

# Određivanje difuzije plina i koeficijenata granična površina- transfer mase u pukotini sustava matriksa zasićenog teškom naftom

E. Zamanian, M. Hemmati and M. S. Beiranvand

IZVORNI ZNANSTVENI ČLANAK

Za modeliranje i simulaciju pridobivanja nafte iz prirodno raspucalih ležišta za vrijeme injektiranja plina ključna je točna vrijednost koeficijenta molekularne difuzije (MDC - molecular diffusion coefficient) plinova iz pukotine zapunjene plinom u matriksu nafte. Za vrijeme injektiranja miscibilnih fluida s naftom, transport injektirane supstance i nafte je pod preovladavajućim utjecajem svojstava pukotina i matriksa. Difuzija između matriksa i fraktura je važan mehanizam pridobivanja nafte. Međutim, eksperimentalno utvrđeni podaci koji se tiču prijenosa plina između sustava fraktura-matriks mehanizmom difuzije relativno su rijetki. U ovoj studiji je primjenjena metoda opadanja tlaka kako bi se dobio stvarni koeficijent molekularne difuzije CO<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub> u poroznom mediju zasićenom teškom naftom pri različitim temperaturama. Koeficijenti difuzije plina i transfer mase po površini razdjela određeni su primjenom modela ravnoteže prijelaznog stanja difuzije.

Također je ispitano djelovanje postojanja poroznog medija na te koeficijente.

Očekuje se da će eksperimentalni rezultati biti korisni u određivanju djelovanja difuzije na transfer matriks-fraktura, što je potrebno za simulaciju pridobivanja u prirodno raspucanim ležištima.

Ključne riječi: koeficijent molekularne difuzije, transfer mase po površini razdjela, fraktura, porozni (šupljikavi) matriks, teška nafta, raspucano ležište

## 1. Uvod

Veliki dio dokazanih rezervi nafte u svijetu pronađen je u prirodno raspucanim ležištima (NFR - naturally fractured reservoirs). Ciljna nafta u NFR nalazi se matriksu stijene. Tijekom injektiranja materijala za tercijarno pridobivanje, koji su miscibilni s naftom matriksa, tj. ugljikovodičnih otapala, alkohola, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, itd., mreža pukotina stvara put za injektirana otapala kako bi se zaobišlo i ostavilo zone neistisnute nafte u matriksu. Iz ove izbjegnute zone može se pridobiti značajna količina nafte maksimiziranjem naknadnog transverzalnog strujanja ili transferom mase između frakture i medija. U ovakvim vrstama ležišta, transport injektirane supstance i nafte je pod preovladavajućim utjecajem svojstava pukotina i matriksa. Difuzija je značajan mehanizam pridobivanja nafte transferiranjem mase između matriksa i frakture. Slični procesi se mogu sresti tijekom skladištenja stakleničkih plinova te transporta zagađivača u podzemna ležišta. Štoviše, u pridobivanju teške nafte iz prirodno raspucanih ležišta miscibilnim metodama povećanja iscrpka nafte (EOR), poput miscibilnog istiskivanja nafte plinom, ključna je uloga difuzijskoga mehanizma u unaprjeđenju pridobivanja nafte.<sup>13</sup>

Za teške nafte u prirodno raspucanim ležištima, uloga difuzijskog procesa kod metoda miscibilnog pridobivanja nafte, kao što je miscibilno istiskivanje nafte plinom, biti će jača radi njihove velike viskoznosti. Stoga je za izračun brzine rastapanja plina u teškoj nafti

ključna točna vrijednost koeficijenta molekularne difuzije (MDC) plinova u pukotinama ispunjenim plinovima u matriksu zasićenom teškom naftom.

Međutim, eksperimentalno određeni podaci koji se odnose na transfer plina mehanizmom difuzije, između sustava fraktura - matriks, su relativno rijetki u dostupnoj literaturi a većina objavljenih vrijednosti podataka difuzije odnosi se na ukupne sustave, kod nepostojanja poroznih medija.

