نقش مکانیسم نفوذ مولکولی گاز در تولید از مخازن نفتی شکاف‌دار

ضحی وطنی[1*]، ایمان فرزاد[2]

۱. پژوهشکده توسعه فناوری های پالایش و فرآورش نفت، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران
۲. شرکت نفت مناطق مرکزی ایران، شرکت بهره‌برداری نفت و گاز شرق

نویسنده مسئول، ایمیل: z.vatani@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۷/۲۸ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۲/۱۹

چکیده:

پدیده نفوذ مولکولی گاز محلول ما بین نفت موجود در ماتریس و شکاف در ناحیه گازی شده یکی از مکانیزم‌های تولیدی خاص مخازن شکاف‌دار است. وقتی که در مخازن شکاف‌دار با شکاف‌های خوب یا متوسط، در نفت موجود در شکاف‌های عمودی به دلیل گرادیان دمای مخزن، جریان همرفتی برقرار می‌شود، فرایند نفوذ مولکولی نقش حائز اهمیتی خواهد داشت. با کاهش فشار ناشی از تولید از ستون نفتی مخزن، حجم عظیمی از گاز موجود در بلوک‌های ستون نفتی از طریق شکاف‌ها به کلاهک گازی انتقال می‌یابد و فشار حباب نفت بلوک‌های ستون نفتی را کاهش می‌دهد و یا بر عکس با فشارافزایی مخزن از طریق تزریق گاز، فشارحباب نفت بلوک‌های ستون نفتی افزایش می‌یابد. به منظور بررسی نقش نفوذ مولکولی گاز محلول در تولید از مخازن شکافدار، مطالعه میدانی و تاریخچه تولید میدان هفتکل مورد آنالیز قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داده است که با لحاظ پدیده نفوذ مولکولی، نفت اضافی درحدود ۱۶/۵ درصد از کل ذخایر قابل استحصال در طی دوره ۲۰ ساله اولیه بهره برداری از میدان تولید شده است. به عبارت دیگر در صورت اغماض مکانیزم نفوذ مولکولی گاز در مخزن، محاسبات موازنه مواد، راندمان جابجایی با گاز را به میزان فوق‌الذکر کمتر و به همان میزان راندمان جابجایی با آب را بیشتر برآورد خواهد نمود.

کلمات کلیدی: رانش گاز محلول، صعود/ نزول فشار حباب، مخازن نفتی شکاف‌دار، ناحیه گازی شده، نفوذ مولکولی

۱- مقدمه

بررسی نفوذ ملکولی در مخازن نفتی، اولین بار در سال ۱۹۸۶ به جامعه علمی ارائه شد(Ertekin *et al*., 1986). او یک طیف به منظور چگونگی اهمیت هر کدام از دو عامل تولید سیال (دارسی و فیکی) را برای مخازن معمولی پیشنهاد داد.

اما از آنجایی که کار او در مخازن معمولی با تراوایی بسیار پایین کاربرد داشت و این مخازن به ندرت یافت میشدند کار او با استقبال مهندسان نفت واقع نشد تا اینکه در سال ۲۰۰۵، ایالا بر روی موضوع مکانیزم‌های چندتایی مخازن گاز میعانی شکاف‌دار نتایج بسیار عالی ارائه نمود(Ayala, 2005). نفوذ ملکولی در مخازن شکاف‌دار بر خلاف مخازن معمولی، می‌تواند به صورت موثر بر بازده تزریق گاز در مخازن نفتی و یا بازگردانی گاز در مخازن گاز میعانی موثر است (Hoteit and Firoozabadi, 2006).

در نظر گرفتن نفوذ ملکولی همزمان با گرادیان فشاری در محیط متخلخل، معمولاً به‌صورت جریان چند مکانیزمی خوانده می‌شود. نفوذ ملکولی پدیده‌ای است که خواه ناخواه به همراه گرادیان فشاری در مخزن اتفاق می‌افتد و در بیشتر مواقع اثر آن در شبیه‌سازی مخازن منظور نمی‌شود که دلیل آن به غالب بودن مکانیزم گرادیان فشاری برمی‌گردد. اما در بعضی از مخازن، صرف نظر کردن از نفوذ مولکولی در شبیه‌سازی، منجر به پیش‌بینی رفتاری غیر از رفتار واقعی مخزن خواهد شد (کاظمی و همکاران، ۱۳۹۰). مکانیزم‌های غالب تولید از مخازن شکافدار به شرح زیر است:

- ریزش ثقلی (به‌خصوص در فرآیند تزریق گاز (Gravity Drainage
- آشام مویینگی (به‌خصوص در تزریق آب (Spontaneous Imbibition

- نفوذ ملـــکولی (به‌خصـــوص در تزریق گاز امتـــزاجی (Molecular Diffusion

تزریق امتزاجی و غیر امتزاجی به عنوان روش‌های ازدیاد برداشت در مخازن شکاف‌دار، به دلیل ساختار ناهمگون این نوع مخازن، مشکلات خاص خود را دارد (شاه محمد، ۱۳۸۷). در سال‌های اخیر، یک مدل ۱۰ جزیی از سیال مخزن جهت شبیه‌سازی رفتار مخزن ارائه شد و سناریوهای مختلف در باره شدت جریان تزریق بهینه، مورد بررسی قرار گرفته است (شاهوران فرد و مردای، ۱۳۸۸). در سال ۲۰۱۰ کاظمی و همکارانش اثر تزریق گاز CO_2 و پدیده نفوذ مولکولی در مخازن شکاف‌دار را بررسی کردند.

اثر ترکیبی نفوذ مولکولی و گرانش نشان داد که استفاده از ضرایب نفوذ نفت و گاز در شبیه‌سازی مخازن شکاف‌دار بسیار مهم است(Kazemi and Jamialahmadi, 2009).

در سال ۲۰۱۳ هلم در پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود به بررسی مفصل پدیده نفوذ به عنوان یک مکانیزم بازیابی نفت در تزریق CO_2 در مخازن شکاف‌دار پرداخت (Holme, 2013).

