Dvofazno protjecanje kapljevine u uzlaznim cijevima

Bujanić, Branimir

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:521216

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Preddiplomski studij naftnog rudarstva

DVOFAZNO PROTJECANJE KAPLJEVINE U UZLAZNIM CIJEVIMA

Završni rad

Branimir Bujanić

N4214

Zagreb, 2020.

Sveučilište u Zagrebu Završni rad

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

DVOFAZNO PROTJECANJE KAPLJEVINE U UZLAZNIM CIJEVIMA

BRANIMIR BUJANIĆ

Završni rad je izrađen: Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku

Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Prilikom pridobivanja fluida iz ležišta kroz uzlazne cijevi do površine, odvija se dvofazno protjecanje (kapljevina i plin). Stoga je bitno poznavati sve varijable koje utječu na dvofazno protjecanje kako bi proizvodnja ugljikovodika bila što efikasnija, odnosno da se što duže sačuva energija ležišta. Najvažnija fizikalna veličina koja utječe na iznošenje fluida je ležišni tlak. Tijekom proizvodnje dolazi do pada tlaka, a najveći pad tlaka se ostvaruje u uzlaznim cijevima. Proračun gradijenta tlaka, gubitak tlaka po jedinici duljine, zasniva se na zakonu o održanju energije i pomoću te jednadžbe proučava se utjecaj određenih varijabli na gradijent tlaka. Razvijene su različite empirijske metode koje se bave proračunom gradijenta tlaka i utjecajem varijabli na njega, što je i tema ovog završnog rada.

Ključne riječi: dvofazno protjecanje, gradijent tlaka, metode određivanja gradijenta tlaka

Završni rad sadrži: stranica, slika, tablice,

Jezik izvornika: Hrvatski

Završni rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Vladislav Brkić, docent RGNF-a

Ocjenjivači: 1. Dr. sc. Vladislav Brkić, docent RGNF-a

2. Dr. sc. Sonja Koščak Kolin, docentica RGNF-a

3. Dr. sc. Domagoj Vulin, izv.prof. RGNF-a

Datum obrane: 11.9.2020., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....iv

POPIS TABLICA.....v

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA.....vi

1. UVOD.....1

2. TEMELJNI ZAKONI PROTJECANJA.....3

3. VARIJABLE DVOFAZNOG PROTJECANJA.....6

3.1.1 Zaostajanje kapljevine.....6

3.1.2 Gustoća.....8

3.1.3 Brzina protjecanja.....9

3.1.4 Viskoznost.....10

3.1.5 Površinska napetost.....11

3.2 Jednadžba gradijenta tlaka za dvofazni protok.....12

4. STRUKTURA DVOFAZNOG PROTJECANJA.....15

5. UTJECAJ VARIJABLI NA GRADIJENT TLAKA PRI DVOFAZNOM PROTJECANJU.....19

5.1 Protok kapljevine.....20

5.2 Omjer plina i kapljevine.....21

5.3 Omjer vode i nafte ili udio vode u kapljevini.....23

5.4 Viskoznost kapljevine.....24

5.5 Promjer tubinga.....25

6. GUBITCI TLAKA.....28

7. METODE ODREĐIVANJA GRADIJENTA TLAKA PRI DVOFAZNOM PROTJECANJU.....30

7.1 Metoda Poettmanna i Carpentera.....31

7.2 Metoda Hagerdorna i Browna.....35

7.3 Metoda Dunsa i Rosa.....40

7.4 Usporedba metoda.....42

8. ZAKLJUČAK.....44

9. LITERATURA.....45

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Strujnice i strujna cijev.....4

Slika 4-1. Strukture dvofaznog protjecanja.....16

Slika 4-2. Strukture vertikalnog dvofaznog protjecanja u funkciji superficijalnih brzina.....17

Slika 4-3. Strukture horizontalnog dvofaznog protjecanja u funkciji superficijalnih brzina.....18

Slika 5-1. Utjecaj protoka kapljevine na gradijent tlaka.....21

Slika 5-2. Utjecaj omjer plina i kapljevine (GLR) na gradijent tlaka.....22

Slika 5-3. Utjecaj udjela vode u kapljevini, uz konstantan GLR, na gradijent tlaka.....23

Slika 5-4. Ukupni utjecaj udjela vode u kapljevini na gradijent tlaka.....24

Slika 5-5. Kombinirani utjecaj gustoće i viskoznosti nafte na gradijent tlaka.....25

Slika 5-6. Utjecaj promjera tubinga na gradijent tlaka, odnosno na dinamički tlak u bušotini.....26

Slika 5-7. Određivanje maksimalnog promjera tubinga.....27

Slika 5-8. Utjecaj promjera tubinga na minimalno potrebni protok kapljevine.....27

Slika 6-1. Mogući gubitci tlaka u proizvodnom sutavu bušotine.....28

Slika 7-1. Poettmann-Carpenterova korelacija faktora trenja.....35

Slika 7-2. Korelacije Hagerdorna i Browna.....38

Slika 7-3. Moodyjev dijagram.....40

Slika 7-4. Karta struktura protjecanja prema Dunsu i Rosu..... 41

POPIS TABLICA

Tablica 6-1. Udio pojedinih komponenti u ukupnom gubitku tlaka u tubingu.....29

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA

A − površina poprečnog presjeka, m^2

A_l −površina poprečnog presjeka elementa cijevi kroz koji prolazi kapljevina, m^2

B_g − obujamski faktor plina, m^3/m^3

B_o − obujamski faktor nafte, m^3/m^3

B_w − obujamski faktor vode, m^3/m^3

C – popravni faktor koji se koristi zbog utjecaja otopljenog plina na međupovršinsku napetost nafte i plina

d – promjer cijevi, m

dL – razlika duljina između početka i kraja elementa cijevi, može se izraziti kao dH, ako se govori o vertikalnoj bušotini, m

