایی بسیار فعال بوده و از حلالیت بالایی در آب و روغن برخوردار است. انحلال CO_2 در آب منجر به تولید اسید کربنیک می‌شود که خود می‌تواند به عنوان یک عامل جداکننده عمل کرده و موجبات هیدرولیز گوار و مشتقات آن را فراهم سازد. چگالی دی‌اکسید کربن مایع و فوق بحرانی، نزدیک چگالی آب است؛ در نتیجه، چگالی سیال پراثری یا کف، کمتر از چگالی سیال پایه نیست. تا زمانی که سیال توسط اُفت فشار بازیابی شود، به صورت مایع یا سیال فوق بحرانی باقی‌مانده و هیچ‌گونه جدایش چگالی^{۴۱} در آن مشاهده نمی‌شود. سیال می‌تواند به مدت طولانی در چاه باقی‌مانده و حالت پراثری خود را حفظ نماید. از طرف دیگر، از آنجایی که سیالات پراثری می‌توانند در سیالات دیگر حل شوند، انرژی موجود در آن‌ها می‌تواند برای مدت طولانی ذخیره شود. با کاهش فشار، میزان گاز محلول در سیال نیز کاهش می‌یابد، زیرا حلالیت گازها در سیالات با کاهش فشار کاهش می‌یابد. همین پدیده باعث بازدهی مطلوب بازیابی سیال می‌شود.

CO_2 چه به صورت مایع و چه به صورت گازی به سازندها به ویژه سازنده چاه‌های گاز آسیمی وارد نمی‌کند. CO_2 معمولاً باعث رسوب آسفالتین یا پارافین^{۴۲} در نفت‌های سنگین می‌شود، معضلی که در چاه‌های گاز به هیچ‌وجه مشاهده نمی‌شود. CO_2 به دلیل طبیعت فعال خود نمی‌تواند در تمامی سیالات مورد استفاده گیرد؛ به عنوان مثال، سیالات بوراتی با CO_2 و سایر سیالات ویسکوالاستیک سازگاری ندارند. در محیط‌های اسیدی، CO_2 با تشکیل اسید کربنیک و کاهش pH، شرایط مورد نیاز برای باز شدن اتصالات عرضی و تخریب سیالات بوراتی را فراهم می‌کند. در سیالات ویسکوالاستیک خنثی شده توسط نمک، CO_2 با تأثیر روی نمک‌ها و تخریب ساختار میسل‌ها، گرانروی سیال را از بین می‌برد. از طرفی، چنانچه پیش‌تر

اشاره شد، CO_2 با تمامی سیالات پایه روغنی سازگاری ندارد؛ به عنوان مثال، سیستم‌های استری فسفات آلومینیوم در حضور اسید کربنیک با pH پایین تخریب می‌شوند.

۴- کف‌ها و امولسیون‌ها^{۴۳}

سیالات دوفازی که گرانروی بالای آن‌ها از ادغام شدن فاز دوم در زمینه ناشی می‌شود، تحت عنوان کف‌ها و امولسیون‌ها شناخته می‌شوند. در صورتی که کیفیت سیال از ۵۳ درصد بالاتر باشد (یعنی کسر حجمی گاز در سیال بالاتر از ۵۳ درصد باشد) در اثر تداخل^{۴۴} حباب به حباب، گرانروی سیال با افزایش کیفیت آن تا ۹۰ درصد، به صورت نمایی افزایش می‌یابد. این درحالی است که در سیالاتی با کیفیت بالاتر از ۹۰ درصد با شروع پدیده مه‌شدگی^{۴۵}، گرانروی سیال به شدت کاهش می‌یابد. به منظور کاهش اصطکاک ناشی از گرانروی بالا، معمولاً در صنعت، از کف‌ها و امولسیون‌هایی با نسبت گاز به سیال (کیفیت) در محدوده ۸۰-۷۰ استفاده می‌شود.

کف‌ها در اثر ادغام فاز دوم در سیالات غیر-مایع^{۴۶} و امولسیون‌ها در اثر ادغام فاز دوم در زمینه مایع حاصل می‌شوند. طبق تعریف، تمامی سیالات CO_2 با کیفیت بالاتر از ۵۳ درصد در گروه امولسیون‌ها قرار می‌گیرند. زمانی که عملیات پمپاژ متوقف شده و سیال شکاف زنی CO_2 بازیابی می‌گردد، به صورت کف از چاه خارج می‌شود. از این رو، این گروه از سیالات در صنعت، کف نامیده می‌شوند. کف‌ها با افزودن عوامل شیمیایی کف‌کننده^{۴۷} و یک ژل پایه، پایدار می‌شوند. با توجه به ملاحظات اقتصادی، گوار متداول‌ترین ژلی است که برای پایدارسازی کف‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