در مطالعات جریان غیرامتزاجی گاز و نفت در محیط متخلخل، از فرایند نفوذ مولکولی معمولاً صرف‌نظر می‌شود. به این دلیل که نفوذ مولکولی گاز غیرتعادلی یا محلول به نفت حاوی غلظت دیگری از گاز محلول، در سیستم با ضخامت زیاد، فرایندی زمان‌بر است. در نتیجه، تغییرات ترکیب سیال در یک بازه زمانی در مقایسه با نفوذ مولکولی، بیشتر خواهد بود. از طرف دیگر در مخازن شکافدار متوسط یا خوب، وقتی که در نفت موجود در شکاف‌های عمودی به دلیل گرادیان دمای مخزن، جریان همرفتی برقرار می‌شود، فرایند نفوذ مولکولی نقش حائز اهمیتی خواهد داشت. بدین معنی که با کاهش فشار، حجم عظیمی از گاز موجود در بلوک‌های ستون نفتی از طریق شکاف‌ها به کلاهک گازی انتقال می‌یابد. برعکس، با افزایش فشار مخزن، گاز موجود در کلاهک نیز می‌تواند به ماتریس منتقل شود (Saidi, 1987). در فرایند اول، فشار حباب نفت واقع در بلوک‌های ستون نفتی، با کاهش فشار مخزن کاهش می‌یابد که به این پدیده نزول فشار حباب[1] گویند ولی در فرایند دوم با افزایش فشار مخزن، فشار حباب نفت بلوک‌های ستون نفتی نیز افزایش[2] خواهد یافت (Golf-Racht and Van, 1982). به عنوان مثال می‌توان به تاریخچه تولید میدان نفتی هفتکل اشاره نمود.

با کاهش فشار مخزن در فاصله سال‌های ۱۹۵۱- ۱۹۲۸ میلادی، GOR[3] میدان نیز کاهش و به دلیل متوقف شدن تولید میدان در سال‌های ۱۹۵۴- ۱۹۵۱ و افزایش فشار ۷۹ پام مخزن، GOR میدان، نیز افزایش یافت. جالب توجه است که روند افزایشی تغییرات GOR تولیدی میدان متناسب با تغییرات فشار آن بوده است. هر چند که با کاهش فشار مخزن از سال ۱۹۵۴، نسبت گاز به نفت تقریباً به مدت ۲ سال ثابت بوده و سپس کاهش یافته است که به دلیل افزایش فشار ۷۹ پام مخزن و بالاآمدگی ۱۲۰ فوتی سطح تماس گاز و نفت، در زمان توقف تولید از مخزن بوده است. این دو عامل موجب شد که گاز آزاد ناحیه گازی شده در نفت به صورت محلول درآید و در نتیجه بلوک‌های واقع در این ناحیه، دارای گاز محلول (R_S) بیشتری در مقایسه با نفت واقع در سطح تماس و یا بخش زیرین آن باشند. در نتیجه با افت فشار و پایین آمدن سطح تماس، ترکیب نفت موجود در سطح تماس مشابه آن بلوک‌ها بوده و مدت زمان ۲ تا ۳ سال، زمان کافی برای نفوذ گاز محلول و برگشتن به روند قبلی نخواهد بود. لازم به ذکر است که کاهش نسبت گاز به نفت در حین تخلیه طبیعی در کلیه میادین شکافدار کشور مشاهده شده است. اگر چه که این عملکرد بیشتر مربوط به عامل همرفت گرمایی در سیستم شکاف‌های میدان است ولی این نکته را به روشنی بیان می‌دارد که در تمامی شکاف‌های ستون نفتی، ترکیب نفت با گاز محلول کمی را خواهیم داشت. در نتیجه بلوک‌ها، با نفت حاوی گاز محلول کمتری در مقایسه با نفت اشباع درون بلوک محاط شده و اصلی‌ترین شرط برقراری نفوذ مولکولی مابین شکاف و ماتریس، برقرار خواهد بود.

با کاهش فشار مخزن و برقراری پدیده نفوذ مولکولی در یک مخزن شکافدار، حجم عظیمی از گاز محلول از ستون نفتی به سوی کلاهک مخزن انتقال می‌یابد (ویا برعکس). این پدیده کاهش فشار حباب اولیه نفت درون بلوک و کوتاه‌تر شدن ضخامت ناحیه گازی شده را موجب می‌شود. در نتیجه به منظور بررسی عملکرد مخزن، مخصوصاً از منظر راندمان جابجایی نفت و گاز، موقعیت این حجم گاز، تأثیر قابل توجهی در آنالیز راندمان جابجایی‌های مذکور خواهد داشت (saidi, 1987).

شایان ذکر است که مهمترین عامل جریان همرفتی موثر در گردش نفت داخل سیستم شکاف‌ها، وجود گرادیان دمایی رایج در مخازن است. به عنوان مثال در مخزن با ستون نفتی ۵۰۰ فوت و گرادیان دمای ۱/۵ درجه فارنهایت در هر ۱۰۰ فوت، نیروی همرفتی متناسب با β×۵×۱/۵ است. که در آن β ضریب انبساط دمایی است. افزایش چگالی ناشی از کاهش فشار و آزاد شدن گاز محلول نفت در سطح تماس GOC، در مقایسه با نیروی مذکور ناچیز است.

۲- قوانین انتقال جرم

فرایند جابجایی مولکولی به دلیل اختلاف غلظت در یک محیط

1. Bubble-point Pressure Depression
2. Bubble-point Pressure Elevation
3. Gas Oil Ratio

همگن، مشابه قانون فوریه (Fourier) انتقال حرارت ناشی از اختلاف دما، توسط Fick در سال ۱۸۵۵ میلادی از طریق رابطه $f= -D \frac{dc}{dx}$ تعریف شده است (Fick, 1855). در این رابطه نفوذ D، معرف سرعت نفوذ مولکول A در مولکول B وقتی که در تماس با یکدیگر قرار گیرند، خواهد بود. دبی جریانی f دررابطه فوق، مربوط به سیستم دو جزیی است. در پدیده نفوذ در مخازن با توجه به ترکیب سیال که به صورت چند جزیی است از روش فراگیر[1] (در زمانی که جزء غالب نفوذ کننده (نظیر متان) مشخص باشد) استفاده می‌گردد.