f – dvofazni faktor trenja

f_g - dvofazni faktor plina

f_l – dvofazni faktor trenja kapljevine

f_m – dvofazni faktor smjese

f_o − udio nafte

f_w − udio vode

GLR – omjer plina i kapljevine, m^3/m^3

g − ubrzanje gravitacijske sile, m/s^2

h_g − koeficijent zaostajanja plina

h_l − koeficijent zaostajanja kapljevine

k –propusnost poroznog medija, m^2

L – duljina poroznog medija kroz koji se odvija protjecanje, m

L_1 i L_2 – pokazatelji koji su funkcija N_d dani grafički na slici 7-4

$\dot{m}$ – maseni protok smjese, kg/s

$\dot{m}_g$ – maseni protok plina, kg/s

M_a – molarna masa zraka, kg/mol

M_g – molarna masa plina, kg/mol

p – tlak, bar

p_1 – tlak na kraju protjecanja, Pa

p_2 – tlak na početku protjecanja, Pa

$p_{sc} = 101325\ Pa$, standardni tlak

p_{wf} - tlak na dnu bušotine, Pa

p_{wh} - tlak na ušću bušotine, Pa

q – obujamski protok, m^3/s

q_g – obujamski protok plina, m^3/s

q_l – obujamski protok kapljevine, m^3/s

q_o – obujamski protok nafte, m^3/s

q_w – obujamski protok vode, m^3/s

q'_g – in-situ obujamski protok plina, m^3/s

q'_l – in-situ obujamski protok kapljevine, m^3/s

$R = 8{,}314\ \frac{J}{mol\ K}$, opća plinska konstanta

R_p – plinski faktor, m^3/m^3

R_s – faktor otopljenog plina pri stvarnom tlaku i temperaturi, m^3/m^3

Re_m – Reynoldsov broj smjese

T – stvarna temperatura, K

$T_{sc} = 288{,}15K$, standardna temperatura

v – brzina protjecanja fluida, m/s

v_g – stvarna brzina plina, m/s

v_l – stvarna brzina kapljevine, m/s

v_m – brzina smjese kapljevine i plina, m/s

v_{sg} – superficijalna brzina plina, m/s

v_{sl} – superficijalna brzina kapljevine m/s

vdv - razlika brzina u elementu cijevi, m^2/s^2

V – obujam elementa cijevi, m^3

V_l – obujam kapljevine u elementu cijevi, m^3

V_g – obujam plina u elementu cijevi, m^3

Z – faktor kompresibilnosti

γ_g – relativna gustoća plina

γ_o – relativna gustoća otplinjene nafte

Δp_7 - pad tlaka u tubingu, Pa

λ_g - koeficijent zaostajanja plina bez klizanja

λ_l – koeficijent zaostajanja kapljevine bez klizanja plina

μ –dinamička viskoznost fluida, Pa×s

μ_l – viskoznost kapljevine, Pa×s

μ_m – viskoznost smjese, Pa×s

μ_n – viskoznost smjese kapljevine i plina, Pa×s

μ_o – viskoznost nafte, Pa×s

μ_w – viskoznost vode, Pa×s

ρ - gustoća smjese, kg/m^3

ρ_f – gustoća fluida, kg/m^3

ρ_g – gustoća plina, kg/m^3

ρ_l – gustoća kapljevine, kg/m^3

ρ_m – gustoća smjese, kg/m^3

ρ_n, ρ_k – gustoća smjese kapljevine i plina, kg/m^3

ρ_o – gustoća nafte, kg/m^3

ρ_w – gustoća vode, kg/m^3

σ_l – površinska napetost kapljevine, N/m

σ_o – međupovršinska napetost otplinjene nafte, N/m

σ_w – površinska napetost vode, N/m

$\frac{dp}{dL}$ – gradijent tlaka, Pa/m

$\left(\frac{dp}{dH}\right)$– gradijent tlaka u vertikalnoj bušotini, Pa/m

$\left(\frac{dp}{dH}\right)_F$ – komponenta trenja gradijenta tlaka u vertikanoj bušotini, Pa/m

$\left(\frac{dp}{dH}\right)_H$ – hidrostatička komponenta gradijenta tlaka u vertikalnoj bušotini, Pa/m

$(dp/dL)_A$ – komponenta gradijenta tlaka zbog promjene kinetičke energije ili zbog ubrzanja, Pa/m

$(dp/dL)_F$ – komponenta gradijenta tlaka zbog trenja, Pa/m

$(dp/dL)_H$ – komponenta gradijenta tlaka zbog promjene potencijalne energije ili zbog promjene visine, Pa/m

$\sin\theta$ – sinus funkcija kuta pod kojim se ostvaruje protjecanje

1.UVOD

Protjecanje fluida u proizvodnim bušotinama može se podijeliti u tri dijela:

- protjecanje iz ležišta u bušotinu
- protjecanje kroz uzlazne cijevi ili tubing i
- protjecanje kroz priključni cjevovod

Mogućnost protjecanja fluida iz ležišta u bušotinu će najviše ovisiti o efektivnoj šupljikavosti te propusnosti koja je korištena kao fizikalna veličina u Darcyjevom zakonu. Šupljikavost je definirana kao omjer obujma pora te ukupnog obujma stijena, a efektivna šupljikavost kao omjer obujma povezanih pora te ukupnog obujma stijena. Kako bi ugljikovodici protjecali iz ležišta bitna je povezanost pora pa se zbog toga efektivna šupljikavost smatra jednim od najbitnijih faktora u naftnom inženjerstvu.

Pomoću Darcyjevog zakona se određuje obujamski protok fluida u poroznom mediju te je razvijena jednadžba (Vulin 2016):

$$q = -k\frac{1}{\mu}\frac{A}{L}(p_2 - p_1) \tag{1-1}$$

gdje su:

q – obujamski protok, m^3/s

k – propusnost poroznog medija, m^2

μ – dinamička viskoznost fluida, Pa×s

A – površina poprečnog presjeka, m^2

L – duljina poroznog medija kroz koji se odvija protjecanje, m

p_1 – tlak na kraju protjecanja, Pa

p_2 – tlak na početku protjecanja, Pa

Darcyjev zakon se može zapisati kao gradijent tlaka:

$$\frac{q}{A} = -\frac{k}{\mu}\frac{dp}{dL} \tag{1-2}$$

q − obujamski protok, m^3/s

A − površina poprečnog presjeka, m^2

μ −dinamička viskoznost fluida, Pa×s

k −propusnost poroznog medija, m^2

$\frac{dp}{dL}$ − gradijent tlaka, Pa/m

Negativan predznak u jednadžbi govori da se tlak smanjuje u smjeru protjecanja tekućine, što bi značilo da gradijent tlaka također sadrži negativan predznak što će dovesti do pozitivnog rezultata, odnosno obujamskog protoka. Omjer obujamskog protoka i površine poprečnog presjeka kroz koji se odvija protjecanje definira brzinu protjecanja fluida:

$$v = \frac{q}{A} \tag{1-3}$$

v − brzina protjecanja fluida, m/s

q − obujamski protok, m^3/s

A − površina poprečnog presjeka, m^2

Važno je napomenuti da Darcyjev zakon vrijedi za uvjete: fluid potpuno ispunjava šupljikavi prostor, između fluida te prostora koji ispunjava nema fizikalno – kemijske interakcije te sam režim protjecanja fluida je laminarni.

Struktura protjecanja u uzlaznim cijevima će imati veliki utjecaj na proračune gradijenta tlaka jer struktura je određena količinom kapljevine i plina prilikom protjecanja, a te faze će različito utjecati na pad tlaka. Utjecaj faza će se vidjeti u proračunu gradijenta tlaka dvofaznog protjecanja. Cilj završnog rada je definirati varijable dvofaznog protjecanja i pojasniti metode koje se koriste za proučavanje dvofaznog protjecanja.

2. TEMELJNI ZAKONI PROTJECANJA

Zakon očuvanje mase za slučaj pornog prostora glasi da je maseni utok u porni prostor umanjen za maseni istok iz pornog prostora jednak promjeni mase u pornom prostoru. Što se u samoj praksi koristi kako bi se odredilo koliki je obujam ugljikovodika u ležištu bilo to prilikom istraživanja ili same proizvodnje. Prilikom proizvodnje pomoću jednadžbe kontinuiteta određuje se koliki je vremenski vijek bušotine, ako je poznat obujamski protok te količina ugljikovodika u ležištu.

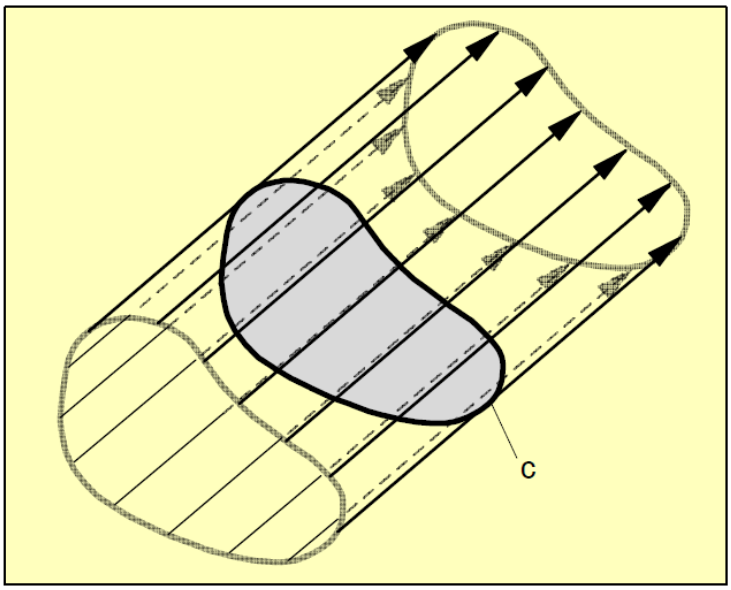
Sastav ugljikovodika je bitan kako bi se odredila molarna masa, kritična temperatura te kritični tlak smjese, a potom se te veličine koriste za određivanje faktora kompresibilnosti, poznatiji kao Z faktor. Volumni faktor nafte, B_o, i volumni faktor plina, B_g, su potrebni za određivanje količine nafte i plina koja će se proizvesti prilikom proizvodnje, jer obujam ugljikovodika u ležištu ne definira količnu ugljikovodika koja će se proizvesti na površini. Nemoguće je proizvesti svu količinu ugljikovodika u ležištu, najviše zbog pada tlaka, ali se može nadomjestiti raznim metodama, npr. utiskivanje plina, ugljikovog dioksida ili vode. Sve te metode mogu pospješiti iscrpljivanje iz ležišta, ali i ne dovesti do savršenog učinka, odnosno da se pridobi sva otkrivena količina ugljikovodika u ležištu.

