

بررسی عملیات لایه‌شکافی در سازند سن اندرس مشابه سازند بنگستان

مهدی زینلی حسوندد*، پژوهشگاه صنعت نفت ■ مهدی طیب‌نژاد عزیز، دانشگاه صنعت نفت

چکیده

عملیات لایه‌شکافی، سابقه‌ای بیش از ۷۰ سال در دنیا دارد. لذا کسب اطلاعات و مستندسازی دانش عملیاتی در سازندهای مشابه با سازندهای کشور ضروری و ارزشمند است. با توجه به خصوصیات سنگ و سیال مخازن بنگستانی کشور، این مخازن یکی از کاندیدهای مناسب لایه‌شکافی در کشورمان است. مطالعات نشان می‌دهد بیشترین تلاش برای لایه‌شکافی در کشور در این سازند انجام شده است. نظر به این اهمیت، در این مطالعه تجربی عملیات‌های مختلف لایه‌شکافی در سازند سن اندرس آمریکا که شباهت مناسبی از نظر سنگ‌شناسی و تراوایی با سازند بنگستان ایران دارد، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۹/۰۵/۰۸

تاریخ ارسال به داور: ۹۹/۰۵/۱۲

تاریخ پذیرش داور: ۹۹/۰۷/۱۳

واژگان کلیدی:

لایه‌شکافی، سازند سن اندرس، سازند بنگستان، کربناته غیرشکافدار.

مقدمه

برداشت پایین سبب شده است تا عملیات لایه‌شکافی جزو اولین پیشنهادها برای بهبود جریان یا ازدیاد برداشت در این مخازن باشد. دلیل اصلی آن افزایش ضریب بهره‌دهی یا تزریق‌پذیری چاه است که امکان تولید با دبی بالاتر یا فشار کمتری از مخزن را به وجود می‌آورد. در مخازن با تراوایی کم مانند بنگستان استفاده از روش تزریق آب به دلیل تزریق‌پذیری کم چاه نیازمند استفاده از پمپ‌های با توان و فشار کاری بالاتر است. همچنین تزریق گاز به دلیل ایجاد رسوبات آلی به شدت تراوایی مخزن را کاهش می‌دهد. لذا در صورت تایید روش ازدیاد برداشت آب یا گاز، نیاز به انجام عملیات لایه‌شکافی در چاه‌های تزریقی ضروری است. نکته‌ی قابل توجه این است که فناوری لایه‌شکافی هم به عنوان یک راه‌حل و هم به عنوان لازمه‌ی اجرای سایر روش‌های ازدیاد برداشت و نگهداشت تولید در میدان بنگستان اهواز ضروری است. نظر به اهمیت اجرای لایه‌شکافی در مخازن موجود در سازند بنگستان، مطالعه‌ی تجربه‌های جهانی در اجرای عملیات لایه‌شکافی در سازندهای مشابه کربناته با تراوایی پایین می‌تواند الگویی مناسب در اختیار مهندسين ایرانی قرار دهد. در این مطالعه مخزن سن اندرس که از نظر تراوایی، تخلخل، جنس سنگ و حجم مخزن شباهت مناسبی با مخازن کشور در سازند بنگستان دارد، بررسی شده است.

معرفی سازند سن اندرس

سن اندرس یکی از سازندهای کربناته در گستره‌ی وسیعی از ایالت‌های تگزاس و نیومکزیکو است. سن اندرس یکی از سازندهای اصلی حوزه‌ی پرمین و تشکیل شده از تناوبی از سنگ‌های تبخیری و کربناته و ناشی از پایین رفتن سطح دریا در آب و هوای خشک است. بسیاری از مخازن تولیدی

حدود ۸۵ درصد ذخایر نفتی و ۹۰ درصد ذخایر گازی ایران و همچنین ۴۹ درصد ذخایر نفت جهان و ۵۵ درصد گاز جهان در سنگ‌های کربناته تجمع کرده‌اند. در این خصوص ویلسون (۱۹۸۰) معتقد است حدود ۲۶۰ میدان عظیم نفتی کربناته وجود دارد که ۷۵ درصد ذخایر قابل استحصال جهانی را در بر گرفته است. مبتنی بر تعداد مخازن و بدون توجه به حجم هیدروکربورها، تقریباً ۹۰ درصد مخازن بزرگ ایران، کربناته و ۱۰ درصد ماسه‌سنگی هستند. از این تعداد، ۵۳ درصد مخازن بزرگ نفتی و ۴۷ درصد آن گازی است. به نظر می‌رسد از لحاظ حجم هیدروکربوری نیز نسبت مخازن کربناته به ماسه‌سنگی تقریباً ۹ به ۱ صادق باشد. مخازن اهواز، نوروز، فریدون، ابودر، فروزان، ساختار B، سروس از مخازن بزرگ ماسه‌سنگی و برخی از مشهورترین مخازن بزرگ کربناته شامل میدان پارس جنوبی، آزادگان، آسماری، هفت کل، بی‌بی حکیمه و خانگیران هستند.

مخازن کربناته به تفکیک گروه‌های مختلف زمین‌شناسی شامل گروه دهرم، خامی، آسماری و بنگستان می‌باشد. گروه بنگستان نام گروهی از سازندهای زمین‌شناسی حوضه‌ی زاگرس با سن آلبین تا کامپانین است که شامل یک چرخه‌ی رسوبی از سازندهای کژدمی، سروک، سورگه و ایلام است. مجموعه‌ی این سازندها گروه بنگستان نام گرفته‌اند که نام آن از کوه بنگستان در شمال بهبهان گرفته شده است.

میانگین تخلخل سنگ مخزن گروه بنگستان از ۲ درصد (در میدان نفتی شوروم) تا ۱۴ درصد (در میدان نفتی جفیر) متغیر است. تراوایی این سازند به صورت عمده حدود ۲ میلی‌داریسی است و از نظر سنگ‌شناسی از کربناته‌ی دولومیتی^۱ و لایم‌استون^۲ تشکیل شده است. درصد برداشت از این سازند به دلیل تراوایی پایین و ناهمگونی بالای آن کمتر از ۱۰ درصد است. این ضریب

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (hasanvandm@ripi.ir)

درس آموخته‌های عملیات‌های لایه‌شکافی صورت گرفته در سازند سن آندرس

از آنجا که صدها عملیات لایه‌شکافی در دهه‌ها مخزن که از سازند سن آندرس تولید می‌کنند، انجام شده است لذا جمع‌بندی عملیات لایه‌شکافی در این مخزن کار آسانی نیست. به همین منظور به ارائه گزارشی از تحقیقات انجام شده در منابع مختلف پرداخته شده است.