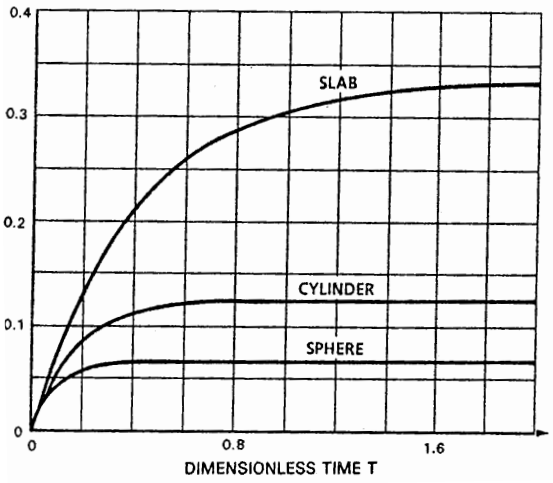
در سیستم هیدروکربوری، ضریب نفوذ، تابعی از اختلاف غلظت جزء نفوذ کننده، دما، فشار و کشش سطحی ما بین جزء نفوذ کننده و محیط (نفوذ بین گاز و سیال) است (Hadiato *et al.*, 1985). به طور کلی، ضریب نفوذ با افزایش دما (موجب افزایش فعالیت مولکول نفوذکننده) و کاهش کشش بین سطحی ما بین دو فاز، زیاد می‌شود. وجود فضای متخلخل به دلیل وجود نواحی تماس متفاوت دو سیال، نفوذ مولکول را کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر، حرکت مولکول‌ها در فاصله مشخصی از محیط متخلخل نسبت به طی نمودن همان فاصله در یک مجرا، به زمان زیادتری نیازمند است(Pruess, 1980). بدین منظور ضریب نفوذ مولکولی موثر (D_e) از طریق تشابه قانون Fick و قانون Ohm به صورت زیر تعریف می‌شود که در آن F نسبت جریان با غلظت C در دو محیط مختلف است.

(۱)

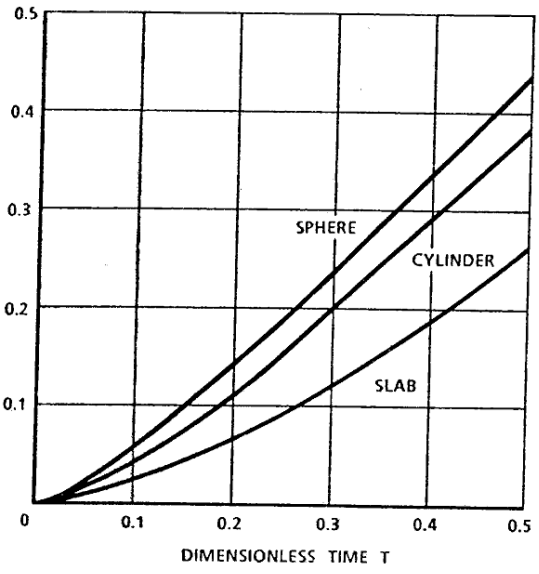
$$F = \frac{f}{f_p} = \frac{D}{\phi D_e}$$

۲-۱- نفوذ گاز محلول بین شکاف و ماتریس

با لحاظ نمودن جریان همرفت گرمایی در سیستم شکاف‌های مخزن، به مجرد شروع تولید و کاهش فشار مخزن، بلوک‌های ماتریس توسط نفتی با گاز محلول کمتر و مشابه نفت زیر سطح تماس گاز و نفت احاطه می‌شوند. در این حالت است که نفوذ مولکول گاز به دلیل اختلاف غلظت آن در نفت درون و بیرون بلوک‌ها آغاز می‌گردد. میزان جابجایی گاز مابین بلوک و شکاف‌ها، تابعی از شکل بلوک‌ها و همچنین ابعاد سطوح جانبی بلوک در تماس با شکاف‌ها است. اگر بلوک‌ها از تمامی نواحی سطوح جانبی خود با شکاف‌ها در ارتباط باشند پدیده نفوذ کاملاً سه بعدی و پیچیده خواهد بود. در صورتی که بلوک دارای نواحی جانبی یکسان باشد می‌توان آن را مشابه حالت کروی شکل فرض نمود. اگر تنها چهار سطح متقابل بلوک با شکاف در ارتباط بوده و بعد سوم در مقایسه با سایر ابعاد کوچک باشد، حالت استوانه‌ای در نظر گرفته می شود. حالت ورقه ای[2] نیز هنگامی است که بلوک‌ها از سطوح متقابل با یکدیگر در ارتباط باشند. لازم به یادآوری است وقتی که بلوک‌های مکعبی شکل با بلوک‌های کروی جایگزین می‌شوند، تبادل اجزاء سیال به دلیل افزایش سطح تماس در واحد حجم، زیادتر می‌شود. در این شرایط بایستی بلوک‌های کروی بزرگتری به منظور به حداقل رساندن این اختلاف، مورد استفاده قرار گیرد. همچنین استوانه در مقایسه با ورقه، سطح تماس بیشتری به ازای واحد حجم خواهد داشت. شکل ۱ نتایج حل معادلات دیفرانسیل مربوط به پدیده نفوذ مولکولی در حالت‌های مختلف کروی، استوانه‌ای و ورقه‌ای را نشان می‌دهد. شکل‌های ۱ و ۲ فشار اشباع بدون بعد و متوسط کاهش فشار حباب در شکل‌های مختلف بلوک را نمایش می‌دهد.



شکل ۱: فشار حباب متوسط بدون بعد در شکل‌های مختلف بلوک (Saidi, 1987)



بلوک(Saidi, 1987)

1. Global approach

2. Slab

همانگونه که شکل‌های بالا نشان می‌دهد، میزان کاهش فشار حباب، به شدت به ناحیه تماس شکاف و بلوک ماتریس در واحد حجم وابسته است. کاهش فشار در شکل کروی کمترین و به ترتیب در حالت‌های مکعبی، استوانه‌ای و ورقه‌ای کمتر است. همچنین میزان کاهش فشار حباب در اعماق بیشتر، افزایش خواهد یافت زیرا پدیده نفوذ مولکولی در زمان‌های طولانی‌تری اتفاق می‌افتد. پارامترهای دما و فشار بدون بعد فوق‌الذکر به صورت زیر تعریف شده‌اند:

(۲)

$$T = \frac{D_e}{a^2}\, t$$

(۳)

$$P = \frac{D_e\ (p_s - p_f)}{K\ a^2}$$

۳- محاسبه زمان تأخیر مکانیزم رانش گاز محلول[1] در مخازن شکاف‌دار

در این بخش، تأثیر پدیده نفوذ مولکولی گاز در کاهش فشار حباب بلوک‌های نفتی در اعماق مختلف مخزن بررسی می‌شود (Saidi, 1987) . بدین منظور اطلاعات اولیه زیر مورد نیاز است.