Jednadžba stanja pomaže pri određivanju tlaka, temperature i gustoće smjese ugljikovodika pri ležišnim uvjetima, s tim da se mora uzeti u obzir da je protjecanje fluida iz ležišta do bušotine izotermni proces.

Protjecanje fluida u uzlaznim cijevima može se poistovjetiti sa konceptom strujnica i strujne cijevi. Strujnica se naziva krivulja toka, a to je imaginarna krivulja gdje se u svakoj njezinoj točki može odrediti tangenta te se smjer vektora brzine gibajućeg fluida poklapa sa tom tangentom. Strujnice su paralelne te usmjerene u istom smjeru. Strujna cijev je površina omeđena stujnicama, u ovom slučaju to je poprečni presjek cijevi (slika 2-1). Koncept strujne cijevi potvrđuje zakon održanja mase. Maseni protok je jednak u svakoj točki poprečnog presjeka cijevi, odnosno kolika masa fluida utječe, toliko i istječe.

Stacionaran ili ustaljen protok opisuje protok gdje se gustoća, brzina, tlak, itd. ne mijenjaju s vremenom u određenom poprečnom presjeku cijevi.

Jednodimenzionalan protok u cijevima je ostvaren ako se brzina protjecanja fluida mijenja samo u smjeru protoka, a ostale komponente brzine su konstantne. U praksi se više javlja dvodimenzionalan ili trodimenzionalan protok gdje se komponente brzine mijenjaju po površinskom presjeku i smjeru protoka fluida. Uvodi se srednja brzina koja će pojednostaviti te olakšati proračun dvodimenzionalnog protoka.



Slika 2-1. Strujnice i strujna cijev (Čikeš 2015)

Temeljni zakoni protjecanja fluida su:

- Zakon održanja mase ili jednadžba kontinuiteta
- Zakon održanja energije
- Zakon održanja količine gibanja

Zakoni koji se koriste u samoj praksi su zakon održanja mase i zakon održanja energije. Zakon održanja količine gibanja se rijetko koristi u specifičnim situacijama. Zakon održanja energije će biti naknadno spomenut i detaljnije pojašnjen.

Uvođenjem druge faze u protjecanja kroz cijev će dovesti do mogućnosti razdvajanja fluida zbog razlika u gustoći te brzini. Svojstva kao što su gustoća, brzina protjecanja i viskoznost su jednostavne za odrediti za kapljevitu i plinsku fazu zasebno, ali za smjesu fluida su potrebne detaljne analize te uvođenje varijabli koje se posebno javljaju pri dvofaznom protjecanju.

Za analizu dvofaznog protjecanja kao osnova se koristi jednaždba gradijenta tlaka izvedena iz zakona održanja energije.

Prije nego što se provede proračun gradijenta tlaka potrebno je odrediti vrijednosti varijabla dvofaznog protjecanja, kao što su:

- zaostajanje kapljevine
- gustoća
- brzina protjecanja
- viskoznost
- površinska napetost

Prilikom protjecanja mijenja se udio kapljevine i plina pa se stoga mijenja i struktura dvofaznog protjecanja. Prilikom pada tlaka dolazi do pojačanog izdvajanja plina što će utjecati na gustoću fluida, brzinu protjecanja i na ostale varijable. Ovisnost brzine i strukture dvofaznog protjecanja je kasnije objašnjena u grafičkom prikazu.

3. VARIJABLE DVOFAZNOG PROTJECANJA

Analiza dvofaznog protjecanja se zasniva na računu gradijenta tlaka. Prije nego se provede račun potrebno je odrediti svojstva i veličine vezane za fluid, kao što su brzina, gustoća, viskoznost, površinska napetost. Uz te veličine potrebno je odrediti u kakvim se uvjetima nalaze, odnosno koje su vrijednosti tlaka i temperature pri kojima protječe fluid. Dvofazno protjecanje se odnosi na smjese nafte i plina ili nafte i vode. Analiza dvofaznog protoka može donijeti probleme pri određivanju veličina pa je zbog toga bitno analizirati svaku fazu pojedino kako bi se izbjegle pogreške pri analizi smjese.

3.1.1. Zaostajanje kapljevine

Zaostajanje kapljevine je varijabla koja određuje dio elementa cijevi kojeg zauzima kapljevina u određenom trenutku. Može se zapisati kao „koeficijent zaostajanja“ kapljevine:

$$h_l = \frac{V_l}{V} = \frac{A_l}{A} \tag{3-1}$$

h_l − koeficijent zaostajanja kapljevine

V_l − obujam kapljevine u elementu cijevi, m^3

V − obujam elementa cijevi, m^3

A_l −površina poprečnog presjeka elementa cijevi kroz koji prolazi kapljevina, m^2

A − površina poprečnog presjeka elementa cijevi, m^2

Vrijednost koeficijenta zaostajanja kapljevine ovisi o obujmu kapljevine kojeg zauzima u ukupnom obujmu cijevi ili vrijednosti površinskog presjeka kojeg zauzima kapljevina u odnosu na ukupni površinski presjek cijevi. U slučaju jednofaznog protoka, gdje protječe samo kapljevina koeficijent zaostajanja će iznositi jedan pa tako možemo i odmah zaključiti prilikom jednofaznog protoka plina koeficijent zaostajanja kapljevine će iznositi nula. Iz prošlog zaključka proizlazi „koeficijent klizanja“ plina kao:

$$h_g = \frac{V_g}{V} \tag{3-2}$$

$$V_g = V - V_l \tag{3-3}$$

$$h_g = 1 - h_l \tag{3-4}$$

h_g – koeficijent zaostajanja plina

V_g – obujam plina u elementu cijevi, m^3

Klizanje različitih faza nastaje zbog protjecanja različitim brzinama. Brzina će izravno utjecati na obujamski protok različitih faza koje određujemo pri stvarnom tlaku i temperaturi.

U slučaju da ne postoji klizanje između dviju faza, odnosno da plin i kapljevina protječu istim brzinama, omjer obujma kapljevine i obujam elementa cijevi se definira kao „zaostajanje kapljevine bez klizanja plina“.

$$\lambda_l = \left.\frac{q_l}{q_l + q_g}\right|_{p,T} \tag{3-5}$$

λ_l – koeficijent zaostajanja kapljevine bez klizanja plina

q_l – obujamski protok kapljevine, m^3/s

q_g – obujamski protok plina, m^3/s

„Zaostajanje plina bez klizanja“ je definirano kao:

$$\lambda_g = 1 - \lambda_l = \left.\frac{q_g}{q_l + q_g}\right|_{p,T} \tag{3-6}$$

λ_g - koeficijent zaostajanja plina bez klizanja

Protoci će ovisiti o vrijednostima tlaka i temperature koje direktno utječu na obujamske faktore nafte, plina i vode. Obujamski faktori su varijable koje pojasne koliko nafte, plina ili vode se može pridobiti pri izlasku na površinu. Sav plin i kapljevina pri ležišnim uvjetima su stlačeni, s tim da je plin više stlačiv, nego tekućina kao što su voda i nafta. Zbog stlačivosti različitih faza može se odrediti kolika će biti količina proizvedene faze na površini u odnosu na otkrivenu količinu u ležištu. U slučaju nafte mora se uzimati u obzir otopljeni plin koji je otopljen u nafti pa će se smanjivanjem tlaka pri proizvodnji te izlaskom na površinu plin

odvajati iz nafte zbog čega će se pridobiti manje nafte nego je otkriveno, a tako i pridobiti više plina.