کارلسن و سیپک در ۱۹۶۵ وضعیت لایه‌شکافی در یکی از مخزن حوزه‌ی شمالی که از سازند سن آندرس تولید می‌کند را بررسی کردند. [۲] نتایج مطالعات تغییرات تخلخل در مغزه‌های کامل (خروجی از لاگ) و مطالعات پلاگ (در آزمایشگاه) نشان می‌داد که روند تغییرات تخلخل از هر دو منبع یکسان است و میانگین تخلخل مغزه کامل ۱۱٫۶ و پلاگ ۱۳٫۴ درصد است. تراوایی میانگین در این مخزن ۲٫۷ میلی‌داری است. با وجود تراوایی پایین در این مخزن، عملیات تزریق آب در سال ۱۹۶۳ با ایجاد دو پایلوت پنج نقطه با دبی تزریق ۱۰۰۰ بشکه در روز انجام می‌شود.

میزان تولید از مخزن تا ۱۹۶۴ حدود ۱٫۵ میلیارد بشکه بوده است که معادل ۴ درصد از تولید این مخزن بوده است. نفت تولیدی از این مخزن جزو نفت‌های سبک با درجه‌ی سنگینی API ۳۳ از عمق ۵۵۴۴ تا ۵۵۷۴ فوتی تولید می‌شود. در سال ۱۹۶۲ تعداد ۱۲۸ چاه تولیدی در این مخزن وجود داشت و در عملیات‌های لایه‌شکافی به طور متداول ۱۵ تا ۲۰ فوت مشبک‌کاری و ۵۰۰۰ گالن اسید استفاده می‌شود.

در این مخزن به دلیل فشار پایین، از پمپ برای فراآوری مصنوعی استفاده می‌شود و دبی میانگین چاه‌ها ۱۴۰ ب.ر. است. فشار حباب سیال ۸۲۵ پام و دمای مخزن ۱۰۶ درجه‌ی فارنهایت و نسبت گاز به نفت ۳۶۱ فوت مکعب استاندارد بر بشکه است. فشار اولیه‌ی مخزن ۲۰۰۰ پام و جنس سنگ مخزن کربناته‌ی لایماستون و دولومیت است. ناحیه‌ی تولیدی دارای ۴۵ فوت ضخامت است ولی ناحیه‌ی گذرای مخزن حدود ۹۰ فوت ضخامت دارد. اطلاعات ارائه شده در مطالعات کارلسن و سیپک تصویر کلی از سازند سن آندرس نیز هست. در این سازند تعداد بسیار زیادی عملیات تحریک چاه در سه دسته لایه‌شکافی با آب و پروپانت، با اسید و اسیدکاری صورت گرفته است. لذا می‌تواند یکی از بهترین مطالعات موردی برای الگوبرداری در مخزن مشابه باشد.

بلک و استاب در ۱۹۷۵ سه دسته عملیات شکاف هیدرولیکی، اسیدکاری و شکاف اسیدی در سازند سن آندرس را در ۵ میدان و ۲۵ چاه مختلف بررسی کردند. [۳] نتایج آزمایش هدررفت سیال نشان می‌دهد برای سنگ نوع ریف ۲۵ تا ۵۰ پوند افزایش به ۱۰۰۰ گالن سیال آبی یا روغنی برای کنترل هرزروی^۴ نیاز است. برای سیال اسیدی مقدار افزایش ۲۰۰ پوند به ازای ۱۰۰۰ گالن سیال خواهد بود. نتایج آزمایش هدررفت سیال نشان می‌دهد برای سنگ نوع بکرید ۲۵ پوند افزایش به ۱۰۰۰ گالن سیال آبی یا روغنی برای

نفت آمریکا از این سازند تولید می‌کنند. در بسیاری از مقالات و گزارش‌های صنعتی از عنوان مخزن سن آندرس برای این سازند استفاده شده است که با توجه به گستره‌ی وسیع این سازند باید به موقعیت جغرافیایی آن مخزن دقت داشت.

این سازند در نقاط مختلف بین ۱۵۰۰ تا ۶۰۰۰ فوت عمق دارد و ضخامت سازند بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ فوت متغیر است. [۱] سه نوع سنگ در سازند وجود دارد که شامل: ریف، بکرید و لاگون است.

ریف دارای تراوایی بین ۴ تا ۳۲ میلی‌داری، تخلخل ۱۰ تا ۱۸ درصد، اندازه‌ی دانه بزرگ‌تر از ۱۰۰ میکرون و انحلال ۸۵ درصدی در اسید هیدروکلریک است. بکرید دارای تراوایی بین ۰٫۱ تا ۳ میلی‌داری، تخلخل ۴ تا ۱۰ درصد، اندازه‌ی دانه ۱۰ تا ۲۵۰ میکرون و انحلال ۷۵ درصدی در اسید هیدروکلریک است. با توجه به تراوایی، تخلخل و همچنین جنس سنگ، باید دقت شود که وضعیت سنگ مخزن بنگستان اهواز مشابه سنگ بکرید سازند سن آندرس است. لاگون دارای تراوایی کمتر از ۰٫۱ میلی‌داری، تخلخل کم، اندازه‌ی دانه کمتر از ۱۰ میکرون است.

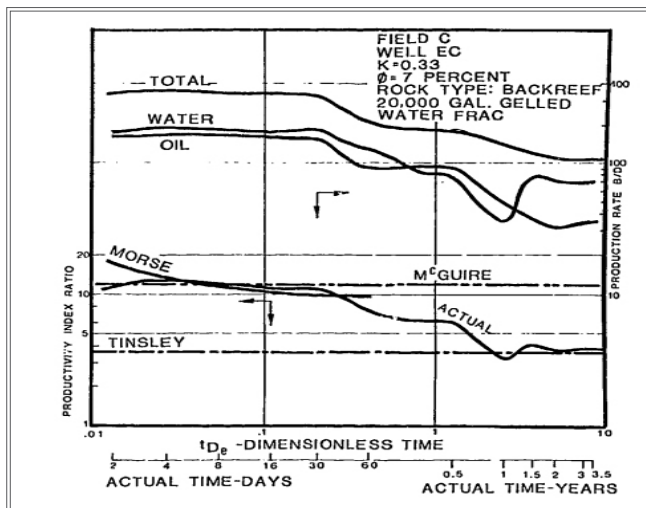
در برخی مخازن موجود در این سازند تخلخل آن در محدوده‌ی ۷ تا ۱۶ درصد و میانگین این تخلخل حدود ۱۱٫۶ گزارش شده است. از طرفی تراوایی این سازند متغیر است و بین ۰٫۱ تا ۵۰ میلی‌داری در منابع مختلف گزارش شده است. این مقدار در مخازن مختلف متفاوت است. دبی تولیدی از چاه‌های این سازند اغلب پایین است. این دبی به ندرت از ۲۰۰ بشکه در روز بیشتر می‌شود و معمولاً حدود ۵۰ تا ۱۰۰ بشکه در روز گزارش شده است. در جدول ۱ عمده تشابه‌ها و تفاوت‌های سازند بنگستان و سن آندرس ارائه شده است.