Difuzija u poroznom matriksu proučavana je od početka 20-tog stoljeća, posebno u homogenom mediju s međuzrnskom poroznošću. Neke od studija<sup>7,11</sup> bile su fokusirane na pronalaženje odnosa između molekularne difuzije, zavojitosti pornih kanala, faktora otpora formacije i MDC stvarnog matriksa. Međutim neki su istraživači usmjerili svoj interes na mjerenja MDC koristeći indirektno metode. Npr. jedna od uobičajenih metoda je utvrđivanje protjecanja plina na jednom kraju bloka matriksa zasićenog kapljevinom i mjerenje promjena koncentracije na izlaznom strujanju.<sup>12</sup> U takvom je sustavu vrlo teško mjeriti promjene koncentracije strujanja jer su promjene uglavnom vrlo male. Renner<sup>12</sup> je mjerio koeficijente difuzije ugljikovodičnih plinova u konsolidiranom poroznom mediju zasićenom dekanom (alkanski ugljikovodik) i slanom vodom s tlakom do 6 MPa. On je za predviđanje koeficijenta difuzije razvio korelaciju kao funkciju viskoznosti kapljevine i termo-fizičkih svojstava difuzivnih plinova. Međutim, u toj studiji je difuzivnost

lakah plinova u teškoj nafti, korelirana kao funkcija temperature, viskoznosti nafte i molekularne težine difuzivnih plinova.

Među svim razvijenim eksperimentalnim metodama za mjerenje difuzivnosti u kapljevinama, metoda opadanja tlaka, koju je prvi koristio Riazi<sup>9</sup>, privukla je veliku pažnju zbog svoje jednostavnosti i robusnosti. On je mjerio difuzivnost tekućeg pentana registriranjem i brzine pada tlaka i micanja granice razdjela između plina i kapljevine zbog bubrenja pentana. Kasnije su Zhang<sup>14</sup> i suradnici koristili tu metodu za razrjeđivanje otopine plinovitog otapala u teškoj nafti. Oni su razvili pojednostavljeni eksperimentalni postupak i matematičko rješenje kojim su doveli u odnos brzinu pada tlaka i difuzivnost. Civan i Rasmussen<sup>3,4</sup> su razvili matematički model za daljnju studiju eksperimentalnog rada Zhanga i suradnika<sup>14</sup> s ciljem procjene koeficijenta difuzivnosti plina. Rad su završili s dva modela, jedan za stanje ravnoteže i drugi za stanje neravnoteže. Model neravnoteže objašnjava kašnjenje transporta plina u tekućoj fazi. Međutim, njihov je rad bio ograničen na ukupne sustave bez odgovarajućeg ispitivanja učinka poroznog medija na difuziju.

U ovom radu je provedeno iscrpno eksperimentalno istraživanje na učinkovitom određivanju molekularne difuzije CO<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub> sustava teške nafte u homogenom poroznom matriksu. Posebno, korištena je staklena kuglica dobro određenih dimenzija u opsegu 0,0177 - 0,0297 cm i poroznosti od 0,43. Za mjerenje molekularne difuzije plinova u teškoj nafti, korištena je takozvana metoda opadanja tlaka. Ovaj rad ujedno prezentira metodu koja može praviti razliku između različitih faza u procesu difuzije.

## 2. Pokusi

Postavke pokusa pada tlaka prilagođene su za mjerenje stvarnog koeficijenta molekularne difuzije (MDC) čistog CO<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub> u staklenim kuglicama zasićenih teškom naftom. Sastavni dijelovi teške nafte i odgovarajući sastav, prethodno određeni korištenjem metode plinske kromatografije, prikazani su u tablici 1.