Protok kapljevine je suma in-situ protoka nafte i vode. In-situ protoci kapljevine i plina bi izgledali ovako:

$$q_l' = q_o B_o + q_w B_w \tag{3-7}$$

$$q_g{}' = q_g B_g \tag{3-8}$$

q_l' – in-situ obujamski protok kapljevine, m^3/s

q_g' – in-situ obujamski protok plina, m^3/s

q_o – obujamski protok nafte, m^3/s

q_w – obujamski protok vode, m^3/s

B_o – obujamski faktor nafte, m^3/m^3

B_g – obujamski faktor plina, m^3/m^3

B_w – obujamski faktor vode, m^3/m^3

3.1.2. Gustoća

Gustoća kapljevine može se odrediti iz gustoća te protoka nafte i vode. Ako se uzme u obzir da nema klizanja između dviju faza, gustoća kapljevine se računa prema formuli:

$$\rho_l|_{p,T} = \rho_o|_{p,T} f_o + \rho_w|_{p,T} f_w \tag{3-9}$$

ρ_l – gustoća kapljevine, kg/m^3

ρ_o – gustoća nafte, kg/m^3

ρ_w – gustoća vode, kg/m^3

f_o – udio nafte

f_w – udio vode

Udjeli nafte i vode u protoku kapljevine su označeni kao $f_o \; i \; f_w$, a definirani su kao:

$$f_o = \frac{q_o}{q_o + q_w} \tag{3-10}$$

$$f_w = 1 - f_o \tag{3-11}$$

Bitno je naglasiti da gustoća ovisi o stvarnom tlaku i temperaturi, što znači da gustoća može mijenjati svoju vrijednost.

Razvijene su tri jednadžbe pomoću kojih se može izračunati gustoća smjese plina i kapljevine (Beggs 2003):

$$\rho_m|_{p,T} = \rho_l|_{p,T} h_l + \rho_g\big|_{p,T} h_g \tag{3-12}$$

$$\rho_n|_{p,T} = \rho_l|_{p,T} \lambda_l + \rho_g\big|_{p,T} \lambda_g \tag{3-13}$$

$$\rho_k|_{p,T} = \frac{\rho_l|_{p,T} \lambda_l^2}{h_l} + \frac{\rho_g\big|_{p,T} \lambda_g^2}{h_g} \tag{3-14}$$

ρ_m, ρ_n, ρ_k – gustoća smjese kapljevine i plina, kg/m^3

ρ_g – gustoća plina, kg/m^3

Jednadžba (3-12) se koristi pri određivanju gradijenta tlaka zbog promjene visine. U drugoj jednadžbi (3-13) je pretpostavljeno da nema klizanja između faza. Treća jednadžba (3-14) se koristi u nekim slučajevima gdje se želi odrediti Reynoldsov broj te pad tlaka zbog trenja.

3.1.3. Brzina protjecanja

Brzine koje se računaju se nazivaju superficijalne i stvarne. Superficijalne brzine su brzine koje bi pojedina faza imala ako bi sama protjecala kroz cijev. Superficijalna brzina plina se računa iz jednadžbe:

$$v_{sg} = \frac{q_g\big|_{p,T}}{A} = \frac{q_g B_g}{A} \tag{3-15}$$

v_{sg} – superficijalna brzina plina, m/s

U proračun ulazi površina poprečnog presjeka, ako se uzme u obzir da postoje dvije faze ta površina se smanjuje na površinu Ah_g, tada je stvarna brzina plina:

$$v_g = \frac{q_g B_g}{A h_g} \tag{3-16}$$

v_g – stvarna brzina plina, m/s

Sukladno ovim jednadžbama, superficijalna i stvarna brzina kapljevine su:

$$v_{sl} = \frac{q_l|_{p,T}}{A} = \frac{q_o B_o + q_w B_w}{A} \tag{3-17}$$

$$v_l = \frac{q_o B_o + q_w B_w}{A h_l} \tag{3-18}$$

v_{sl} – superficijalna brzina kapljevine m/s

v_l – stvarna brzina kapljevine, m/s

Stvarne brzine u proračun uključuju zaostajanje kapljevine i plina koje su manje od jedan pa će zbog toga stvarne brzine biti veće od superficijalnih.

Brzina smjese je određena iz zbroja superficijalnih brzina kapljevine i plina:

$$v_m = v_{sl} + v_{sg} \tag{3-19}$$

v_m – brzina smjese kapljevine i plina, m/s

3.1.4. Viskoznost

Viskoznost kapljevine može se odrediti pomoću pojedine viskoznosti te udjela nafte i vode:

$$\mu_l|_{p,T} = \mu_o|_{p,T} f_o + \mu_w|_{p,T} f_w \tag{3-20}$$

μ_l – viskoznost kapljevine, Pa×s

μ_o – viskoznost nafte, Pa×s

μ_w – viskoznost vode, Pa×s

Nakon proračuna viskoznosti kapljevine, vrijednost viskoznosti smjese kapljevine i plina računa se prema jednadžbama (Beggs 2003):

$$\mu_n|_{p,T} = \mu_l|_{p,T}\lambda_l + \mu_g\big|_{p,T}\lambda_g \tag{3-21}$$

$$\mu_m|_{p,T} = \mu_l^{h_l} \times \mu_g^{h_g}\Big|_{p,T} \tag{3-22}$$

$$\mu_m|_{p,T} = \mu_l|_{p,T}h_l + \mu_g\big|_{p,T}h_g \tag{3-23}$$

μ_m, μ_n – viskoznost smjese kapljevine i plina, Pa×s

3.1.5. Površinska napetost

Međupovršinska napetost kao varijabla ima mali utjecaj na gradijent tlaka te ovisi o gustoći nafte, gustoći plina i količini otopljenog plina u nafti. Baker i Swerdloff 1956. godine su razvili grafičke korelacije za određivanje međupovršinske napetosti između nafte i plina, a pomoću tih korelacija ravijene su jednadžbe za određene temperature. Pri atmosferskom tlaku na temperaturama od 20℃ i 38℃ (Baker i Swedloff 1956) izvedene su jednadžbe iz korelacija za površinsku napetost otplinjene nafte iskazane kao:

$$\sigma_o|_{p_{sc},T=20℃} = 0{,}0728 - 0{,}0364/\gamma_o \tag{3-24}$$

$$\sigma_o|_{p_{sc},T=38℃} = 0{,}0713 - 0{,}0364/\gamma_o \tag{3-25}$$

σ_o – međupovršinska napetost otplinjene nafte, N/m

γ_o – relativna gustoća otplinjene nafte

U uvjetima gdje je temperatura manja od 20℃ koristi se jednadžba za $T = 20℃$, a pri uvjetima gdje je temperatura veća od 38℃ tada međupovršinska napetost se računa iz jednadžbe za $T = 38℃$, ako temperatura ima vrijednost između 20℃ i 38℃ koristi se linearna interpolacija za određivanje površinske napetosti.

Nafta može sadržavati otopljeni plin pa se zbog toga uvodi popravni faktor C koji pospješuje vrijednost površinske napetosti između nafte i plina, pri bilo kojem tlaku. Faktor se izražava kao:

$$C = 1 - 0{,}08p^{0{,}45} \tag{3-26}$$

C – popravni faktor koji se koristi zbog utjecaja otopljenog plina na međupovršinsku napetost nafte i plina

p – tlak, bar

Jednadžba površinske napetosti nafte koja sadrži otopljeni plin pri bilo kojem tlaku i temperaturi glasi:

$$\sigma_o|_{p,T} = C\sigma_o|_{p_{sc},T} \tag{3-27}$$

Tlak miješanja je tlak pri kojemu je sav plin otopljen u nafti i ne postoji opna između plina i nafte. Tlak miješanja za većinu sustava je 350 bara, a na tom tlaku međupovršinska napetost je jednaka nuli. Kod jednadžbe (3-26) popravni faktor iznosi nula pri tlaku od 274 bara.