۱- تاریخچه حرکت سطوح تماس GOC و WOC درون سیستم شکاف z_g=mt و $m = \frac{d(GOC)}{dt}$

۲- تاریخچه فشار مخـــزن در ســـطح تـــماس GOC $p_g = p_{ig} - kt,\ k = \frac{dp}{dt}$

۳- ضریب نفوذ مولکولی موثر، متوسط ارتفاع بلوک‌ها در عمق‌های مختلف، گردایان فشار گاز نفت G_o & G_g

۴- فشار اشباع نفت در سیستم شکاف بر حسب زمان که در صورت آمیخته شدن سیال موجود در شکاف می‌توان فرض نمود که فشار اشباع نفت شکاف با فشار سطح تماس GOC برابر است.

به منظور ساده‌سازی، تمامی پارامترهای فوق‌الذکر در زمان و عمق، ثابت فرض می‌شوند. نفت موجود در بلوک‌های مخزنی در حالت عدم نفوذ مولکولی در عمق Z از سطح تماس اولیه گاز و نفت، در زمانی که فشار به فشار اولیه اشباع می‌رسد، تحت تأثیر رانش گاز محلول قرار می‌گیرد که از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

(۴)

$$t_g = \frac{G_o\ Z}{k + m(G_o - G_z)}$$

در حالتی که پدیده نفوذ مولکولی مابین ماتریس و شکاف برقرار بوده و به مرور زمان، فشار اشباع بلوک کاهش می‌یابد، متوسط فشار اشباع بلوک و همچنین کاهش فشار اشباع نفت در حالت‌های مختلف در شکلهای ۱ و ۲ ارایه شده است.

فشار نفت درون بلوک در دو حالت نفوذ مولکولی گاز و یا بدون آن، تقریباً ثابت می‌ماند. در صورت برقراری پدیده نفوذ مولکولی، فعال شدن مکانیزم رانش گاز محلول با تأخیر Δt و در زمان $t_s = t_g + \Delta t$ رخ خواهد داد. مقدار t_s معادل زمانی است که لازم است فشار نفت درون بلوک به فشار متوسط اشباع آن بلوک برسد. با تبدیل زمان t_g به زمان بدون بعد T_g از طریق رابطه ۵ و استفاده از منحنی‌های ارایه شده در شکل‌های ۱ و ۲ این گزارش، از محل برخورد T_g با منحنی مربوطه، میزان فشار بدون بعد P_o به‌دست می‌آید.

(۵)

$$T_g = \frac{D_e\ t_g}{a^2}$$

(۶)

$$\Delta t = \frac{a^2\, \Delta T}{D_e}$$

(۷)

$$P_o = \frac{[G_o\ z - (G_o - G_g) m\ t]\ D_e}{K a^2}$$

رابطه ۷ جهت برآورد میزان تأخیر در شروع مکانیزم رانش گاز محلول در عمق مشخص کاربرد دارد. در ابتدا فشار بدون بعد خوانده شده از شکل‌های ۱ و ۲ را در معادله مزبور وارد کرده و سپس زمان را (معادل T) از رابطه فوق به‌دست می‌آوریم. زمان به‌دست آمده را بر عبارت $\frac{De}{a^2}$ تقسیم و معادل t می‌گیریم. اختلاف زمان t و t_g میزان تأخیر در زمان شروع مکانیزم رانش گاز محلول را مشخص می‌کند. همچنین از طریق رابطه ۷ می‌توان میزان کاهش فشار حباب نفت ناشی از پدیده نفوذ مولکولی را با استفاده از فشار بدون بعد P خوانده شده از شکل‌ها، محاسبه نمود.

(۸)

$$P_s = P_{si} - \frac{K a^2 (T - P)}{D_e}$$

۴- برآورد میزان گاز موجود در بلوک‌ها و شکاف‌های مخزن در دو حالت نفوذ/عدم نفوذ مولکولی

یکی از نتایج مهم فرایند نفوذ مولکولی و کاهش فشار اشباع

1. Solution Gas Drive

نفت بلوک‌ها، تبادل و انتقال حجم زیادی از گاز درون بلوک‌های ماتریسی واقع در بخش زیرین سطح تماس گاز و نفت به کلاهک گازی میدان، توسط سیستم شکاف‌های مخزن است. مضافاً اینکه در محاسبات موازنه مواد و بازیافت نفت نیز پدیده انقباض نفت[1] نقش حائز اهمیتی را ایفا خواهد نمود. لذا در آنالیز عملکرد مخزن، برآورد گاز انتقال یافته به کلاهک گازی بسیار مهم و حیاتی است.

به منظور برآورد حجم گاز انتقال یافته، ساده‌تر آن است که اختلاف حجم گاز درجا را در دو حالت برقراری و یا عدم برقراری نفوذ مولکولی محاسبه نماییم. به این دلیل که در هر دو حالت، درصد اشباع گاز آزاد، محدود و مقدار ثابتی است. تغییرات فشار نسبت به زمان در مخازن نفتی کوچکتر از 10^{-6} bar/sec بوده و میزان اشباع گاز آزاد در ناحیه گازی شده مخازن به ۲% خواهد رسید. وقتی که پدیده نفوذ مولکولی برقرار شود، این مقدار به کمتر از ۱% تنزل خواهد یافت. در نتیجه برای سادگی، از این حجم گاز در ناحیه گازی شده در هر دو حالت (نفوذ مولکولی و غیره) چشم‌پوشی می‌شود.

بدین‌منظور مخزن به سه ناحیه گازی شده، ستون نفتی و آبی شده تقسیم می‌شود. همچنین به دلیل عملکرد متفاوت نفت در سیستم شکاف و بلوک‌ها، محاسبات جداگانه‌ای برای هر یک لحاظ شده است. به منظور ساده‌سازی، حجم مخزن به نسبت عمق ثابت و حجم شکاف‌ها نیز درصد ثابتی از ماتریس در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر، میزان A_o بشکه نفت در هر فوت در بلوک‌های ماتریسی و میزان a_o بشکه نفت در هر فوت در شکاف موجود فرض می‌گردد. اگرچه در مخازن واقعی، انجام محاسبات دقیق میزان حجم نفت در اعماق مختلف مخزن ضروری است. جدول۱ روابط مربوط به برآورد میزان گاز درجا را در حالت‌های مختلف فوق‌الذکر نمایش می‌دهد.