Početna ispitivanja provedena su kako bi se ispravile greške postavki. Difuzijska ćelija bila je okružena zračnom kupkom kontrolirane temperature, kako bi se povećala temperatura difuzijske ćelije na željenu vrijednost do 50 °C, kao što je prikazano na slici 1. Kupka je opremljena visoko tlačnim plinskim spremnikom od nehrđajućeg čelika, volumena 20 000 cm<sup>3</sup> za pohranjivanje plina kod željene temperature i tlaka. Spremnik je spojen na vrh difuzijske ćelije. Slijepa difuzijska ćelija volumena 730 cm<sup>3</sup> izađena je kako bi se djelomično ispunila staklenim kuglicama zasićenih naftom, što je nekonsolidirani porozni medij. Sito s otvorima mreže od 50 do 80 korišteno je kako bi se dobila zrna željene veličine. Izmjerena je poroznost od 43%. Korištena je i vizualna ćelija, volumena 559 cm<sup>3</sup>, što je omogućilo osmatranje nivoa kapljevine tijekom procesa difuzije. Osmatranjem je razjašnjeno da se površina razdjela ne mijenja značajno tijekom vremena. Kako bi se tijekom eksperimenta mjerile promjene tlaka u ćeliji, točan digitalni pretvornik tlaka spojen je na

Tablica 1. Sastav teške nafte

Komponente	Otplinjena nafta (mol%)
C <sub>6</sub>	2,84
C <sub>7</sub>	2,76
C <sub>8</sub>	4,63
C <sub>9</sub>	5,63
C <sub>10</sub>	5,26
C <sub>11</sub>	2,33
C <sub>12+</sub>	76,55
Ukupno	100,00

prirubnicu na vrhu. Difuzijska ćelija podnosi tlak do 200 bara i temperature do 130 °C.

Kod pripreme ispitivanja opadanja tlaka difuzivnosti, plin je na početku uveden u plinski spremnik s visokim tlakom. Sustav je ostavljen približno 24 sata na željenoj temperaturi kako bi osigurali izotermalni uvjeti u cijelom sustavu. Nakon toga je trokraki ventil na vrhu spojen na plinski spremnik visokog tlaka. Kada je početni tlak u instrumentu dosegnuo željenu vrijednost, ventil na vrhu je zatvoren i eksperiment je započeo. Kako bi se izbjeglo mješanje između konvekcije i difuzije, vrijeme injektiranja plina (~2 minute), mora biti vrlo malo u usporedbi s karakterističnim vremenom difuzije. S prolazom vremena, plin se širi u naftu a tlak inklinira polaganom padu u prostoru plina. Prikupljanje kompletnog seta podataka tlak-vrijeme obično traje 10-30 dana. Tada se koeficijent difuzije može odrediti iz podataka tlak-vrijeme.

## 3. Teorija

### 3.1 Model transfera mase

Kada je plin injektiran u instrument za mjerenje tlaka koji sadrži uzorak teške nafte, do direktnog kontakta između injektiranog plina i teške nafte dolazi na granici njihovog razdjela. Nakon toga plin se postepeno rastapa u teškoj nafti, dok se nafta potpuno ne zasiti s plinom. Shematski dijagram sustava plin-teška nafta prikazan je slici 2., kada je granica plin-teška nafta na  $x = 0$ , a dno instrumenta za mjerenje tlaka na  $x = L$ .

Otapanje plina u teškoj nafti je modelirano uz pretpostavku da je brzina kojom plin napušta instrument jednaka brzini rastapanja plina u ćeliji. Ovo vrijedi jer teoretski nikakav plin se ne akumulira u plinskoj kapi. Dakle, znajući početni tlak u spremniku i oduzimajući izmjereni tlak od njega, moguće je dobiti količinu transferiranog plina iz opskrbe ćelije do difuzijske ćelije u odnosu na vrijeme. Kao što je objašnjeno u eksperimentalnom dijelu, ovaj se transfer događa samo u slučaju kada dolazi do potražnje u difuzijskoj ćeliji. Kao rezultat raspadanja, potražnja ovog plina se smanjuje je koncentracija u stupcu kapljevine jednaka koncentraciji njegovog zasićenja. Stoga jednadžba 1 modelira ravnotežu plina u opskrbenj ćeliji. Jednadžba ravnoteže mase plina u opskrbenj ćeliji je:

$$\frac{M_g h}{RT} \left( \frac{P_0}{z_0} - \frac{P}{z} \right) = Q \quad t > 0 \quad (1)$$