Površinska napetost za kapljevitu fazu se računa na isti način kao i gustoća te viskoznost kapljevine, odnosno kao:

$$\sigma_l|_{p,T} = \sigma_o|_{p,T} f_o + \sigma_w|_{p,T} f_w \tag{3-28}$$

σ_l – površinska napetost kapljevine, N/m

σ_w – površinska napetost vode, N/m

3.2. Jednadžba gradijenta tlaka za dvofazni protok

Jednadžba gradijenta tlaka se koristi za bilo koji fluid koji protječe kroz okruglu cijev konstantnog nagiba prema horizontali (Čikeš 2015):

$$\frac{dp}{dL} = \left(\frac{dp}{dL}\right)_A + \left(\frac{dp}{dL}\right)_H + \left(\frac{dp}{dL}\right)_F \tag{3-29}$$

$(dp/dL)_A$ – komponenta gradijenta tlaka zbog promjene kinetičke energije ili zbog ubrzanja, Pa/m

$(dp/dL)_H$ – komponenta gradijenta tlaka zbog promjene potencijalne energije ili zbog promjene visine, Pa/m

$(dp/dL)_F$ – komponenta gradijenta tlaka zbog trenja, Pa/m

Jednadžbu je potrebno prilagoditi za slučaj dvofaznog protoka pa se zbog toga uvode specifične varijable za pojedinu komponentu. Prva komponenta u jednadžbi se odnosi na promjenu gradijenta tlaka zbog promjene potencijalne energije ili promjene visine, naziva se hidrostatička komponenta, a ona u slučaju dvofaznog protoka postaje:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_H = \rho_m g \sin\theta \tag{3-30}$$

ρ_m – gustoća smjese, kg/m^3

g − ubrzanje gravitacijske sile, m/s^2

$\sin\theta$ – sinus funkcija kuta pod kojim se ostvaruje protjecanje, potpuno vertikalno protjecanje ima vrijednost; $\sin 90° = 1$

Gustoća smjese ρ_m se izražava iz jednadžbe (3-12) ili ako nema klizanja između faza izražava se jednadžbom (3-13).

Druga komponenta gradijenta tlaka se odnosi na promjenu tlaka zbog trenja i naziva se komponenta trenja, a u slučaju dvofaznog protoka postaje:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_F = \frac{(f\rho v^2)_f}{2d} \tag{3-31}$$

f – dvofazni faktor trenja

ρ - gustoća smjese, kg/m^3

v – brzina protjecanja smjese, m/s

d – promjer cijevi, m

Vrijednosti koje ulaze u proračun f, ρ i v mogu se razlikovati jer postoje proračuni ovih varijabli od različitih autora. Komponenta trenja se analitički određuje u slučaju jednofaznog laminarnog protoka, a u slučaju dvofaznog koriste se eksperimentalni proračuni ili se pokuša stvoriti analogija s jednofaznim protokom. U slučaju dvofaznog protoka, glavni dio komponente i njenog proračuna je dvofazni faktor trenja proračunat u tri jednadžbe za proračun komponente gradijenta tlaka zbog trenja uslijed dvofaznog protoka (Beggs 2003):

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_F = \frac{f_l \rho_l v_{sl}^2}{2d} \tag{3-32}$$

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_F = \frac{f_g \rho_g v_{sg}^2}{2d} \tag{3-33}$$

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_F = \frac{f_m \rho_f v_m^2}{2d} \tag{3-34}$$

f_l – dvofazni faktor trenja kapljevine

f_g - dvofazni faktor plina

f_m – dvofazni faktor smjese

ρ_f – gustoća fluida, kg/m^3

Koja će se jednadžba koristiti ovisi o strukturi protjecanja. Jednadžba (3-33) koristiti će se u slučaju magličaste strukture, a jednadžba (3-32) za mjehuričastu strukturu. Proračun faktora trenja može se razlikovati, što ovisi o istraživaču. Većina istraživača je pokušala korelirati faktor trenja s Reynoldsovim brojem.

Zadnja komponenta gradijenta tlaka se odnosi na promjenu kinetičke energije ili ubrzanja, a za dvofazni protok je zapisana kao:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_A = \frac{(\rho v dv)_k}{dL} \tag{3-35}$$

vdv - razlika brzina u elementu cijevi, m^2/s^2

dL – razlika duljina između početka i kraja elementa cijevi, može se izraziti kao dH, ako se govori o vertikalnoj bušotini, m

Komponenta akceleracije je ponekad potpuno zanemarena, a ponekad je samo zanemarena u različitim strukturama protjecanja.

Kako bi se provela analiza jednadžbe gradijenta tlaka, velika važnost je posvećena određivanju koeficijenta zaostajanja kapljevine i dvofaznog faktora trenja.

4. STRUKTURA DVOFAZNOG PROTJECANJA

Tlak u ležištu i na dnu bušotine omogućava protok iz ležišta u bušotinu, a potom s dna bušotine uzlaznim cijevima do površine. Tlak koji najviše ovisi o sastavu smjese ugljikovodika naziva se tlak zasićenja. Tlak zasićenja je definiran kao tlak pri kojem se iz nafte počinje odvajati plin. Ovaj tlak može biti veći ili manji od početnog ležišnog tlaka. U slučaju da je tlak zasićenja manji od ležišnog tlaka u samom ležištu se već može nalaziti nafta i odvojeni plin. Kada je tlak zasićenja veći od ležišnog tlaka tada ležište samo sadrži naftu. Bitno je naglasiti da se u ležištima može naći i voda kao treća faza, što će biti važno pri određivanju režima s kojim će se proizvoditi ugljikovodici.

Tlak na dnu bušotine također može biti manji i veći od tlaka zasićenja, a to će utjecati na količinu plina pri dnu uzlaznih cijevi. Prilikom protoka fluida uzlaznim cijevima povećava se količina odvojenog plina.

Struktura protjecanja ovisi o količini plina koji se odvaja iz nafte i gleda se koja faza prevladava u dvofaznom protoku, a najčešće strukture su:

- mjehuričasta,
- čepolika,
- prijelazna i
- prstenasto-magličasta.

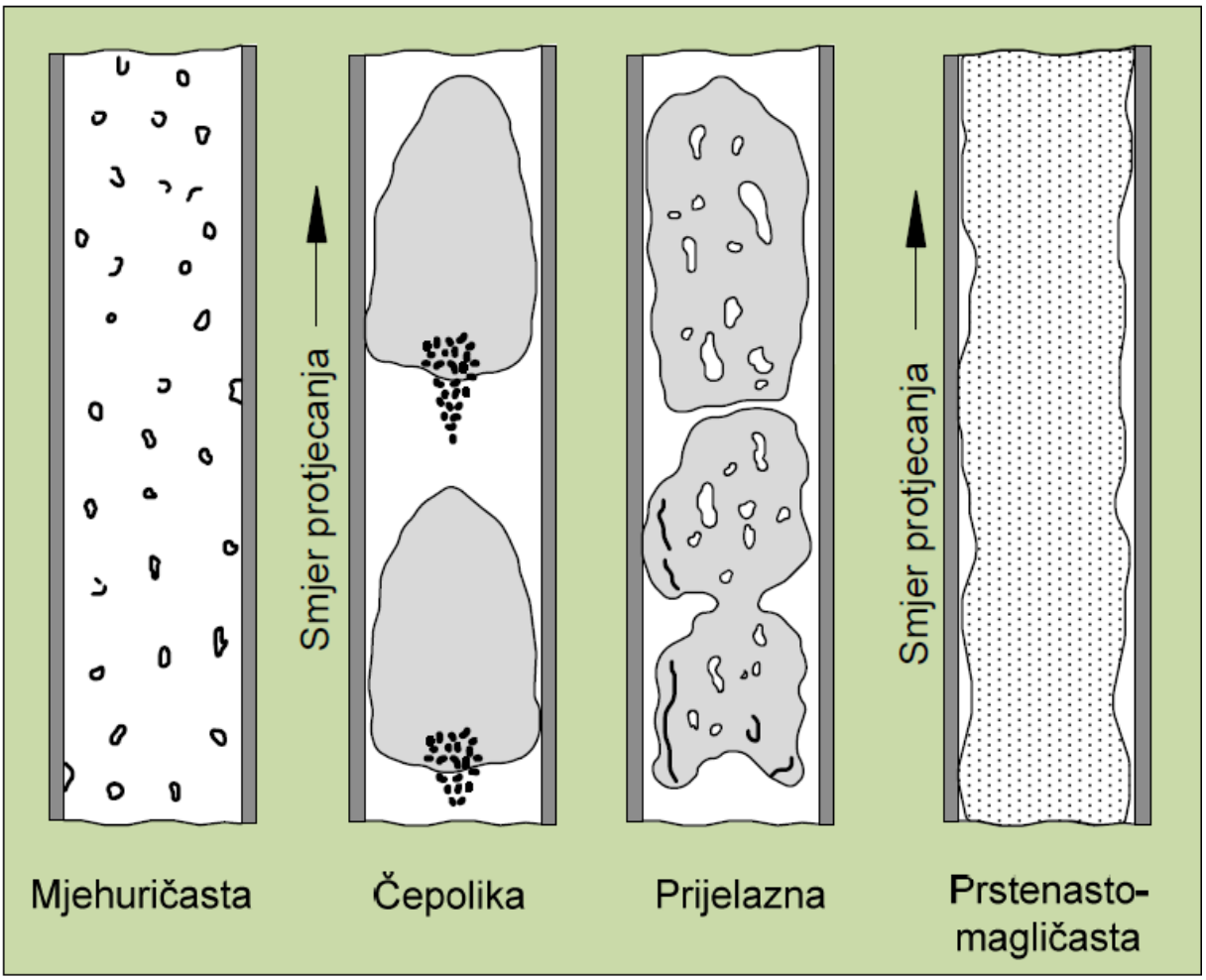
Kada tlak u području protjecanja se snizi ispod tlaka zasićenja započinje oslobađanje mjehurića plina. Mjehurići plina imaju mali udio u kapljevini, a ova struktura se naziva mjehuričasta struktura.