۵- مطالعه میدانی مکانیزم نفوذ مولکولی

به منظور بررسی اهمیت موضوع مهاجرت گاز محلول در نفت، ماتریسی‌های واقع در ستون نفتی به کلاهک گازی مخزن تحت‌تأثیر فرایند نفوذ مولکولی، تاریخچه تولید میدان نفتی

جدول۱: روابط مربوط به محاسبات گاز محلول (فوت مکعب) در نواحی مختلف مخزن (با فرض یک بشکه در هر فوت)(Saidi, 1987)

حالت/ناحیه		ناحیه گازی شده	ستون نفتی	ناحیه آبی شده
بدون نفوذ مولکولی	شکاف	$if\ Z_b < Z_w$: $\emptyset_f(Z_b - Z_g)R_s\left(\frac{P_b + P_g}{2}\right)$ $if\ Z_b > Z_w$: $\emptyset_f(Z_w - Z_g)R_s\left(\frac{P_b + P(z_w)}{2}\right)$	$if\ Z_b < Z_w$: $\emptyset_f(Z_w - Z_g)R_s(P_b)$	0
	ماتریس	$if\ Z_b < Z_w$: $(Z_b - Z_g)R_s\left(\frac{P_b + P_g}{2}\right)$ $if\ Z_b > Z_w$: $(Z_w - Z_g)R_s\left(\frac{P_b + P(z_w)}{2}\right)$	$if\ Z_o < Z_w$: $(Z_w - Z_b)R_s(P_b)$ $if\ Z_o > Z_w$ $if\ Z_o > Z_w$: 0	$if\ Z_b < Z_w$: $(1 - S_w)(Z_{wi} - Z_w)R_s(P_b)$ $if\ Z_w < Z_b < Z_{wi}$: $(1 - S_w)(Z_b - Z_w)R_s\left[\frac{P(Z_w) + P_b}{2}\right] + (Z_{wi} - Z_b)R_s(P_b)$ $if\ Z_b > Z_{wi}$: $(1 - S_w)(Z_{wi} - Z_w)R_s\left[\frac{P(Z_w) + P(Z_{wi})}{2}\right]$
با نفوذ مولکولی	شکاف	$\emptyset_f(Z_w - Z_g)R_s(P_g)$	$\emptyset_f(Z_w - Z_g)R_s(P_g)$	0
	ماتریس	$if\ Z_d < Z_w$: $(Z_d - Z_g)R_s\left(\frac{P_b + P^*(t)}{2}\right)$ $if\ Z_d > Z_w$: $(Z_w - Z_g)R_s\left(\frac{P_b + P^*(t)}{2}\right)$	$if\ Z_d < Z_w$: $(Z_w - Z_d)R_s[P_s(t)]$	$(1 - S_w)(Z_{wi} - Z_w)R_s\left[\frac{1}{t}\int_o^t \bar{P}_s(t)dt\right]$

1. Oil shrinkage

هفتکل در خلال ۴۰ سال تولید اولیه از آن مورد آنالیز قرار گرفت. تاریخچه فشار و تغییرات سطوح تماس گاز _ نفت و نفت _ آب بر حسب زمان به صورت زیر ارایه شده است. در این روابط فشار بر حسب پام، Z_w و Z_g بر حسب فوت و t بر حسب سال محاسبه شده است.

(۹)
$$P_g = 1420 - 7.5\,t$$

(۱۰)
$$Z_w = 2100 - 25\,t$$

(۱۱)
$$Z_g = 25\,t$$

آزمایشات سیال، تغییرات گاز محلول نفت را در محدوده فشاری ۱۴۲۰- ۱۱۰۰ به صورت زیر پیش‌بینی نموده است که در آن R_s بر حسب هزار فوت مکعب در هر بشکه و فشار بر حسب پام است

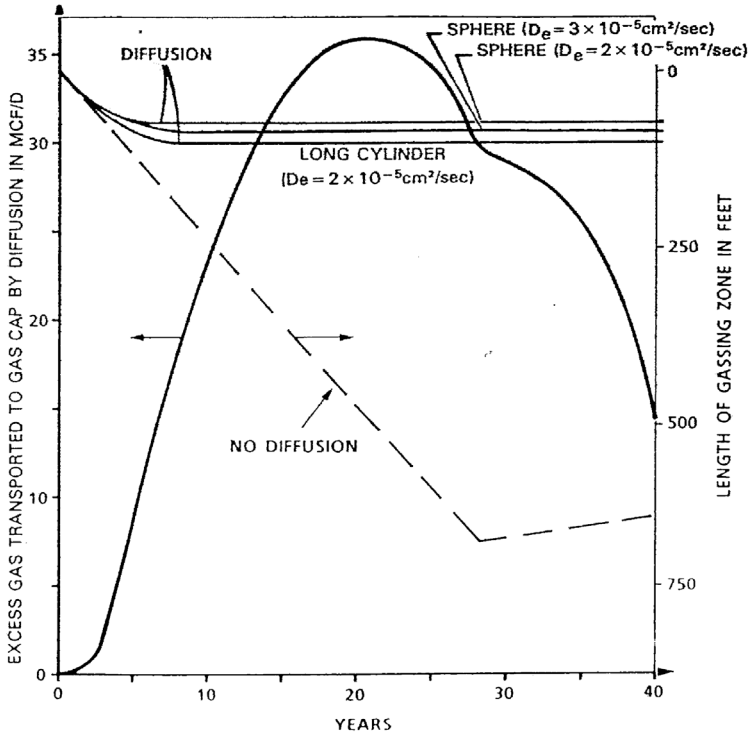
(۱۲)
$$R_s = 0.278 \times 10^{-4}\,P$$

گرادیان فشاری نفت و آب به ترتیب ۰/۳۲ و ۰/۵ پام در هر فوت است. متوسط اشباع آب در ناحیه آبی شده مخزن، تحت تأثیر پدیده آشام و ریزش ثقلی، ۰/۲ لحاظ شده است. حجم شکاف‌های مخزن در حدود ۰/۰۲ حجم ماتریس و با نسبت ثابت با عمق مخزن فرض گردیده است.