Gdje su  $p$  i  $T$ , tlak i temperatura plina,  $R$  je univerzalna plinska konstanta,  $z = z(p, T)$  predstavlja stvarni faktor odstupanja plina od idealnog, koreliran empirijski kao funkcija tlaka i temperature a  $Q$  označava kumulativnu masu plina rastopljenog u kapljevitj fazi po jedinici poprečnog presjeka površine razdjela plin/kapljevina.

Civian (2001.) je razvio za  $Q$  slijedeći izraz:

$$Q(t) = \int_0^L [C(x, t) - C_0] dx = L \int_0^1 \left[ C\left(\frac{x}{L}, t\right) - C_0 \right] d\left(\frac{x}{L}\right) \quad (2)$$

gdje je  $L$  visina stupca kapljevine.

Primjenom jednadžbe kontinuiteta i Fickovog zakona, proces molekularne difuzije se može opisati kao nestacionarno stanje i jednodimenzionalni sustav.<sup>1</sup>:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3)$$

gdje je  $C(x, t)$  molarna koncentracija plina u teškoj nafti,  $x$  je udaljenost od dna instrumenta za mjerenje tlaka,  $t$  je vrijeme i  $D_{eff}$  je stvarni molekularni koeficijent difuzije (MDC) plina u teškoj nafti, uz pretpostavku da je neovisan o koncentraciji plina.

Slijedeća granica i početni uvjeti mogu se uzeti u obzir za koncentraciju:

- Predpostavljeno je da je transfer mase na površini razdjela proporcionalan razlici između koncentracije zasićenja kod ravnotežnog tlaka i postojeće koncentracije na površini razdjela:

$$D \frac{\partial C}{\partial x_{x=0}} = (C_{sat}(p_{eq}) - C(x, t)) \quad t > 0 \quad (4)$$

- Uzorak nafte je mrtva sirova nafta a početni uvjet je:

$$C(x, t)|_{t=0}, \quad 0 \leq x \leq L \quad (5)$$

- Uvjet beskonačnog razmaka je:

$$C(x, t)|_{x \rightarrow \infty}, \quad t > 0 \quad (6)$$

- Uvjet izoliranog dna spremnika je:

$$\frac{\partial C}{\partial x_{x=L}} = 0, \quad t > 0 \quad (7)$$

Bezdimenzijski oblik jednadžbi može se urediti izvodeњem slijedećih bezdimenzijskih parametara:

$$C_D = \frac{C(x, t)}{C_{sat}(p_{eq})} X_D = \frac{x}{L} t_D = \frac{t_D}{L^2} K_D = \frac{k_D}{L} \quad (8)$$

Ovdje se  $k_D$  naziva Biot broj transfera mase.

Funkcija bezdimenzijske akumulacije mase može se izraziti kao:

$$Q_D(t_D) = \int_0^1 C_D(x_D, t_D) dx_D \quad (9)$$

Jednadžba (1) može se napisati u bezdimenzijskom obliku

$$\frac{M_g h}{RTL(C_{sat}(p_{eq}))} \left[ \frac{p_0}{z_0} - \frac{p}{z} \right] = Q_D(t_D), \quad t > 0 \quad (10)$$