۱ | مقایسه‌ی تشابه‌ها و تفاوت‌های سازند بنگستان و سن آندرس

تفاوت‌ها			تشابه‌ها		
بنگستان	سن آندرس	ویژگی	بنگستان	سن آندرس	ویژگی
۱۰۰۰۰-۱۱۰۰۰	۱۵۰۰-۶۰۰۰ فوت	عمق سازند	۸-۱۶ درصد	۷-۱۶ درصد	دامنه‌ی تخلخل
۲۳۰	۱۰۵ درجه فارنهایت	دما	۰٫۲-۲ میلی‌داری	۰٫۱-۳ میلی‌داری	دامنه‌ی تراوایی
۶۰۰۰	پام ۲۰۰۰	فشار	کربناته‌ی دولومیت و لایم استون	کربناته‌ی دولومیت و لایم استون	جنس سنگ
۲۰۰۰-۷۵۰ ب.ر	۵۰-۱۰۰ ب.ر	دبی تولیدی چاه	-	-	-
بیش از ۱۰۰۰۰ پام	۴۴۰۰ پام	فشار شکست سازند	-	-	-
بیش از ۸۰۰۰ پام	بیش از ۲۰۰۰ پام	تنش درجای سنگ	-	-	-

فوت بشود. این موضوع ممکن است سبب تولید آب شده باشد. در واقع استفاده از دبی بالاتر سبب گسترش شکاف در ناحیه‌های خارج از ضخامت مخزنی شده است.

چاه EC: در این چاه لایه‌شکافی با استفاده از آب و پروپانت (شن) انجام شد. در این چاه نسبت شاخص بهره‌دهی نظری از نمودارهای مورس و مک‌گویر با مقدار واقعی بعد از عملیات نزدیک بود. این تشابه در محدوده‌ی جریان پایا نیز حفظ شد. در این ناحیه شاخص بهره‌دهی ۳٫۹ برابر برای ۳٫۵ سال بعد از عملیات بود. مقدار تخمینی دبی از نمودار تینسلی ۳٫۷ برابر برای این ناحیه بود. در این چاه عملیات با استفاده از ۲۰ هزار گالن آب ژل‌دار و ۲۷۳ گونی ماسه ۴۰-۲۰ با دبی پمپ ۸ بشکه بر دقیقه در ضخامت مخزنی ۸۴ فوتی انجام شد. اطلاعات عملیات این چاه می‌تواند الگوی اجرای عملیات در چاه‌های مشابه باشد. (شکل ۱)



شکل ۱ | نمودار تغییرات دبی نفت، آب و ضریب بهره‌دهی در چاه EC

چاه OS: این چاه مثالی از سنگ‌های نوع ریف است. ابتدا یک عملیات اسیدکاری با ۵۲۵۰ گالن اسید ۱۵ درصد HCl انجام شده و سپس عملیات شکاف اسیدی با ۸۰۰۰ گالن با اسید معلق ساز انجام شده است. نتایج نظری و واقعی شبیه به هم هستند. طول شکاف کم ۲۹ فوتی در دو عملیات نشان می‌دهد در حالی که تراوایی مخزن زیاد است (بیش از ۱۰ میلی‌داریسی) نیازی به افزایش طول شکاف یا حجم تزریق نیست. در این چاه تا ۱٫۵ سال بعد از عملیات، تولید ۲ برابر ماند و بعد از ۳ سال این نسبت ۱٫۷ برابر بود. بعد از ۶ ماه از عملیات نیز پاسخ جریان ظاهر شد.

چاه VS: در این چاه بهره‌دهی واقعی بیشتر از تخمین اولیه است. این اتفاق به دلیل وجود آسیب‌سازندگی غیرعادی در چاه است. این چاه دارای سنگ از جنس ریف با تراوایی ۲ میلی‌داریسی و تخلخل ۹ درصدی است.

چاه XC: نمونه‌ای از عملیات لایه‌شکافی اسیدی است که در آن با دبی پایین

کنترل هرزروی نیاز است. برای سیال اسیدی مقدار افزایه بین ۵۰ تا ۲۰۰ پوند به ازای ۱۰۰۰ گالن سیال خواهد بود.

در ریف به دلیل تراوایی بالا از ماسه به عنوان پروپانت استفاده می‌شود (لایه‌شکافی با آب و پروپانت)، اما در بک‌ریف از اسید بدون پروپانت استفاده شده است (لایه‌شکافی اسیدی). در سازندهای تراوا این ناحیه هدایت‌پذیری^۵ شکاف با افزایش طول شکاف افزایش زیادی نمی‌یابد. اما در سازندهای با تراوایی کم مانند بک‌ریف نقش طول شکاف در افزایش هدایت‌پذیری شکاف بسیار مهمتر است. (نکته‌ی قابل توجه در بنگستان اهواز)

نتایج عملیات‌های اسیدکاری نشان می‌دهد که تزریق اسید در ریف‌ها با موفقیت سبب افزایش شاخص بهره‌دهی شده است اما در بک‌ریف‌های کربناته اسید نقش مناسبی نداشته است. (احتمالاً به دلیل استفاده از HCl به جای HF) مشکل دیگری که در عملیات اسیدکاری رخ می‌دهد تولید ذرات ریز یا فاین است. عمده‌ی فاین‌های تولیدی بعد از اسیدکاری از کوارتز، فلدسپار، دولومیت و انیدریت تشکیل شده است. این ذرات در هر سه نوع سنگ مخزن به میزان قابل توجه تشکیل می‌شود.