Tlak pada i odvaja se sve više mjehurića plina. Ti mjehurići plina će se početi spajati i nastati će veći mjehurići. Kada se ti mjehurići toliko povećaju da će zauzeti cijeli poprečni presjek cijevi, onda nastaju čepovi plina. Čepovi plina će onemogućiti dodir između dijelova kapljevine i tako se nastavlja protok prema površini uzlaznim cijevima. Struktura ovakvog načina protjecanja ima naziv čepolika struktura.

Zbog sve veće količine plina u područjima nižeg tlaka, plin će polako prevladati te će umanjiti viskoznije čepove kapljevine. Plinska faza sa sobom će početi nositi i kapljice nafte prema površini i zauzeti će središte uzlaznih cijevi, a pri stijenkama će protjecati naftna faza. U ovom području plin polako postaje prevladavajuća faza i struktura protjecanja se naziva prijelazna struktura.

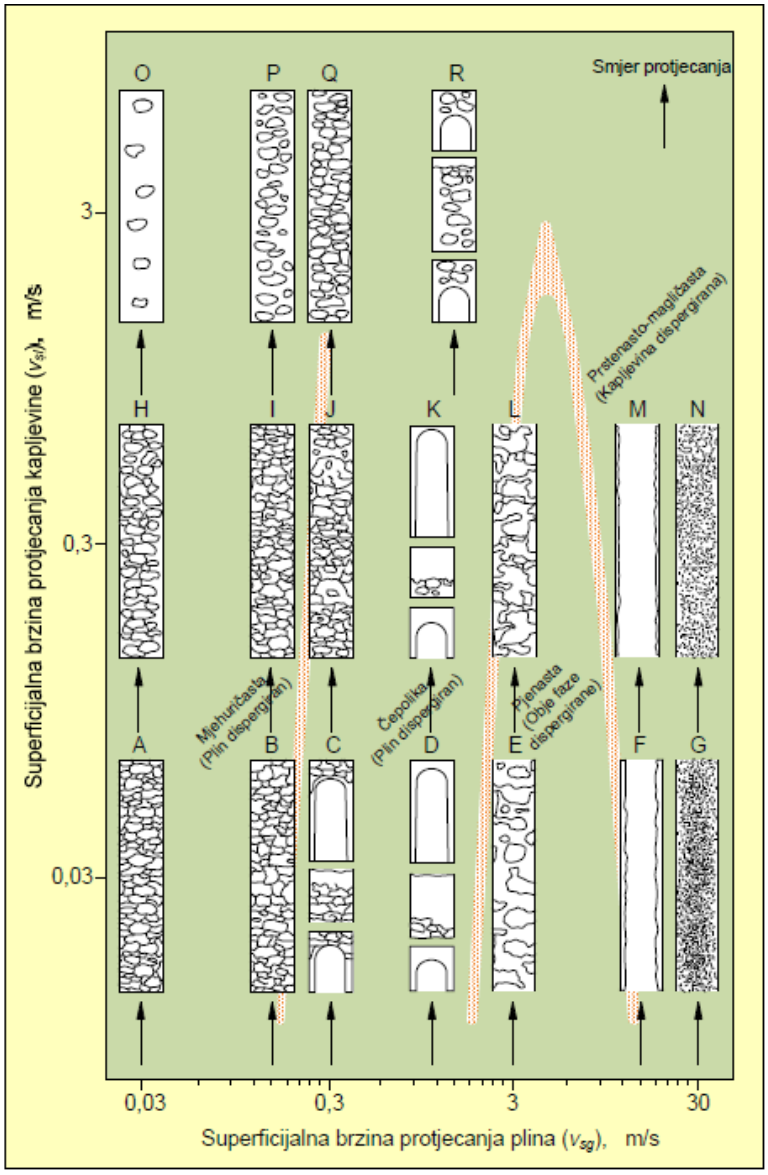
Daljni pad tlaka će uzrokovati da se naftna faza na stijenkama smanjuje, a plinska faza postaje kontinuirana faza u središtu cijevi. Naftna faza okružuje plin i zbog toga se ova struktura protjecanja naziva prstenasto-magličasta struktura.

Kako bi te strukture izgledale može se vidjeti na slici (4-1).

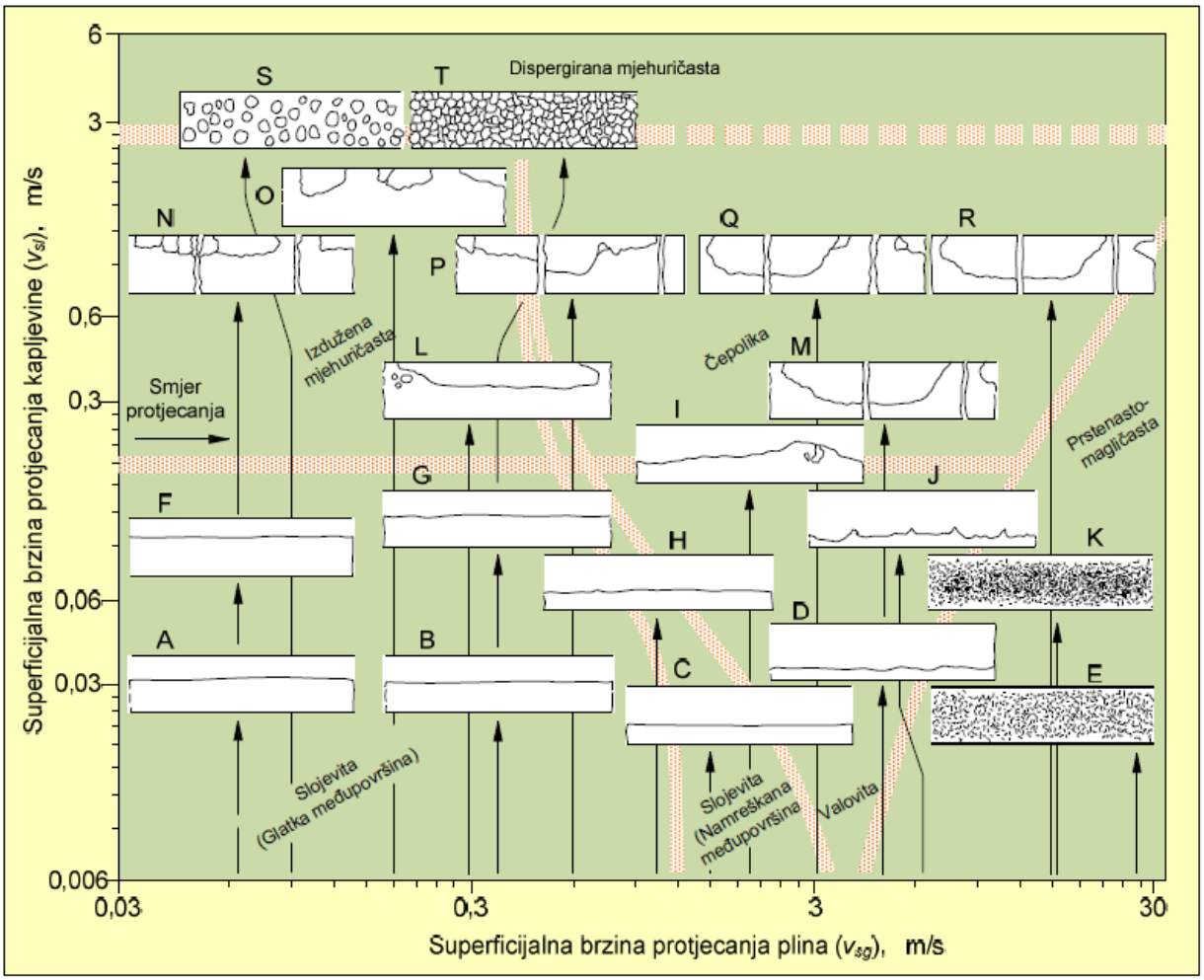


Slika 4-1. Strukture dvofaznog protjecanja (Čikeš 2015)

Voda i zrak su poslužili Govieru i Azizu kako bi opisali strukture protjecanja u horizontalnim i vertikalnim cijevima, što je poslužilo za nastanak prikaza u kojima se promatraju strukture protjecanja kapljevine i plina (slike 3-2 i 3-3). Zaključili su da struktura protjecanja najviše ovisi o superficijalnim brzinama v_{sl} i v_{sg}.