Jednadžba (10) može se primjeniti na bilo koju izabranu referentnu vrijednost tlaka  $p_r$  mjereno u bezdimenzionalnom vremenu  $t_{Dr}$  da bi se dobilo

$$\frac{M_g h}{RTL(C_{sat}(p_{eq}))} \left[ \frac{p_0}{z_0} - \frac{p_r}{z_r} \right] = Q_D(t_{Dr}), \quad t > 0 \quad (11)$$

Odabirom referentnog tlaka, jednakog tlaku ravnoteže dobiti će se kombinacijom jednadžbi (10) i (11) slijedeći izraz<sup>4</sup>:

$$Q_D(t_D) = \frac{\left[ \frac{p_0}{z_0} - \frac{p(t_D)}{z(t_D)} \right]}{\left[ \frac{p_0}{z_0} - \frac{p_{eq}}{z_{eq}} \right]} \quad (12)$$

Svi parametri za određivanje desne strane jednadžbe (12) su poznati ili se mogu izračunati iz naših eksperimentalnih podataka. Lijeva strana jednadžbe (12) riješena je metodom Civiana.<sup>4</sup> Riješenja jednadžbi (2) do (6), za konačno i beskonačno djelovanje, dana su kako slijedi:

• **Kratkoročno (polubeskonačno) rješenje ( $L \rightarrow \infty$ )**

Analičko rješenje za polubeskonačna područja dano je slijedećom jednadžbom;

$$Q_D^{ST}(t_D) = \frac{1}{k_D} \exp(k_D^2 t_D) \operatorname{erfc}(k_D \sqrt{t_D}) - 1 + 2k_D \sqrt{\frac{t_D}{\pi}} \quad (13)$$

Kada je  $t_D$  vrlo veliko, kratkotrajna aproksimacija jednadžbe (13) približava asimptote<sup>4</sup>:

$$Q_D^{ST}(t_D) \cong 2\sqrt{\frac{t_D}{\pi}} - \frac{1}{k_D}, \quad k_D \sqrt{t_D} \rightarrow \infty \quad (14)$$

U praksi dugotrajan postupak kratkotrajne aproksimacije primjenjuje se na neki srednji raspon ukupnih varijacija vremena. Stoga, kada se  $Q_D$  nanese nasuprot  $\sqrt{t_D}$ , može se očekivati da će srednji raspon krivulje biti gotovo paralelan ili se poklapati s ravnom linijom asimptote, prema jednadžbi (14).

• **Dugoročno (konačne duljine) rješenje**

Analičko rješenje za model konačnog djelovanja dano je u slijedećem bezdimenzionalnom obliku:

$$Q_D(t_D) = 1 - 4 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \lambda_m}{2\lambda_m + \sin(2\lambda_m)} \exp(-\lambda_m^2 t_D) \quad (15)$$

gdje  $\lambda_m$  označuje korijene od

$$\lambda_m \tan \lambda_m = k_D \quad (16)$$

Kada je vrijeme  $t_D$  veliko, samo je glavni član u beskonačnoj seriji rješenja značajan a jedn. (15) se može pojednostavniti kao:

$$Q_D(t_D) = 1 - Q_1(\lambda_1) \exp(-\lambda_1^2 t_D) \quad (17)$$

gdje je

$$Q_1(\lambda_1) \equiv \frac{4 \sin^2 \lambda_1}{\lambda_1 [2\lambda_1 + \sin(2\lambda_1)]} \quad (18)$$

To je poznato kao dugoročna aproksimacija. Parametar  $\lambda_1$  je najmanji pozitivni korijen transcendentne jednadžbe  $\lambda_1 \tan \lambda_1 = k_D$ . Gornja granica  $\lambda_1 = \pi / 2$  odgovara  $k_D \rightarrow \infty$ , što pak odgovara slučaju za površinu Diriclet tipa graničnog uvjeta, kod kojeg je njegova koncentracija jednaka stanju ravnoteže. Prirodni logaritam jedn. (17) dovodi do rezultata<sup>4</sup>:

$$\ln[1 - Q_D^{LT}(t_D)] = \ln[Q_1(\lambda_1)] \lambda_1^2 t_D \quad (19)$$

Na taj način, iscertavanje prirodnog logaritma  $\ln[1 - Q_D^{LT}(t_D)]$  nasuprot  $t_D$  daje krivulju ravne linije. Koristeći tu metodu dva nepoznata koeficijenta  $D_{eff}$  i  $k$  mogu se izlučiti iz danog skupa podataka pada tlaka.