علاوه بر کف‌های پایه N_2 و CO_2 ، کف‌های دوتایی^{۴۸} نیز در سال ۱۹۸۸ به بازار مصرف ارائه شدند. کف‌های دوتایی که حاوی N_2 و CO_2 هستند، در مقایسه با کف‌های N_2 و CO_2 از خواص و عملکرد مطلوب‌تری برخوردارند. مهم‌ترین مزیت سیالات یاد شده بر کف‌های CO_2 این است که غلظت CO_2 در سیالات بازیابی شده بسیار پایین است؛ در نتیجه، می‌توان حجم بالاتری از گاز تولیدی را بدون فیلتر کردن^{۴۹} وارد خطوط انتقال نمود. هر چند N_2 در مقایسه با CO_2 ارزان‌تر است، ولی انجام کارهای طراحی^{۵۰} با استفاده از سیالات تراکم‌پذیر^{۵۱} که احتمال تغییر فاز آن‌ها در حین عملیات وجود دارد، بسیار دشوار و پیچیده خواهد بود [۱۷].

گرانروی بالای کف‌ها، امکان کنترل هرزروی سیالات شکاف زنی را افزایش می‌دهد. از آنجایی که این گروه از سیالات تراکم‌پذیرند، در شکاف زنی چاه‌های گاز با شکاف‌های طبیعی و نفوذپذیری بالا کاربرد دارند. کف‌ها و امولسیون‌ها برای شکاف زنی

مورد نیاز است. استفاده از سیال ویسکوالاستیک دمای بالا توسط شرکت شلمبرژر پس از انجام کلیه مراحل مطالعاتی، آزمایشگاهی، تست میدانی و انجام عملیات در میدان، با موفقیت کامل انجام شد. مورد مطالعه دوم؛ استفاده از نوعی از سیال شکاف زنی در شمال شرقی وایومینگ در بستر بیگ هورن.

در این منطقه، افزایش قابل توجه تولید نفت در چندین میدان به کمک سیالات شکاف زنی و فناوری های ایجاد شکاف انجام گرفته است. یکی از آخرین تجارب در این منطقه، استفاده از سیال خاص "سورفکتانت پایه ویسکوالاستیک غیر پلیمری" است که نتایج قابل قبولی را به همراه داشته است.

نتیجه گیری

در این مطالعه، انواع مختلف سیالات شکاف هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت و اهمیت و کاربرد هر کدام ارائه شد. انواع مختلف این سیالات، بسته به شرایط مخزن، باید با دقت لازم انتخاب و مورد استفاده قرار گیرند. سیالات متداول پایه آبی، پایه روغنی، سیالات پرانرژی، کف ها و امولسیون ها در این مقاله بررسی شدند که می توان به طور خلاصه نکات زیر را در استفاده از این سیالات بیان نمود:

- سازگاری با سازندهای رُسی را می توان با افزودن نمک ها به سیالات شکاف زنی کنترل کرد. از طرف دیگر، بسته به شیوه تزریق سیال به چاه و نیروی برشی وارد بر آن، باید از سیالات مقاوم در برابر برش^{۵۵} یا با قابلیت بازیابی برشی^{۵۶} استفاده کرد. در کاربردهای دمای بالا، این موارد با به کارگیری سیالات شبکه ای پایه آبی بوراتی یا اورگانومتالی^{۵۷} و یا سیالات شبکه ای پایه روغنی حاصل می شود. در سازندهای گازی تحت فشار می توان با استفاده از N_2 یا CO_2 به سیال انرژی بخشید یا با استفاده از هریک از این گازها و همچنین، ترکیبی از آن ها، سیال را به کف تبدیل کرد. کف ها در مقایسه با دیگر سیالات شکاف زنی از خواص کنترل نشتی مطلوب تری برخوردارند؛ به عبارت دیگر، در صورت استفاده از کف ها به عنوان سیال شکاف زنی، می توان به راحتی نشتی سیال را کنترل کرد.