نتایج محاسبات برآورد احجام گاز محلول در نفت بخش زیرین سطح تماس گاز و نفت در دو حالت نفوذ/ بدون نفوذ گاز در جدول۲ ارایه شده است. اختلاف میزان گاز در دو حالت مزبور در ستون آخر جدول و همچنین شکل۳ نمایش داده شده است.

جدول۲: میزان گاز محلول نواحی مختلف مخزن در حالت بدون نفوذ مولکولی (با فرض یک بشکه نفت در هر فوت)

اختلاف مجموع میزان گاز محلول در دو حالت	مجموع شکاف و ماتریس		شکاف‌ها		ماتریس						زمان، سال
					ناحیه آبی		ستون نفتی		ناحیه گازی		
	بدون نفوذ مولکولی	نفوذ مولکولی	بدون نفوذ مولکولی	نفوذ مولکولی	بدون نفوذ مولکولی	نفوذ مولکولی	بدون نفوذ مولکولی	نفوذ مولکولی	بدون نفوذ مولکولی	نفوذ مولکولی	
۰	۸۴۸/۶	۸۴۸/۶	۱۶/۶۴	۱۶/۶۴	۰	۰	۸۳۲/۰۰	۸۳۲	۰	۰	۰
/۹۹	۸۱۷/۴	۸۱۶/۵۱	۱۵/۶۴	۱۵/۶۴	۲۰	۲۰	۷۵۸/۵۰	۷۶۱/۹	۲۳/۳	۱۹/۱	۲/۵
۸/۹۹	۷۸۵/۹	۷۷۶/۹	۱۴/۲۷	۱۴/۶۳	۴۰	۳۹/۹	۶۸۵/۰۰	۲۲/۵	۴۶/۳	۲۲/۵	۵
۲۳/۲۸	۷۲۲/۳	۶۹۹	۱۱/۹۹	۱۲/۶	۸۰	۷۹	۵۳۸/۳۰	۵۸۴/۶	۹۱/۴	۲۳/۵	۱۰
۳۲/۵۹	۶۵۷/۱	۶۲۴/۵	۹/۸۱	۱۰/۵۳	۱۲۰	۱۱۷/۶	۳۹۱/۲۴	۴۷۵	۱۳۵/۲	۲۲/۶	۱۵
۳۶	۵۹۰/۸	۵۵۴/۸	۷/۷۴	۸/۴۶	۱۶۰	۱۵۴/۵	۲۴۴/۵۰	۳۷۶/۷	۱۷۷/۸	۲۲/۱	۲۰
۳۴/۰۷	۵۲۳/۱	۴۸۹/۳	۵/۷۷	۶/۳۴	۲۰۰	۱۹۰/۷	۹۷/۶۰	۲۷۱/۶	۲۱۹	۲۱/۳	۲۵
۲۹/۵۶	۴۵۷/۸	۴۲۸/۲	۳/۹۱	۴/۲۸	۲۳۹/۶	۲۲۵/۸	۰	۱۷۷/۸	۲۱۳/۹	۲۰/۶	۳۰
۲۵/۶۴	۳۹۷	۳۷۱/۳	۲/۱۵	۲/۴۰	۲۷۴/۶	۲۵۹/۶	۰	۳۹/۴	۱۲۰	۲۰/۲	۳۵
۱۴/۲۵	۳۳۲/۴	۳۱۸/۲	۰/۵۱	۰/۵۷	۳۰۳/۲	۲۹۲/۳	۰	۶/۲	۲۸/۷	۱۹/۲	۴۰



شکل ۳: میزان گاز انتقال یافته به کلاهک گازی به دلیل نفوذ مولکولی و تغییرات ستون نفتی (Saidi, 1987)

همانگونه که از شکل ۳ مشخص است تغییرات میزان گاز انتقال یافته از ستون نفتی به کلاهک گازی تا مدت ۲۰ سال روند افزایشی داشته و سپس کاهش می‌یابد. علت این روند کاهشی پس از مدت مذکور، گازی شدن تمام ستون نفتی در حالت عدم نفوذ مولکولی گاز است. از این زمان به بعد، گاز اضافی در حالت عدم نفوذ مولکولی از طریق مکانیزم رانش گاز محلول به کلاهک گازی انتقال می‌یابد نه از طریق نفوذ مولکولی.

شایان ذکر است که در محاسبات انجام شده، برآورد گاز محلول با فرض ستون نفتی یک بشکه در هر فوت مکعب از مخزن صورت گرفته است در حالی که در میدان نفتی هفتکل با میزان نفت درجای اولیه ۷/۴ میلیارد بشکه و ضخامت ستون نفتی اولیه ۲۰۸۰ فوت، نفت درجای اولیه در واحد عمق برابر۳/۷ میلیون بشکه است. میزان گاز اضافی مهاجرت کرده به دلیل نفوذ مولکولی پس از ۲۰ سال از شروع تولید میدان معادل ($۳۶ \times ۳/۷ \times ۱۰^{۶}$) $۱/۳ \times ۱۰^{۸}$ هزار فوت مکعب خواهد بود. این حجم گاز، تقریباً معادل ۳۲۳ میلیون بشکه از ناحیه مورد هجوم گاز مخزن را اشغال می‌نماید.

$$V = = \frac{1.3\times 10^{11} \times 14.7\ (\text{فشاراستاندار، پام}) \times 575\ (\text{دملی مخزن ، رانکین})}{1250\ (\text{فشار متوسط مخزن ،پام}) \times 485\ (\text{دملی استاندارد رانکین}) \times 5.615\ (\text{ضریب تبدیل بشکه به فوت مکعب})} = 3.23 \times 10^{8}$$

(۱۳)

به عبارت دیگر نزدیک $\frac{3.23\times 10^{8}}{1.1\ (\text{ضریب حجمی نفت})} = 2.94 \times 10^{8}$ بشکه نفت اضافی با لحاظ پدیده نفوذ مولکولی، از ناحیه مورد هجوم گاز مخزن در طی زمان بیست ساله تولید اولیه میدان، تولید می‌شود. این حجم از نفت، معادل ۱۶/۵ درصد از کل ذخایر قابل استحصال نفت میدان هفتکل و یا به عبارت دیگر ۳۲% ذخایر قابل استحصال بیست سال ابتدایی تولید از میدان تولید خواهد گردید.