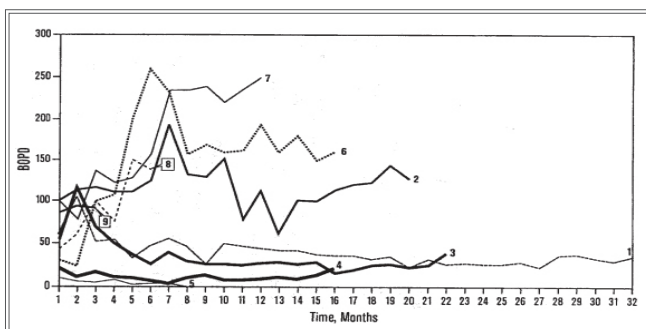
در عملیات‌های لایه‌شکافی این مخزن ارتفاع شکاف پس از عملیات از طریق نمودارگیری دما، اندازه‌گیری می‌شود. علت آن گرماده بودن واکنش اسیدسنگ است که سبب تغییرات دمایی در طول چاه می‌شود. همچنین طول شکاف از طریق مدل‌سازی کامپیوتری محاسبه می‌شود. ظرفیت جریان شکاف و ضریب هرزروی سیال از طریق آزمایشگاه و نوع سنگ اندازه‌گیری می‌شود. مدول الاستیسیته و تراوایی نیز از آزمایشگاه و اندازه‌گیری مغزه تعیین می‌شود و در نهایت تخلخل بر اساس داده‌های مغزه و نمودارهای لاگ محاسبه می‌شود.

در ادامه به بررسی نتایج عملیات لایه‌شکافی در چند چاه از ۲۵ چاه مورد مطالعه در این مخزن می‌پردازیم. دقت شود که هر یک از سناریوهای رخ داده در این چاه‌ها امکان وقوع در مخازن مشابه را دارد.

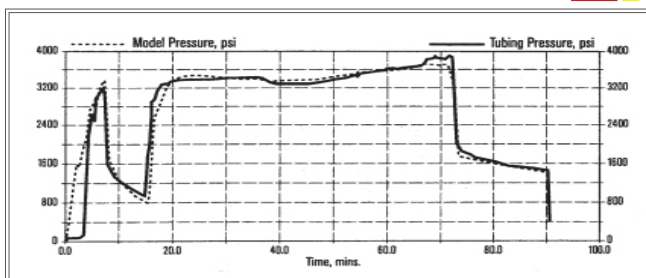
چاه AW: در این چاه لایه‌شکافی با استفاده از آب و پروپانت (شن) انجام شد. در این چاه نسبت شاخص بهره‌دهی نظری با مقدار واقعی بعد از عملیات بسیار نزدیک بوده است. اما بعد از ۷ روز از اجرای عملیات یک افت تولید سریع به همراه افزایش نسبت آب به نفت رخ داده است. بعد از دو ماه چاه به دبی اصلی خود قبل از عملیات برگشت. این نتایج ضعیف در اثر دو عامل رخ داده است:

الف) در مرحله‌ی آخر ۲۲۵۰۰ گالن سیال با ۱۲۰ گونی^۶ شن ۲۰-۱۰ در لوله‌ی جداری مانده است. این عامل ممکن است سبب کاهش طول شکاف نسبت به طول برنامه‌ریزی شده باشد.

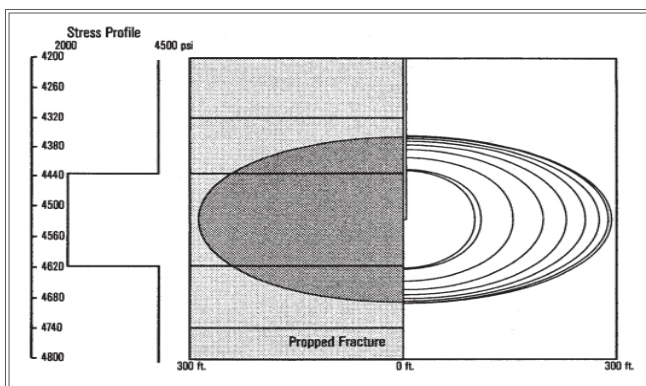
ب) دبی پمپ برابر با ۱۲ بشکه بر دقیقه^۷ ممکن است برای محدوده‌ی مشبک‌کاری شده‌ی ۳۲ فوتی زیاد باشد و سبب ایجاد شکاف با ارتفاع ۱۲۰



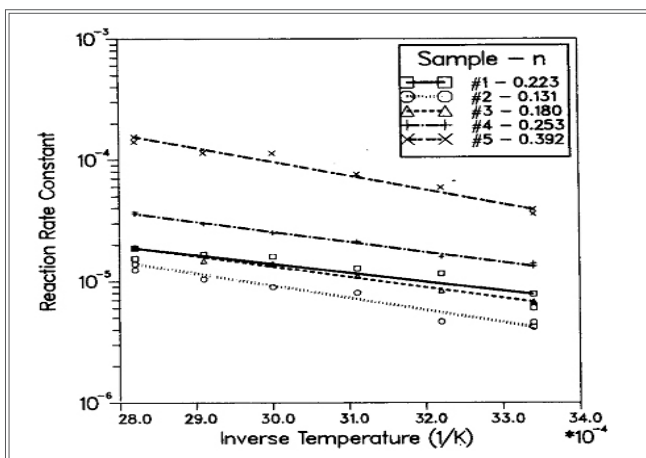
شکل ۲ | نمودار تغییرات دبی در ۹ چاه از چاه‌های مخزن سن‌آندرسن طی لایه‌شکافی



شکل ۳ | نمودار فشار جریان چاه طی یک عملیات لایه‌شکافی



شکل ۴ | هندسه‌ی شکاف و تغییرات تنش در جای سازند



شکل ۵ | ثابت‌های واکنش اسید و سنگ مخزن سن‌آندرسن بر اساس آزمایش دیسک دوار

۴،۱ بشکه در روز ۵۲۵۰ گالن اسید ۲۰ درصد HCl تزریق شده است. پیش از این نیز ۸۲۵۰ گالن امولسیون ویسکوز تزریق شده بود. در نتیجه عملیات دبی تولیدی پایدار ۵۰ بشکه بر روز به همراه کاهش تولید آب از ۹۷ به ۱۵ بشکه در روز برای ۲ سال رخ داد.