- در مواردی که سازگاری با آب مورد نیاز باشد، می توان از سیالات سورفکتانتی ویسکوالاستیک استفاده کرد. این گروه از سیالات، تراکم پروپانت ها را تحت تأثیر قرار نمی دهند. از طرف دیگر، می توان این سیالات را نیز مانند سیالات پایه آبی و پایه روغنی انرژی بخشیده یا به کف تبدیل کرد. اگر ناسازگاری سیال شکاف زنی با سازند از نیروی موئینگی و عدم بار گذاری ناشی شود، می توان از سیالات حاوی متانول استفاده کرد. در صورتی که ناسازگاری سیال با سازند بسیار شدید باشد، می توان با استفاده از سیالات پایه آبی شبکه ای یا

چاه های متان بستر زغالی با کیلیت های اتصال یافته^{۵۲} نیز گزینه مناسبی به شمار می روند. از طرف دیگر، این گروه از سیالات جهت شکاف زنی سازندهای سازگار با آب های حاشیه ای^{۵۳} و سازندهایی که به عبوردهی پروپانت بالایی نیاز دارند، با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته اند. ضریب اصطکاک کف ها در مقایسه با سایر سیالات شکاف زنی به ویژه سیالات شبکه ای تأخیری بالاتر است. از سوی دیگر، از آنجایی که CO_2 و N_2 معمولاً در سر چاه تزریق می شوند، در حالی که تزریق پروپانت ها در لوله مغزی انجام می گیرد، حداکثر میزان پروپانت انتقالی توسط این سیالات به داخل چاه کاهش می یابد. گرانروی کف ها را می توان با تغییر گرانروی ژل پایه و کیفیت سیال تنظیم کرد. پروپانت ها معمولاً به عنوان جزئی از فاز پایه در نظر گرفته می شوند؛ در نتیجه، به منظور ثابت نگه داشتن کیفیت سیال در طول فرآیند، لازم است میزان CO_2 یا N_2 تزریقی به سیال با افزایش غلظت پروپانت ها در فاز پایه افزایش یابد.

چنانچه پیش تر اشاره شد، با افزایش کیفیت سیال شکاف زنی، گرانروی آن به صورت نمایی افزایش می یابد. در صورتی که سیال شکاف زنی با کیفیت سطحی ثابت داخل چاه تزریق شود، با افزایش کسر حجمی پروپانت در فاز پایه، گرانروی و در نتیجه، ضریب اصطکاک سیال به میزان قابل ملاحظه ای افزایش می یابد.

عوامل ژل ساز موجود در کف های شکاف زنی می توانند در حضور آنزیم ها یا عوامل اکسندة تخریب شده و آسیب های جبران ناپذیری به سازند و پیک پروپانت وارد سازند. یکی از مشکلات احتمالی به کارگیری کف ها جهت شکاف زنی این است که سیال بازیابی شده می تواند به صورت کف از چاه خارج شده و آسیب های جبران ناپذیری به تجهیزات سطحی وارد سازد. برای غلبه بر این مشکل می توان از کف سازهای جداشونده^{۵۴} که قابلیت کف سازی خود را با رسیدن به سطح از دست می دهند، استفاده کرد [۱۸].

۵- مطالعه موردی

استفاده از سیالات شکاف هیدرولیکی تاکنون در مناطق مختلف جهان مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج قابل قبولی داشته است. دو مطالعه موردی که در زیر اشاره می شود، از آن دسته اند:

مورد مطالعه اول؛ آزمایش موفقیت آمیز سیال شکاف هیدرولیکی از نوع سورفکتانت ویسکوالاستیک دمای بالا در چاه های پاتاگونین در سن جورج.

بستر سن جورج یک سازند چندلایه و با عمر نسبتاً بالاست که طبق بررسی ها و مطالعات مخزنی صورت گرفته در این بستر، انجام عملیات شکاف زنی برای رساندن تولید نفت به سطح اقتصادی قابل قبول



افزودن پلیمر ممکن است تأثیری بر گرانروی سیال شبکه‌ای نداشته باشد. به عبارت دیگر، ممکن است سیالی که پلیمر کمتری دارد، گرانروی بالاتری از سیالی با پلیمر بیشتر داشته باشد.

سیالات پایه دی‌اکسید کربن مایع بر مشکل غلبه کرد. روشن است که سیالات شکاف‌زنی مختلف از خواص رئولوژیکی متفاوتی برخوردارند که باید پیش از انتخاب سیال در نظر گرفته شوند.