#### 4. Eksperimentalni rezultati i rasprava

Mjereni podaci za četiri izvođenja pada tlaka prikazani su na slici 3. Slika 3. uključuje podatke koji se odnose na 4 izvođenja uz postojanje poroznog medija i ukupnog sustava (u odsutnosti poroznog medija). Cilj je objasniti eksperimentalne podatke i pronaći vrijednosti koeficijenta difuzije  $D$  i koeficijenta  $k$  granična površina-transfer mase.

##### 4.1. Analize asimptotskog ponašanja kroz dugi vremenski period, za kraći period

Krivulja ravne linije za asimptotsko ponašanje kroz dugi vremenski period za kratkoročno rješenje na crtežu  $Q_D(t_D)$  nasuprot  $\sqrt{t}$  (vidi sl. 4 do 7) sugeriraju sustavnu metodu za izdvajanje vrijednosti koeficijenta difuzije  $D$  i koeficijenta  $k$  granična površina-film, povezanih s danim fizičkim eksperimentom. Na osnovi jedn. (14), ova se relacija može izraziti kao

$$Q_D(t_D) = -a_{ST} + b_{ST} \sqrt{t} \quad (20)$$

u kojem su sjecište i nagib ravne linije slijedeći

$$a_{ST} = \frac{1}{K_D}, \quad b_{ST} = \frac{2}{L} \sqrt{\frac{D}{\pi}} \quad (21)$$

Prema tome, koeficijent difuzije  $D$  i koeficijent  $k$  granična površina-masa-transfer se može izračunati na slijedeći način:

$$D = \frac{\pi L^2 b_{ST}^2}{4} \quad (22)$$

$$k = \frac{D}{L} k_D = \frac{D}{L a_{ST}} \quad (23)$$

Koeficijenti dobiveni ovom aproksimacijom dani su u tablici 2.

##### 4.2. Analize za dugi vremenski period

Ravnolinijski oblik krivulja za veliki vremenski period na semilogaritamskim prikazima (sl. 8 do 10) ukazuje sustavnu metodu izdvajanja vrijednosti koeficijenta difuzije  $D$  i koeficijenta  $k$  granična površina-film, iz podataka vezanih za dani fizički eksperiment. Aproksimacija za dugi vremenski period jedn. (17)

izražena je u obliku stvarnog vremena  $t$ . Eksperimentalni podaci mogu se korelirati s ravnom linijom pomoću analiza regresije u slijedećem obliku:

$$\log_{10}[1 - Q_D] = -a_{LT} - b_{LT} t \quad (24)$$

gdje su sjecište na  $y$  osi i nagib linije, mjereni za jedinično vrijeme:

$$a_{LT} = -\log[Q_0^{LT}(\lambda_1)] = -\log\left\{\frac{4 \sin^2(\lambda_1)}{\lambda_1 [2\lambda_1 + \sin(2\lambda_1)]}\right\} \quad (25)$$

$$b_{LT} = 0,4343 \lambda_1^2 \frac{D}{L^2} \quad (26)$$

Jedn. (25) omogućuje određivanje  $\lambda_1$  pa tako i  $k_D$  pomoću relacije  $\lambda_1 \tan \lambda_1 = k_D$  dane jednadžbom (16). Prema tome  $k_D$  masa-transfer potpuno je određen sjecištem na osi  $y$ .