مارتینز و همکاران در سال ۱۹۹۴ با مطالعه‌ی عملیات لایه‌شکافی در یکی دیگر از مخازن واقع در سازند سن‌آندرسن در ایالت نیومکزیکو نشان دادند که این روش تحریک چاه موفقیت‌آمیز بوده است. شکل ۲ دبی تولیدی ۹ چاه این مخزن را به تفکیک نشان می‌دهد.

چاه‌های ۱ و ۳ در سال ۱۹۹۱ تکمیل شده‌اند و چاه‌های ۲ و ۴ تا ۹ در طی سال‌های ۱۹۹۲ و ۱۹۹۳ تکمیل شده‌اند. چاه‌های ۴ و ۵ مشکلات مکانیکی ناشی از غلظت کم پروپانت موجود در شکاف را داشتند که مهمترین علت دبی کم این دو چاه است.

این دو چاه برای لایه‌شکافی مجدد کاندید شده‌اند. به طور میانگین در این ۹ چاه پس از لایه‌شکافی ۶۰ بشکه در روز افزایش دبی رخ داده است که میانگین افزایش نسبت بهره‌دهی برابر ۲،۷ است. [۴]

در شکل ۳ تغییرات فشار جریانی حین اجرای عملیات لایه‌شکافی نشان داده شده است. به ازای این تغییرات فشار عملیات در محدوده‌ی ۴۴۰۰ تا ۴۶۰۰ فوتی عمق چاه اجرا شد که به ایجاد شکافی بیضی شکل با طول ۳۰۰ فوت انجامید. هندسه‌ی شکاف در شکل ۴ موجود است. قبل از انجام عملیات نیز تست مینی‌فرک^۸ به منظور تعیین بازده هرزروی سیال انجام شده که مقدار بازده سیال (هرزروی) در سازند ۵۰ تا ۶۰ درصد گزارش شده است. در مطالعه‌ی دیگر آندرسون در ۱۹۹۱ نشان داد که در صورت استفاده از اسید در لایه‌شکافی، سرعت واکنش اسید و سنگ مخزن باید مشخص شود. ثابت‌های این واکنش از نظر تعیین زمان مناسب برای خوردگی سنگ و مدت زمان انجام عملیات اهمیت دارد.

در چاه‌های موجود در سازند سن‌آندرسن ضریب‌های واکنش اسید و سنگ با استفاده از آزمایش دیسک دوار^۹ تعیین می‌شود. فرض استفاده شده در مطالعات سنگ (دولومیت) و اسید (HCl) سازند سن‌آندرسن وجود یک واکنش درجه یک با ثابت واکنش آرنیوس است. معادلات زیر سرعت واکنش را نشان می‌دهند.

$$u = K(C_s)^n$$

$$K = K_0 \exp(-E_a / RT)$$

که در آن u سرعت واکنش $(gmol / cm^2 \cdot s)$ ، C_s غلظت اسید $(gmol / cm^3)$ ، K ثابت واکنش و n درجه‌ی واکنش است. نتایج آزمایش دیسک دوار به ازای دماهای مختلف در شکل ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است برای سنگ‌های سن‌آندرسن درجه‌ی واکنش بین ۰،۱۵ تا ۰،۴ متغیر است. [۵]

۲ | اطلاعات ترکیب سنگ‌های مورد مطالعه

Sample	Depth (ft)	Field	County	Solubility (%)	Composition (%)						
					Dolomite	Calcite	Anhydrite	Gypsum	Quartz	Feldspars	Clays
Kasota dolomite	—	—	—	85.0	80 to 90	0.5 to 2	0	0	5 to 10	2 to 5	1 to 4
San Andres 1	5,145	Wasson	Yoakum	81.4	80 to 100	0	2 to 5	0	0.5 to 2	0	0
San Andres 2	5,283	Wasson	Yoakum	84.1	80 to 100	0	5 to 10	0	2 to 5	0	0
San Andres 3	5,057	Slaughter	Cochran	92.6	80 to 100	<0.5	<0.5	0	0.5 to 2	0	0
San Andres 4	4,840	Levelland	Hockley	91.9	80 to 100	0	2 to 5	0	5 to 10	0	0.5 to 2
San Andres 5	4,814	Levelland	Hockley	93.4	80 to 100	0.5 to 2	2 to 5	2 to 5	<0.5	0	0

۳ | اطلاعات مربوط به واکنش اسید و سنگ دولومیتی سن آندرس

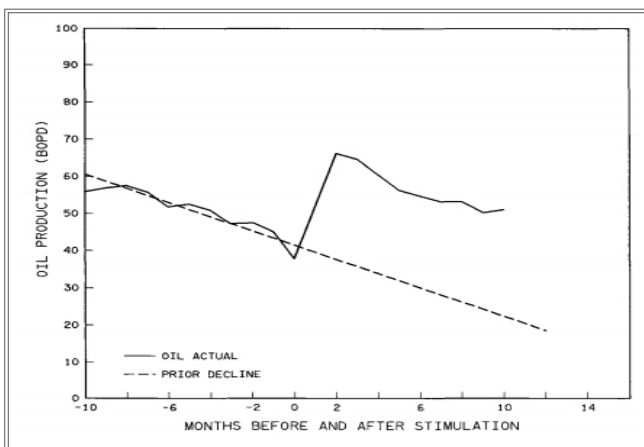
Linear regression, ln(K) vs. 1/T

Sample	K_0^*	E_a (kcal/gmol)	Average Curve Fit	n	K^* (at 120°F)
1	2.27×10^{-3}	3.38	0.76	0.223	1.15×10^{-5}
2	9.37×10^{-3}	4.59	0.94	0.131	7.16×10^{-6}
3	4.94×10^{-3}	3.96	0.99	0.180	1.01×10^{-5}
4	8.23×10^{-3}	3.83	0.99	0.253	2.06×10^{-5}
5	2.73×10^{-1}	5.27	0.95	0.392	7.21×10^{-5}

*Units = [(gmols/cm³)⁽¹⁻ⁿ⁾ (cm³/s · cm²).

۴ | مقایسه‌ی هزینه و افزایش تولید (بر اساس داده‌های ۱۹۸۷)

عنوان	شکاف اسیدی تعادلی	سایر روش‌های تحریک چاه
تعداد عملیات	۳۰	۲۰۵
افزایش تولید به ازای هر چاه (ب.ر.)	۲۹	۱۵
هزینه‌ی میانگین (دلار بر عملیات)	۲۱۱۷۰	۱۴۲۶۰
هزینه‌ی میانگین به ازای افزایش تولید (دلار)	۷۳۰	۹۵۰



۶ | تغییرات دبی یکی از چاه‌های سازند سن آندرس طی عملیات لایه‌شکافی اسیدی تعادلی

و با اعمال فشار تعادلی بدون گسترش شکاف اجازه‌ی خوردگی سنگ توسط اسید داده می‌شود. این روش یک روش اثبات شده در سازندهای ناهمگون و کربناته است.