اگر از مکانیزم نفوذ مولکولی در تولید مخزن اغماض گردد، راندمان جابجایی با گاز به میزان تقریبی فوق‌الذکر کمتر و به جای آن راندمان جابجایی نفت توسط آب به همان میزان، بیشتر در نظر گرفته خواهد شد.

این عامل به اشتباه راندمان جابجایی نفت توسط آب را بسیار موثرتر از راندمان جابجایی نفت توسط گاز نشان می‌دهد که باید در محاسبات موازنه مواد و مقایسه روش‌های ازدیاد برداشت مذکور، مورد توجه ویژه قرار گیرد زیرا اعمال مکانیزم‌های رایج مخازن معمولی نظیر انبساط سنگ و سیال و رانش گاز محلول، در محاسبات موازنه مواد مخازن شکافدار به منظور تطابق تاریخچه تولید این مخازن، تنها از طریق لحاظ میزان نفت درجای زیادتر و یا راندمان جابجایی بیشتر آب مقدور خواهد شد (Golf-Racht and Van, 1982).

نکته حائز اهمیت دیگر در مثال میدانی هفتکل، تغییرات ناحیه گازی شده بر حسب زمان در دو حالت نفوذ مولکولی و یا بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی گازی است که در شکل ۳ به آن اشاره شده است. همانگونه که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، در حالت نفوذ مولکولی ناحیه گازی شده، پس از ۵/۵ سال به ضخامت ۶۰/۵ فوت رسیده و سپس ثابت می‌ماند، درصورتی‌که در حالت عدم نفوذ مولکولی، ضخامت ناحیه گازی شده پس از ۲۸ سال به میزان ۶۶۲ فوت و سپس به سوی ناحیه آبی شده مخزن گسترش خواهد یافت. ضخامت ثابت ناحیه گازی شده ۶۰/۵ فوت از حل معادله مولکولی در مرکز بلوک کره‌ای در شرایط پایا و یکنواخت (زمان‌های طولانی) است. علیرغم اینکه مقاله مذکور مربوط به آزمایش میدانی (case Study) مکانیسم نفوذ ملکولی در یک میدان خاص است ولی به منظور بررسی تاثیر و نقش پدیده مذکور و امکان تعمیم آن به سایر میادین نفتی شکافدار، مطالعه میدانی برای یکی از میادین نفتی جنوب کشور (بی‌بی حکیمه) نیز انجام شده است. نتایج محاسبات و بررسی‌ها در این میدان نیز موید نظریه و تاثیر فرآیند نفوذ مولکولی و نقش به سزای آن در تولید نفت خصوصا در زمان‌های ابتدایی تاریخچه تولید میدان است. ناحیه مخزنی مورد مطالعه، بخشی از ناحیه تولیدی میدان بی‌بی حکیمه با میزان نفت در جای اولیه ۲/۵۶ میلیارد بشکه و ضخامت ستون نفتی ۱۰۹۳ فوت بوده است. (نفت در جای اولیه در واحد عمق ۲/۳۴ میلیون بشکه در هر فوت بوده است). محاسبات انجام شده نشان می‌دهد که تغییرات میزان گاز انتقال یافته از ستون نفتی به کلاهک گازی، در حالت برقراری نفوذ مولکولی تا مدت ۱۰ سال، به روند افزایشی خود ادامه داده و سپس به دلیل جایگزینی آن با مکانیسم رانش گاز محلول کاهش می‌یابد. میزان گاز اضافی مهاجرت کرده به دلیل نفوذ مولکولی، پس از ۱۰ سال از آغاز تولید میدان، معادل ۴۹/۳ میلیارد فوت مکعب استاندارد بوده است که با تبدیل آن به شرایط مخزنی، حجمی معادل ۷۸/۴ میلیون بشکه از ناحیه مورد هجوم گاز مخزن را شامل شده است. به عبارت دیگر در طی مدت زمان ۱۰ ساله مذکور، نزدیک به ۶۰/۳ میلیون بشکه نفت اضافی با لحاظ نمودن نفوذ ملکولی تولید شده است. این حجم نفت در حدود ۲۷ درصد کل حجم نفت تولیدی دوره ۱۰ ساله از این ناحیه میدان بوده است.

۶- نتیجه‌گیری

در مقایسه با مخازن معمولی، وجود شکاف در مخازن نفتی منجر به ایجاد مکانیزم‌های تولید و فرایند جریانی پیچیده‌تری می‌گردد. پدیده نفوذ مولکولی گاز محلول، به دلیل وجود اختلاف غلظت گاز در نفت ماتریس و شکاف و جریان همرفتی ناشی از گرادیان دما در شکاف‌های عمودی، نقش منحصر به فردی در مخازن شکاف‌دار خواهد داشت. با وقوع پدیده نفوذ مولکولی قبل از مکانیزم رانش گاز محلول در مدت تخلیه طبیعی مخزن، حجم زیادی از گاز محلول موجود در بلوک‌های ستون نفتی از طریق شکاف‌ها به کلاهک گازی انتقال یافته و منجر به کاهش فشار حباب نفت این بلوک‌ها می‌گردد.

در سناریوهای فشارافزایی مخزن از طریق تزریق گاز به کلاهک گازی، گاز موجود در کلاهک نیز می‌تواند از طریق پدیده نفوذ مولکولی به نفت موجود در ماتریس ستون نفتی منتقل شود و باعث افزایش فشار حباب نفت این بلوک‌ها گردد. برآورد میزان گاز انتقال یافته از طریق پدیده نفوذ مولکولی در مطالعه میدانی هفتکل با استفاده از روابط ارائه شده نشان داد که حجم اضافی نفت تولید شده ناشی از این پدیده در حین تخلیه طبیعی میدان در حدود ۱۶/۵ درصد کل ذخایر قابل استحصال میدان را شامل می‌شود.