Imajući  $\lambda_1$ , koeficijent difuzije  $D$  dobiven je iz jedn. (26):

$$D = \frac{b_{LT} L^2}{0,4343 \lambda_1^2} \quad (27)$$

$k_D$  je izračunat u jedn. (16):

$$(28)$$

Konačno, koeficijent  $k$  granična površina-transfer može se odrediti:

$$k_D = \lambda_1 \tan \lambda_1 \quad (29)$$

Koeficijent difuzivnosti i koeficijent transfera mase granične površine dobiveni ovom metodom prikazani su u tablici 2. Rezultat pokazuje da su vrijednosti difuzije u kratkom vremenu više od vrijednosti u dugom vremenskom periode, a brzina transfera mase opada u dugom vremenskom periodu.

Rezultati u tablici 2. također pokazuju da je molekularna difuzija u nazočnosti poroznog medija manja nego kada ga nema. Razlog tome je međusobna povezanost sustava pora, poznata kao zavojitost pornih kanala, koja izravno djeluje na stazu kretanja molekula plina i stvarnu površinu kontakta plina i teške nafte, koja je jednaka površina puta porozitet (tj.  $A_{effective} = A \cdot \phi$ ). Usporedba trenda opadanja tlaka i u bulk sustavima i u poroznim sustavima, pokazuje da je brzina pada tlaka smanjena a vrijeme potrebno za tlak ravnoteže je povećano, kao što je prikazano na slici 3. To znači da se u poroznim medijima i topljivost i difuznost smanjuju u usporedbi s bulk sustavima. Također, na istoj temperaturi difuznost ugljikovog dioksida relativno jednaka difuznosti tijekom beskonačnog razdoblja, dok je na dulje vrijeme difuznost  $CO_2$  bila viša nego za metan. To bi moglo biti zbog činjenice da su s povećanjem molekularne sličnosti, molekularna difuznost i topivost u konačnom stanju ravnoteže također povećane. Zbog toga će rezultirajuća difuznost ugljikovog dioksida biti povećana zbog njegove veće molekularne težine nego što je to kod metana.

Nadalje, usporedbom izvođenja eksperimenta 1 i 3 (slika 3.) može se zapaziti utjecaj temperature na proces difuzije. Oni su pokazali da se s porastom temperature brzina opadanja tlaka povećava a konačni ravnotežni

Tablica 2. Eksperimentalni rezultati za opadanje tlaka, difuzivnosti i koeficijenta transfera mase

Parametri	Izvođenje 1	Izvođenje 2	Izvođenje 3	Izvođenje 4
Otopljena tvar	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Sustav	Porozni medij	Porozni medij	Porous Media	Bulk
T (°C)	25	25	50	50
p <sub>i</sub> (kPa)	545 0	539 0	544 0	568 0
a <sub>ST</sub>	0,107 89	0,14	0,062 7	0,090 5
b <sub>ST</sub> (dan <sup>-1</sup> )	0,013 4	0,020 4	0,949 5	1,273 9
a <sub>LT</sub>	0,393 88	1,396 8	0,543 5	0,876 9
b <sub>LT</sub> (dan <sup>-1</sup> )	0,000 192	0,000 11	0,372	0,573 0
λ <sub>1</sub>	2,127 3	2,280 9	2,275 7	2,517 5
D × 10 <sup>9</sup> (m <sup>2</sup> /s) (kratkoročno)	13,26	30,88	44,68	226,8
D × 10 <sup>9</sup> (m <sup>2</sup> /s) (dugoročno)	9,195	0,2194	10,78	37,05
k × 10 <sup>7</sup> (m/s) (kratkoročno)	17,77	29,39	94,90	202,1
k × 10 <sup>7</sup> (m/s) (dugoročno)	4,19	0,031 9	3,846	5,416

tlak opada. To znači da se na većim temperaturama i topivost i difuznost povećavaju. Drugim riječima, kod takvih uslova više plina se brže otopi u teškim naftama.