Slika 4-2. Strukture vertikalnog dvofaznog protjecanja u funkciji superficijalnih brzina (Govier i Aziz 1972)



Slika 4-3. Strukture horizontalnog dvofaznog protjecanja u funkciji superficijalnih brzina (Govier i Aziz 1972)

5. UTJECAJ VARIJABLI NA GRADIJENT TLAKA PRI DVOFAZNOM PROTJECANJU

Fluid koji se promatra je smjesa kapljevine i plina. Posebno se promatra njegovo protjecanje iz dna bušotine do ušća bušotine. Kako se ponaša tlak pri tom protjecanju proučava se pomoću jednadžbe gradijenta tlaka (Čikeš 2015):

$$\frac{dp}{dL} = \left(\frac{dp}{dL}\right)_A + \left(\frac{dp}{dL}\right)_H + \left(\frac{dp}{dL}\right)_F \tag{5-1}$$

U raznim metodama i proračunima komponenta promjene kinetičke energije ili ubrzanja se zanemaruje, a tako će biti i u ovom slučaju gdje će se proučavati utjecaj varijabli na gradijent tlaka pri dvofaznom protjecanju. Ostaju hidrostatička komponenta i komponenta trenja koje se moraju prilagoditi za analizu u nastavku poglavlja. Bitno je naglasiti da se analiza odnosi na bušotine koje su vertikalne i gradijent tlaka se odnosi na područje između dna i ušća bušotine pa se jednadžba gradijenta tlaka preinači (Čikeš 2015):

$$\frac{dp}{dH} = \left(\frac{dp}{dH}\right)_H + \left(\frac{dp}{dH}\right)_F \tag{5-2}$$

$\left(\frac{dp}{dH}\right)$– gradijent tlaka u vertikalnoj bušotini, Pa/m

$\left(\frac{dp}{dH}\right)_H$ – hidrostatička komponenta gradijenta tlaka u vertikalnoj bušotini, Pa/m

$\left(\frac{dp}{dH}\right)_F$ – komponenta trenja gradijenta tlaka u vertikanoj bušotini, Pa/m

Hidrostatička komponenta se može zapisati kao:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_H = \rho_m g \sin\theta \tag{5-3}$$

Gustoća smjese se računa prema jednadžbi (3-12) i u slučaju da je bušotina u potpunosti vertikalna, odnosno $\sin 0 = 1$, hidrostatička komponenta se može zapisati kao:

$$\left(\frac{dp}{dH}\right)_H = \rho_l g h_l + \rho_g g (1 - h_l) \tag{5-4}$$

Komponenta trenja se može zapisati kao:

$$\left(\frac{dp}{dH}\right)_F = \frac{f_m \rho_f v_m^2}{2d} \tag{5-5}$$

Konačni oblik komponente trenja za analizu se dobije pomoću ovih jednadžbi:

$$A = \frac{\pi}{4} d^2 \tag{5-6}$$

$$q = \frac{v}{A} \tag{5-7}$$

$$v_{sl} = \frac{q_l}{A} \tag{5-8}$$

$$v_{sg} = \frac{q_g}{A} \tag{5-9}$$

$$v_m = v_{sl} + v_{sg} \tag{5-10}$$

Koristeći sve ove formule i uvrštavanjem u jednadžbu (5-5) sređivanjem se dolazi do:

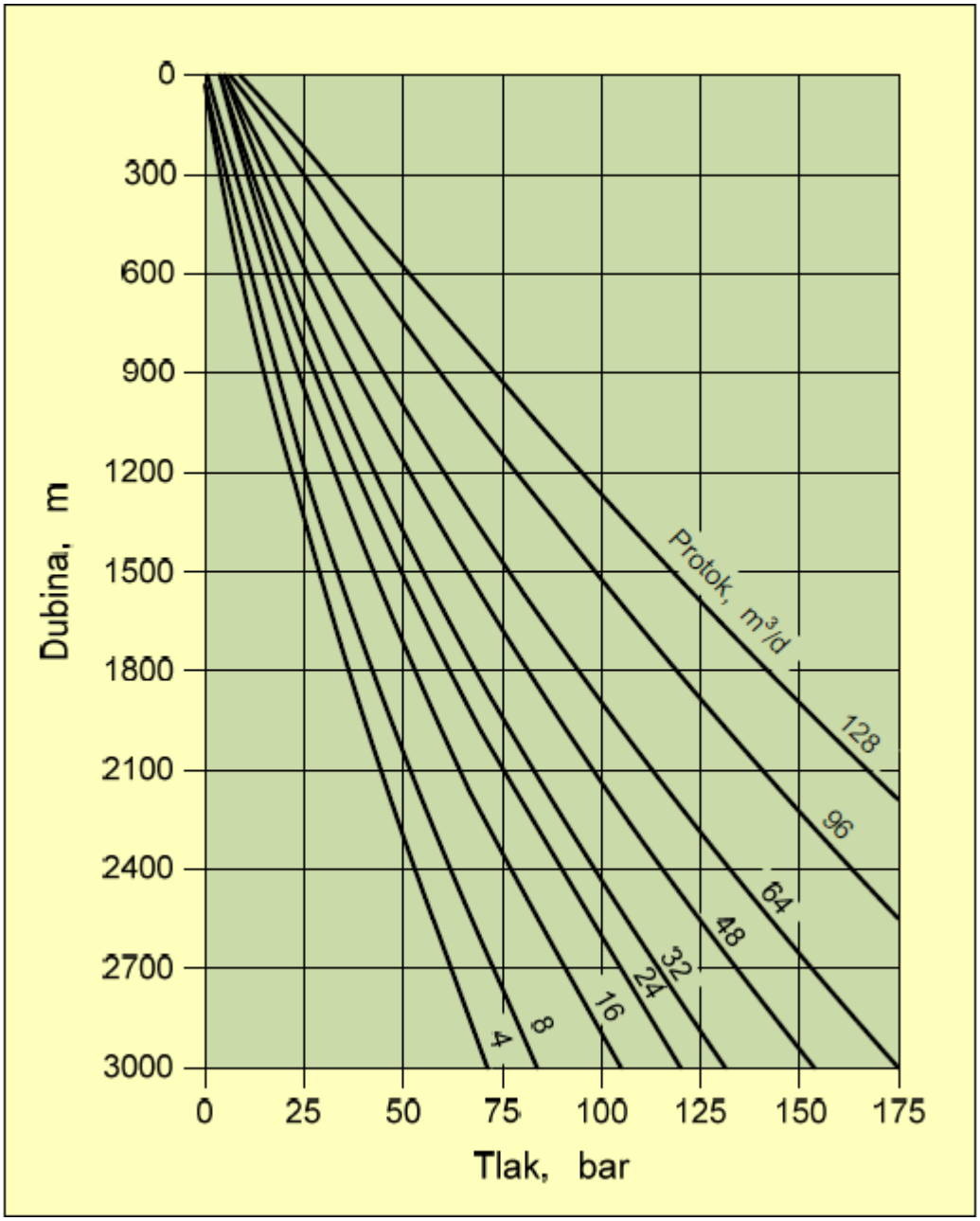
$$\left(\frac{dp}{dH}\right)_F = \frac{8 f \rho_m \left(q_l + q_g\right)^2}{\pi^2 d^5} \tag{5-11}$$

Na kraju se može zapisati jednadžba koja će se koristiti pri analizi utjecaja varijabli na gradijent tlaka pri dvofaznom protjecanju, komponenta akceleracije je zanemarena i jednadžba glasi:

$$\frac{dp}{dH} = \rho_l g h_l + \rho_g g (1 - h_l) + \frac{8 f \rho_m \left(q_l + q_g\right)^2}{\pi^2 d^5} \tag{5-12}$$

5.1. Protok kapljevine

Povećanje protoka kapljevine uzrokuje povećanje koeficijenta zaostajanja, zbog povećanja obujma koji se nalazi u elementu cijevi, a također će uzrokovati i povećanje brzine protjecanja. Protok kapljevine izravno utječe na komponente jednadžbe gradijenta tlaka te se utjecaj može vidjeti na slici 5-1 s naglaskom da su bušotinski uvjeti održani konstantni, a mijenjan je samo protok kapljevine.