در محاسبات موازنه مواد مخازن شکاف‌دار به منظور تطابق تاریخچه تولید این مخازن، در صورت عدم لحاظ پدیده نفوذ مولکولی و حجم گاز انتقال یافته به ناحیه مورد هجوم گاز کلاهک گازی، ناگریز به در نظر گرفتن میزان نفت درجای بیشتر میدان و یا راندمان جابجایی بالاتر نفت توسط آب خواهیم شد، که فرضیات صحیحی نیست. لذا در صورت اغماض نقش نفوذ مولکولی در مکانیزم تولید از مخزن، به اشتباه راندمان جابجایی با گاز (به همان میزان حجمی نفت اضافی) در مقایسه با راندمان جابجایی با آب کمتر تصور می‌شود. در صورت فعال بودن مکانیزم نفوذ مولکولی گاز، ضخامت ناحیه گازی شده در مقایسه با حالت عدم نفوذ مولکولی گاز، کاهش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت و همچنین روابط مربوط به نحوه محاسبه زمان تأخیر در رانش گاز محلول با لحاظ پدیده

نفوذ مولکولی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

علائم اختصاری

a: ضخامت/ شعاع بلوک، فوت

G_o :گرادیان نفت، پام در هر فوت

G_g:گرادیان گاز، پام در هر فوت

Z_g: سطح تماس گاز و نفت داخل شکاف، فوت

Z_b: عمقی از مخزن با فشار معادل فشار اولیه حباب، فوت

Z_o: عمق نفت، فوت

Z_w: عمق سطح تماس فعلی نفت و آب داخل شکاف، فوت

Z_{wi}: عمق سطح تماس اولیه نفت و آب، فوت

Z_d: عمقی از مخزن که فشار معادل فشار اشباع بلوک باشد، فوت

K: نرخ افت فشار گاز بر حسب زمان در سطح تماس گاز و نفت، پام در سال

m: نرخ تغییرات سطح تماس گاز و نفت، فوت بر سال

P_f (t) : فشار اشباع در عمق Z_d، پام

P_{is} (t) : فشار اشباع اولیه، پام

$P_s(t)$: فشار اشباع متوسط بلوک‌های ستون نفتی، پام

D_e: ضریب نفوذ ملکولی

P_o: فشار بدون بعد نفت

P_b: فشار حباب (اشباع) نفت، پام

$R_s(p)$: نسبت گاز محلول در نفت در فشار p

t: زمان، سال

T_g: زمان رسیدن فشار مخزن در عمق Z به فشار اولیه گاز در سطح تماس گاز و نفت، سال

$\emptyset_f$: میزان تخلخل شکاف براساس نفت درجای ماتریس

منابع

۱. کاظمی نیاکرانی، ابوالقاسم، شهاب گرامی ،سیروس قطبی و عبدالنبی هاشمی،۱۳۹۰. مدل‌سازی ترکیبی پدیده نفوذ مولکولی در تزریق گاز طبیعی به مخازن گازی و گاز میعانی شکاف‌دار کم تراوا، مدل تک بلوکی، مجله پژوهش نفت، ۶۵(۲۱): ۳-۱۷.

۲. شاه محمد، علی، ۱۳۸۷. بررسی مکانیزم‌های تولید درمخازن شکاف‌دار طبیعی، نشریه اکتشاف و تولید، شماره ۵۴ (۳).

۳. شاهوران فرد، امیر، بابک مردای، ۱۳۸۸. ارزیابی و مقایسه روش‌های ازدیاد برداشت در یکی از مخازن نفتی شکاف‌دار ایران، مجله مهندسی شیمی ایران، ۴۳(۸).

4. Ayala, L. F, 2005. Compositional modeling of naturally fractured reservoirs in multi-mechanistic flow domains, PhD dissertation, Penn. State.U., University Park, Pennsylvania.

5. Ertekin T., King G., and Schwere F, 1986. Dynamic gas slippage: a unique dual mechanism approach to the flow of gas in light formations, SPE paper, 43:20-45.

6. Fick A, 1855. On Diffusion, Pogg. Ann. Phys. Chem, 59-86.

7. Golf-Racht T. D. Van, 1982. Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering, Elsevier Scientific Publishing Company.

8. Hadiato D., Madaoui K., Pacsirszky J, 1985. Laboratory study of Molecular Diffusion under Reservoir Conditions, Proc. Indonesian Pet. Association, 14th Annual Convention Proceedings, 1: 227-242.

9. Hoteit H. & Firoozabadi A, 2006. Nuerical modeling of diffusion in fractiured media for gas injection and recycling schemes, SPE paper, No. 103292.

10. Kazemi Alireza and Mohammad Jamialahmadi, 2009. The Effect Of Oil And Gas Molecular Diffusion In Production Of Fractured Reservoir During Gravity Drainage Mechanism By CO2 Injection, EUROPEC/ EAGE Conference and Exhibition, 8-11 June, Amsterdam, The Netherlands.

11. Lie, holme, 2013. Diffusion as an Oil Recovery Mechanism During CO_2 Injection in Fractured Reservoirs, The University of Bergen, Department of Physics and Technology.

12. Pruess K, 1980. a Practical Method for modeling Fluid and Heat Flow in Fractured Porous Media,

13. 6th Annual Meeting of SPE, Society of Petroleum Engineers, New Orleans, Louisiana, 25: 14-26.

14. Saidi A. M. 1987. Engineering of Fractured Reservoirs (Fundamental and Practical Aspects), Total.

The Influence of Molecular Diffusion Mechanism in the Production of Fractured Oil Reservoirs

Zoha Vatani[1*], Iman Farzad [2]

1- Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran

2- Iranian Central Oil Fields Company, East Oil & Gas Production Company

E-mail:z.vatani@yahoo.com

Abstract

Molecular diffusion of solution/non-equilibrium gas between oil within the matrix blocks and fracture system in the gassing zone is an important production mechanism of naturally fractured reservoirs. In well-to- moderately fractured reservoirs, the process of molecular diffusion, due to convective currents in the fissures will be active and large volumes of gas would be transported to the gas cap as reservoir pressure declines and consequently results in bubble-point pressure depletion of the oil zone. Conversely, in gas injection scenarios, molecular diffusion can transfer the gas of the gas cap to the matrix blocks and increases the bubble-point pressure of the oil. In order to evaluate the contribution of molecular diffusion in oil production of fractured reservoirs, production history of Haft-kel field was analyzed. Gas-in-place calculations indicated that in case of diffusion, extra oil of about 16.5 percent of the total recoverable reserve is produced during primary natural depletion period (20 years) of the reservoir. In other words, in the case of non-inclusion of molecular diffusion, material balance calculations overestimates oil displacement efficiency by water than that by gas to a value equal to amount of transported gas to the gas-invaded zone of the reservoir by diffusion process.

Key words: Bubble-Pint Pressure Elevation/Depression, Fractured Oil Reservoirs, Gassing Zone, Molecular Diffusion, Solution-Gas Drive