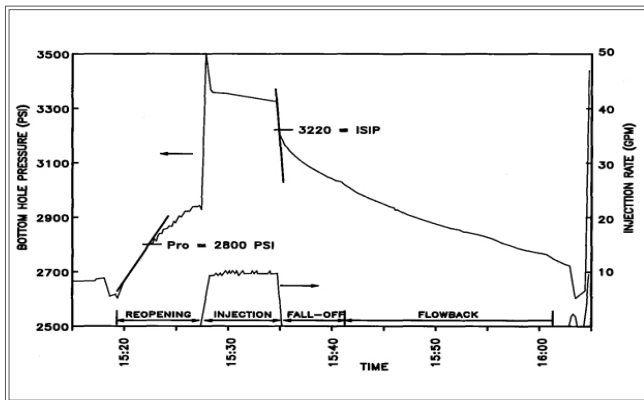
این روش دارای مزایایی است از جمله: ابعاد شکاف کنترل شده‌تر است، زمان تماس اسید برای خوردگی سنگ حداکثر است و بهره‌دهی چاه با هزینه‌ی کمتر و مصرف آب کمتر نسبت به لایه‌شکافی اسیدی معمولی انجام می‌شود. در جدول ۴ و شکل ۶ نتایج تغییرات دبی نفت و هزینه‌ی دو عملیات لایه‌شکافی اسیدی تعادلی و اسیدکاری بر اساس مطالعه‌ی تینکر قابل مقایسه است. [۶]

هوکابی در ۱۹۸۸ طراحی تحریک چاه در سازند دولومیتی سن آندرس

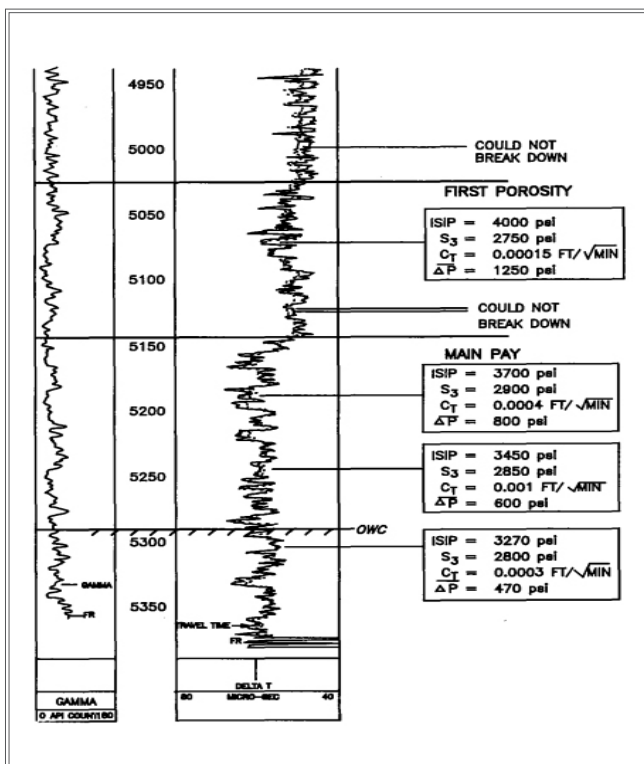
اطلاعات مربوط به سنگ‌های استفاده شده در این مطالعه در جدول ۲ موجود است. به منظور جلوگیری از تشکیل دی‌اکسید کربن و همچنین تشابه شرایط آزمایش به شرایط مخزن، تمام آزمایش‌ها در فشار ۱۰۰۰ پام انجام شده است. مقدار ثابت واکنش نیز برای سنگ‌های دولومیتی مخازن مختلف سن آندرس بین ۷ تا ۷۰ میکرو متغیر است. نتایج در جدول ۳ ارائه شده است. اهمیت داده‌های حاصل از واکنش اسید و سنگ به دلیل کاربرد آن در نوع خاصی از لایه‌شکافی اسیدی است که در چاه‌های حفاری شده در سازند سن آندرس انجام می‌شود.

تینکر در ۱۹۸۹ این روش را لایه‌شکافی اسیدی تعادلی^۱ نامید که طی آن در چندین مرحله پس از ایجاد شکاف، اسید به داخل شکاف تزریق می‌شود

در شکل ۸ متغیرهای مهم طراحی عملیات لایه شکافی که از آزمایش‌های پیش‌تزریق به دست می‌آید، قابل مشاهده است. حداقل تنش درجا با ۳، فشار بسته شدن همزمان با ISIP که معادل فشار لازم برای توسعه‌ی شکاف است، اختلاف این فشار و تنش درجا برابر با فشار رویی توسعه‌ی شکاف و ضریب هرزروی کل (Ct) از طریق روابط موجود در منابع، محاسبه می‌شود. [۱۰-۱۱] برای سازند سن اندرس تغییرات این متغیرها در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۷ | تغییرات دبی در جریان عملیات مینی‌فرک



شکل ۸ | تغییرات پارامترهای درجای موثر بر عملیات لایه‌شکافی خروجی آزمایش مینی‌فرک

منطقه‌ی واسون^{۱۱} در واحد بنت رانچ^{۱۲} واقع در یاکوم کانتی ایالت تکزاس را بررسی کرد. این مطالعه حاوی جزئیات کاملی از اجرای عملیات‌های تحریک چاه در این سازند است. فرآیندهای تحریک چاه در این مخزن به طور خلاصه شامل این موارد است:

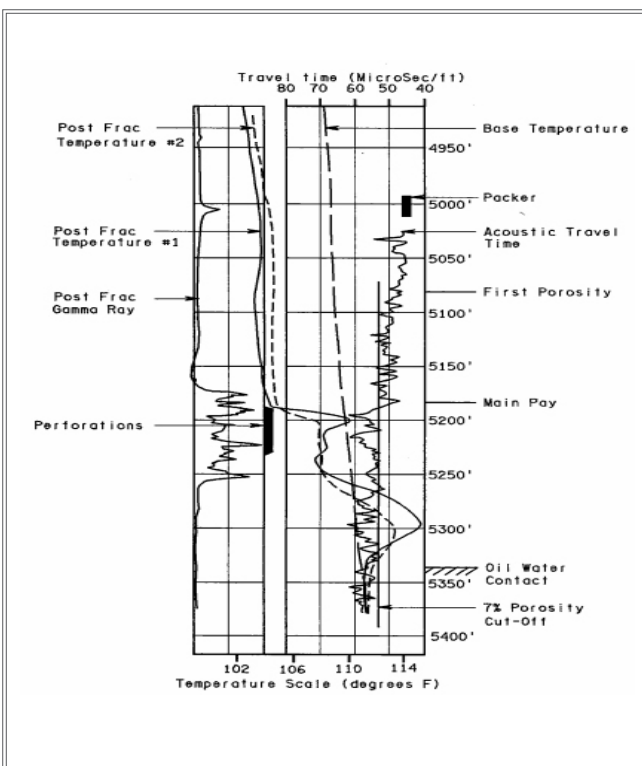
(الف) شکاف اسیدی
(ب) استفاده از پروپانت‌های ماسه‌ای در شکاف
(ج) استفاده از اسید برای انحراف نمک سنگ
(د) آغشته کردن به اسید

در این مطالعه این سه روش تحریک چاه با جزئیات توضیح داده شده است. روش اسیدکاری در بسیاری از موارد موفق بوده است. در مقابل عملیات‌های شکاف هیدرولیکی به همراه تزریق شن به صورت دوره‌ای در چاه‌های میدان اجرا می‌شود که نتایج آن متفاوت است. گاهی به افزایش دبی تولیدی نفت انجامیده و گاهی سبب افزایش تولید آب شده است. در سال ۱۹۸۶ با وجود تغییر طراحی عملیات لایه‌شکافی با پروپانت، از ۶ عملیات اجرا شده تنها ۳ عملیات موفق بود. از ۳ عملیات ناموفق، ۲ عملیات به دلیل کیفیت پایین سیال شکست خورده‌اند. تا قبل از سال ۱۹۸۶ هیچ تلاشی برای کنترل هندسه‌ی شکاف در طراحی عملیات لایه‌شکافی اسیدی در این میدان انجام نشده است. به صورت کلی در این عملیات‌ها از ۴۰۰۰ تا ۱۹۰۰۰ گالن اسید ۲۰ یا ۲۸ درصد HCl به صورت تزریق متناوب نقطه‌ای^{۱۳} استفاده می‌شود. برای تعیین هندسه‌ی شکاف پس از عملیات از نمودار دما استفاده می‌شود. نتایج نمودارگیری دمایی نشان می‌دهد شکاف‌ها در چاه‌های این مخزن به سمت پایین منحرف شده‌اند. این موضوع به همراه افزایش تولید آب در ۱۹۸۶ سبب بررسی دوباره‌ی طراحی عملیات‌های لایه‌شکافی شد. همچنین پیشنهاد شد برای تعیین پارامترهای کنترل‌کننده‌ی درجای شکاف، تست‌های میدانی مرتبط با لایه‌شکافی انجام شود. بر اساس مفاهیم ارائه شده در مطالعات موجود [۹-۷]، در آزمایش‌های پیش‌تزریق با هدف اندازه‌گیری توزیع عمودی تنش‌های درجای حداقل، اندازه و توزیع عمودی ضریب هرزروی^{۱۴} سیال و فشارهای رویی توسعه‌ی شکاف^{۱۵} انجام می‌شود. از آب تازه به عنوان سیال تزریقی استفاده شده است. عملیات پیش‌تزریق شامل سه مرحله‌ی: تزریق، افت و خروج جریان^{۱۶} است.

در شکل ۷ یک نمونه از عملیات‌های پیش‌تزریق مینی‌فرک نشان داده شده است. بر اساس نتایج این آزمایش‌ها مقدار مدول یونگ برابر با ۶ میلیون پام و نسبت پواسون برابر با ۰٫۳ برای سنگ‌های میانگین مخزن بود.

۵ | مقایسه‌ی اقتصادی عملیات‌های تحریک (بر مبنای دلار)

عنوان	هزینه به ازای عملیات	به ازای هر بشکه نفت
شکاف اسیدی AF	۲۶۰۷۶	۱۴۴۳
شکاف هیدرولیکی SF	۳۳۶۸۵	۲۱۵۰
تزریق اسید انحراف‌دهنده‌ی نمک BJ	۲۰۹۴۷	۱۹۳۱
اسیدکاری AT	۱۲۳۶۵	۴۵۳۴



۹ | تغییرات لاگ دما و گاما قبل و بعد از عملیات لایه‌شکافی

نتیجه‌گیری

در این مقاله به گزارشات و منابع و مقالات موجود در مورد لایه‌شکافی سازند سن‌آندرس پرداخته شد. در ابتدا به بیان شباهت‌ها و تفاوت‌های این سازند با سازند بنگستان که مبنای اصلی نتیجه‌گیری این مقاله می‌باشد، پرداخته شد و پس از مشخص شدن کامل شباهت‌ها و تفاوت‌ها، پروژه‌های لایه‌شکافی در سازند سن‌آندرس بررسی شد و درس‌ها و نکات این پروژه‌ها که شامل علت شکست‌ها و موفقیت‌های این پروژه‌ها بود، بررسی شد. البته که نمی‌توان با قاطعیت نسخه‌ای مشابه با سن‌آندرس

نتایج نشان می‌دهد که مقدار حداقل تنش درجا از اولین تخلخل تا سطح تماس آب و نفت تغییر نکرده است. در مقایسه با فشار رویی توسعه‌ی شکاف، حداقل تنش درجا نمی‌تواند شاخص توسعه‌ی شکاف باشد. با توجه به فشار رویی توسعه‌ی شکاف، محدوده‌ی بالای مخزن (معروف به اولین تخلخل) نیاز به فشار رویی بیشتری نسبت به ناحیه‌ی اصلی مخزنی دارد. این موضوع دلیل توسعه‌ی شکاف رو به پایین در مخزن است. ضریب هرزروی کل (Ct) به دو طریق آزمایشگاهی و تست میدانی اندازه‌گیری شده است، در بخش آزمایشگاه ضریب هرزروی کل برای محدوده‌ی ناحیه‌ی اصلی مخزنی بین ۰,۰۰۳ تا ۰,۰۰۱ فوت بر جذر دقیقه و در تست میدانی این مقدار ۰,۰۰۵ فوت بر جذر دقیقه اندازه‌گیری شده است. در اولین تخلخل نیز این مقدار به ترتیب ۰,۰۰۱۵ و ۰,۰۰۰۱ فوت بر جذر دقیقه برای تست آزمایشگاهی و میدانی اندازه‌گیری شده است.