پانویس‌ها

- | | | |
|--|---|---|
| 1. Energized | 21. Temperature-Delayed | 41. Density segregation |
| 2. Foams | 22. Dual-Crosslinked | 42. Paraffin |
| 3. Liquid CO ₂ Based Fluids | 23. Breaker | 43. Emulsions |
| 4. Lithology | 24. Oxidizers | 44. Interference |
| 5. Swelling | 25. Encapsulated Oxidizers | 45. Misting |
| 6. Adverse Saturation | 26. Deviated Wells | 46. Non-Liquid |
| 7. Batch-Mix | 27. Coalbed | 47. Chemical Foaming Agent |
| 8. Continuous-Mix | 28. Irreducible water saturation | 48. Binary Foams |
| 9. Guar | 29. Tortuosity | 49. Flaring |
| 10. Hydration | 30. Associative | 50. Designing Jobs |
| 11. Residue | 31. Alkaline Metals | 51. Compressible Fluids |
| 12. Oil-External | 32. Napalm | 52. Interconnected Cleats |
| 13. Built in Inverter | 33. Kerosene | 53. Marginal Water |
| 14. Crosslinked Fluids | 34. Gellant | 54. SplittableFoamers |
| 15. Pounds Per Thousand Gallons | 35. Colloid Dispersions | 55. Shear-tolerant |
| 16. Borate Ester Crosslinker | 36. Micelles | 56. Shear-recoverable |
| 17. Carboxylated | 37. Pseudo-plastic | 57. Organometallic or Borate Crosslinked Water-Based Fluids |
| 18. Mono Borate | 38. Metal Salts of Alkyl Acid Orthophosphate Esters | |
| 19. Chelated | 39. Select Crudes | |
| 20. Crosslink Time | 40. Supercritical Fluid | |

منابع

- [1] Economides, M. J., Martin, T.: "Modern Fracturing: Enhancing Natural Gas Production", Energy Tribune Publishing Inc., Houston, TX, 2007.
- [2] Asadi, M., Conway, M.W., and Barree, R. D.: "Zero Shear Viscosity Determination of Fracturing Fluids: An Essential Parameter InProppant Transport Characterizations," paper SPE 73755, 2002.
- [3] Brannon, H.D., and Ault, M.G.: "New, Delayed Borate-Crosslinked Fluid Provides Improved Fracture Conductivity in High-Temperature Applications," paper SPE 22838, 1991.
- [4] Wang, X., Qu, Q., McCarthy, S., Null, J., Bowen, K., and Neumann, L.: "Successful Applications of Borate Crosslinked Fracturing Fluids at High Temperature," paper SPE 73789, 2002.
- [5] Carman, P.C.: Private Communication, 2007.
- [6] Cawiezel, K.E., Wheeler, R.S., and Vaughn, D.R.: "Specific Fluid Requirements for Successful Coiled Tubing Fracturing Applications," paper SPE 86481, 2004.
- [7] Craigie, L.J.: "A New Method for Determining the Rheology of Crosslinked Fracturing Fluids using Shear History Simulator," paper SPE 11635, 1983.
- [8] Carman, P.C., and Cawiezel, K.: "Successful Breaker Optimization for Polyacrylamide Friction Reducers Used in Slickwater Fracturing," paper SPE 106162, 2007.
- [9] Wright, T.B., Cipolla, C., Perry, K.F., and Cleary, M.P.: "Identification and Comparison of True Net Fracturing Pressures Generated by Pumping Fluids with Different Rheology into the Same Formations," paper SPE 26153, 1993.
- [10] Ely, J.W., Hargrove, J.S., Wolter, B.C., and Kromer, J.C.: "Pipelining: Viscous Fingering Prop Fracture Technique Finds Wide Success in Permian and Delaware Basins," paper SPE 26528, 1993.
- [11] Grantham, C.K., and McLaurine, H.C.: "Thixotropy Without Viscosity: A new Approach to Rheology Control of Oil Muds," paper SPE 15415, 1986.
- [12] Smith, K.W., and Persinski, L.J.: "Hydrocarbon Gels useful in Formation Fracturing," U.S. Patent No. 5,471,287, 1995.
- [13] Smith, K.W., and Persinski, L.J.: "Hydrocarbon Gels useful in Formation Fracturing," U.S. Patent No. 5,571,315, 1996.
- [14] Smith, K.W., and Persinski, L.J.: "Hydrocarbon Gels useful in Formation Fracturing," U.S. Patent No. 5,614,010, 1997a.
- [15] Gupta, D.V.S., and Leshchynshyn, T.T.: "CO₂ Energized Hydrocarbon Fracturing Fluid: History & Field Application in Tight Gas Wells in the Rock Creek Gas Formation," paper SPE 95061, 2005a.
- [16] Mitchell, B.J.: "Viscosity of Foam," Ph.D. Thesis, University of Oklahoma, 1969.
- [17] Toney, F.L., and Mack, D.J.: "The Next Generation of Foam: A Field Study of Northwestern Oklahoma Foam Fracturing," paper SPE 21644, 1991.
- [18] Gupta, D.V.S., Hlidek, B.T., Hill, E.S.W., and Dinsa, H.S.: "Fracturing Fluid for Low-Permeability Gas Reservoirs: Emulsion of Carbon Dioxide With Aqueous Methanol Base Fluid: Chemistry and Applications," paper SPE 106304, 2007.