## 5. Zaključak

Eksperimentalni postav visokog tlaka je dizajniran i konstruiran za mjerenje stvarne molekularne difuzije metana i ugljikovog dioksida između pukotina ispunjenih plinom sustava matriksa, zasićenih teškom naftom kod željenih uvjeta. Provedena su različita izvođenja eksperimenta pod različitim uvjetima. Koeficijenti molekularne difuzije su određeni korištenjem modela difuzije ravnoteže prijelaznog stanja. Određen je i koeficijent kratkoročne i dugoročne molekularne difuzije i koeficijent transfera mase. Rezultat pokazuje da koeficijenti difuzivnosti i transfera mase metana manji nego za ugljikov dioksid pa će injektiranje CO<sub>2</sub> biti učinkovitije nego injektiranje CH<sub>4</sub>.

Također, prisutnost poroznih medija znatno će usporiti proces difuzije i prema tome smanjiti difuzivnost plina. Štoviše, uočeno je da temperatura ima izravan utjecaj i na topljivosti i na difuzivnost plinova, tako da s povećanjem temperature raste i brzina otapanja plina u teškoj nafti kroz proces difuzije.

Konačno, rezultat ovog rada biti će koristan kod simulacije sastava nafte i modeliranja transfera mase u matriks tijekom injektiranja otapala u raspucana i ležišta teške nafte.

## 6. Popis naziva

A	Poprečni presjek ćelije (cm <sup>2</sup> )
C(x,t)	Koncentracija plina u poroznom mediju zasićenog (mol/cm <sup>3</sup> )
C <sub>sat</sub> (p <sub>eq</sub> )	koncentracija zasićenja plina u nafti ispod tlaka ravnoteže (mol/cm <sup>3</sup> )
D <sub>eff</sub>	Stvarni koeficijent molekularne difuzije (m <sup>2</sup> /s)
D <sub>0</sub>	Predeksponencijalni faktor (m <sup>2</sup> /s)
E <sub>a</sub>	Energija aktivacije potrebna za difuziju (cal/mol)

h	Visina plina u ćeliji (cm)
k	Koeficijent transfera mase na graničnoj površini (m/s)
p(t), p <sub>eq</sub>	Izmjereni, odnosno tlak ravnoteže (kPa)
Q	Kumulativna masa plina rastopljenog u kapljevitoj fazi po jedinici poprečnog presjeka površine (kg/m <sup>2</sup> )
R	Univerzalna plinska konstanta (8314 kPa.cm <sup>3</sup> /mol.K) ili (1.987cal/mol.K)
t	Vrijeme (s)
T	Temperatura (°C ili K)
V	Volumen plina u komori (cm <sup>3</sup> )
t	Broj vremenske serije t=t <sub>i</sub> , i=1,2,...,n
x	Položaj duž difuzijske komore (cm)
L	Visina nafte u komori (cm)
z	Faktor odstupanja (stlačivosti) plina

## 7. Grčki znakovi

λ	Korijeni jedn. 25, Bezimenzijski
---	----------------------------------

## 8. Indeksi

D	Bezimenzijski
---	---------------



Autori:

\*Ehsan Zamanian, Petroleum Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, Research Institution of Petroleum Industry (R.I.P.I.)-Polymer Division

Mahmoud Hemmati, Research Institution of Petroleum Industry (R.I.P.I.)-Polymer Division

Mahmoud Safar Beiranvand, Institute of Petroleum Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

\*Corresponding author: Ehsan Zamanian, Amirkabir University of Technology, Dept. of Petroleum Engineering, Tehran, Iran, mobile: +989166070369, zamanian.e@gmail.com

UDK: 622.24.63 : 553.982 : 553.28 : 519.876.2

622.24.63	bušotine, iscrpljivanje ležišta
553.982	ležišta nafte i plina, rezerve, teška nafta
553.28	vrste ležišta, osobine ležišta, raspucana ležišta
519.876.2	simulacije