نتایج نشان می‌دهد تست میدانی با آب شیرین در دبی و حجم پایین با نتایج آزمایشگاهی حاصل از تزریق اسید همخوانی دارد. نتایج اندازه‌گیری فشار رویی نیز نشان‌دهنده‌ی فشار رویی بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ پام در ناحیه‌ی اولین تخلخل و فشار ۴۰۰ تا ۵۰۰ پام در ناحیه‌ی مخزنی است. این نتایج با نتایج تست‌های میدانی مینی‌فرک همخوانی دارد. در ادامه‌ی این مطالعه، ۴ عملیات شکاف اسیدی ^{۱۷}AF، شکاف هیدرولیکی ^{۱۸}SF، تزریق اسید انحراف‌دهنده‌ی نمک ^{۱۹}BJ و اسیدکاری ^{۲۰}AT، به ازای ۲۸ عملیات AF، ۶ عملیات SF، ۱۳ عملیات BJ و ۱۱ عملیات AT مقایسه شده است. برای تعیین عملکرد میانگین دبی ۱۲ ماه منتهی به عملیات با میانگین دبی ۱۲ ماه پس از آن مقایسه شده است. نتایج نشان‌دهنده‌ی عملکرد بهتر AF و SF نسبت به BJ و AT است. از دیدگاه اقتصادی، AF بازگشت سرمایه سریع‌تر و سود بیشتری نسبت به سه عملیات دیگر دارد.

به دلیل قیمت پایین‌تر بازگشت سرمایه‌ی BJ سریع‌تر از SF و در بازه‌ی یک ساله سود یکسانی دارند. با این وجود SF سرمایه‌گذاری بلندمدت بهتری در مقایسه با BJ است. اسیدکاری در مقایسه با ۳ روش دیگر گزینه‌ی مناسبی نیست. تولید آب، یکی از مخاطرات روش‌های SF و BJ در مقایسه با AF است.

به عنوان آخرین نکته، برای تعیین وضعیت شکاف پس از عملیات لایه‌شکافی اسیدی می‌توان از لاگ دما و گاما استفاده کرد. لاگ دما به فاصله‌ی ۳۰ دقیقه و یک ساعت پس از عملیات در مقایسه با لاگ‌های دما و گاما قبل از عملیات برای تحلیل وضعیت شکاف مناسب هستند. در شکل ۹ به خوبی ایجاد شکاف در ابتدای ناحیه‌ی اصلی مخزن قابل مشاهده است.

چالش‌های پروژه‌های لایه‌شکافی در سازند سن‌آندرس پرداخت و باید بررسی شود که آیا این چالش‌ها و مشکلات ممکن است برای سازند بنگستان نیز وجود داشته باشند یا خیر. ■

برای مخازن سازند بنگستان پیچیدگی دو مخزنی در دنیا دقیقاً و کاملاً شبیه به هم نیستند و باید بررسی‌ها و تست‌ها و آزمایشات و مطالعات دقیق‌تری انجام شود. این مقاله تنها به بیان مشکلات و

پانویس‌ها

۱. شبکه اطلاع‌رسانی نفت و انرژی (شان)، کد خبر ۲۸۳۶۳۴، ۲۰ تیر ۱۳۹۷.

11. Wasson San Andres dolomite

12. Bennett Ranch

13. subsequent spot/squeeze

14. Leak-off

15. fracture extension overpressures

16. injection/ falloff/ flow back cycle

17. the fracture acidizing stimulations

18. the sand propped fracture stimulations

19. the rock salt diverted acid treatments

20. the small volume acid soaks/squeezes

2. Dolomite

3. Limestone

4. Leakoff

5. Conductivity

6. Sacks

7. BPM

8. Mini-frac

9. rotating disk

10. Equilibrium Acid Fracturing

منابع

[1]. Martinez A.D., Ellis P.D. and DeAragao D.D. "Application of hydraulic fracturing technologies, San Andres formation, new mexico", SPE 27691, p. 607-616, 1994.

[2]. Carlsen T. C. and Sipek L. D., "Characterization of a San Andres Reservoir", SPE 1145, p. 84-92, 1965,

[3]. Black H. N. and Stubb B. A., "A Case History Study - Evaluation of San Andres Stimulation Results", SPE 5649, p. 1-16, 1975,

[4]. Martinez A.D., Ellis P.D. and DeAragao D.D. "Application of hydraulic fracturing technologies, San Andres formation, new mexico", SPE 27691, p. 607-616, 1994.

[5]. Anderson M. S., "Reactivity of San Andres Dolomite", SPE Production Engineering, p. 227-232, May 1991.

[6]. Tinker S.J., "Equilibrium Acid Fracturing: A New Fracture Acidizing Technique for Carbonate Formations", SPE 18883, p. 517-530, May 1989.

[7]. Nolte, K. G.: Determination of Fracturing Parameters From Fracturing Pressure Decline, paper SPE 8341 presented at the 54th Annual Fall Technical Conference and Exhibition of the SPE of AIME, Las Vegas, Nevada, (Sept. 23-26, 1979).

[8]. Nolte, K. G.: A General Analysis of Fracturing Pressure Decline, paper SPE 12941, unsolicited paper submitted for publication to the SPE (1984).

[9]. Shlyapobersky, J. : Hydraulic Fracture Determination of Minimum In-Situ Stress from Extended Pressure Falloff and from Fracture Reopening and Flowback Tests, 11 presented at the 2nd International Workshop on Hydraulic Fracturing Stress Measurement, Minneapolis, Minnesota (June 15-18, 1988).

[10]. Shlyapobersky, J., Wong, G. K., and Walhaug, W. W.: 1 Overpressure Calibrated Design of Hydraulic Fracture Stimulations, 11 paper SPE 18194, submitted for presentation at the 1988 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, (Oct. 2-5, 1988).

[11]. Walhaug, W. W., Shlyapobersky, J., Sheffield, R. E., and Huckabee, P. T.: 1 Field Determination of Fracturing Parameters for Overpressure Calibrated Design of Hydraulic Fracturing, .. paper SPE 18195, submitted for presentation at the 1988 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, (Oct. 2-5, 1988).