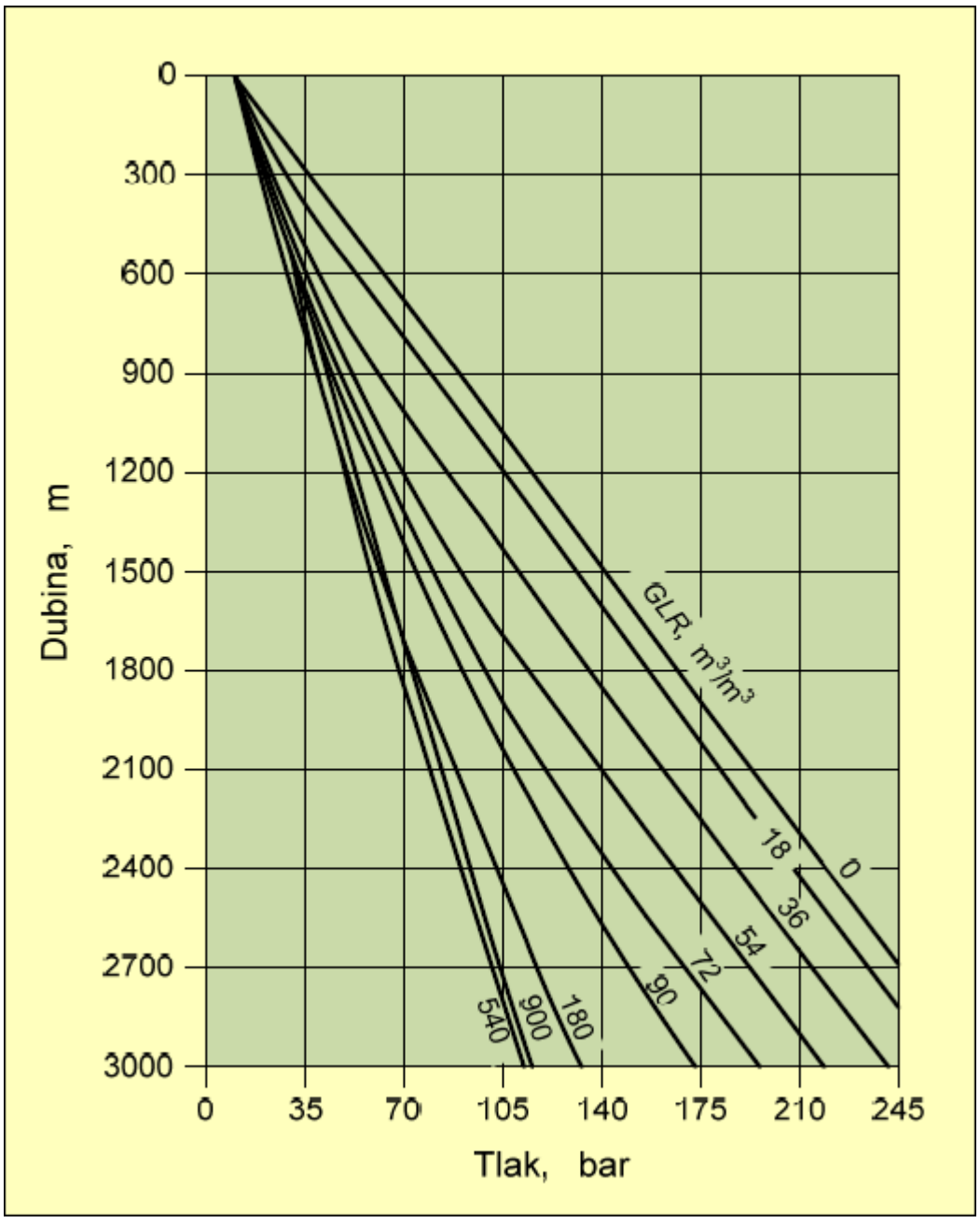


Slika 5-1. Utjecaj protoka kapljevine na gradijent tlaka (Čikeš 2015)

5.2. Omjer plina i kapljevine

Omjer plina i kapljevine (GLR) ima najveći utjecaj na dinamički gradijent tlaka pri dvofaznom protoku. Kako se povećava količina plina pri dvofaznom protjecanju, tako se smanjuje koeficijent zaostajanja kapljevine, h_l. Zbog smanjivanja ovog koeficijenta smanjit će se hidrostatička komponenta gradijenta tlaka. Protok plina će se povećati, a tako i komponenta

trenja. Bitno za naglasiti je da povećanjem GLR-a dinamički tlak na dnu bušotine pada do određene točke, a potom će se dinamički tlak povećavati. To nastaje zbog bržeg rasta komponente trenja, nego hidrostatičke komponente.



Slika 5-2. Utjecaj omjer plina i kapljevine (GLR) na gradijent tlaka (Čikeš 2015)

5.3. Omjer vode i nafte ili udio vode u kapljevini

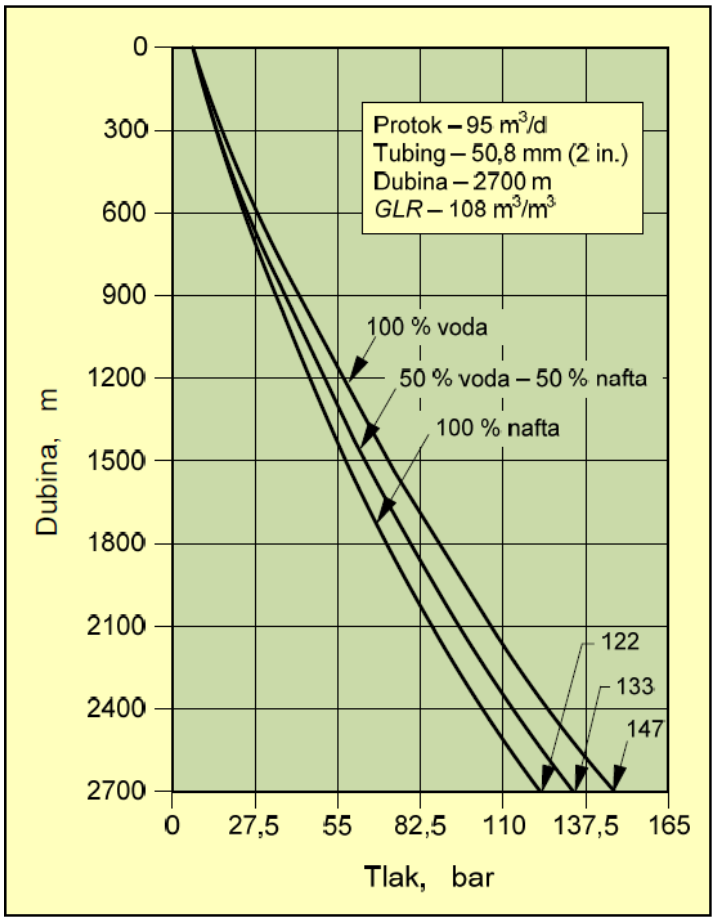
Voda je u većini slučajeva gušća od nafte i zbog toga će se gustoća kapljevine povećati prilikom povećanja udjela vode, a samim time će se povećati ukupni gradijent tlaka. Utjecaj vode može se vidjeti iz jednadžbe:

$$GLR = R_p(1 - f_w) = (q_g/q_o)(1 - f_w) \tag{5.13}$$

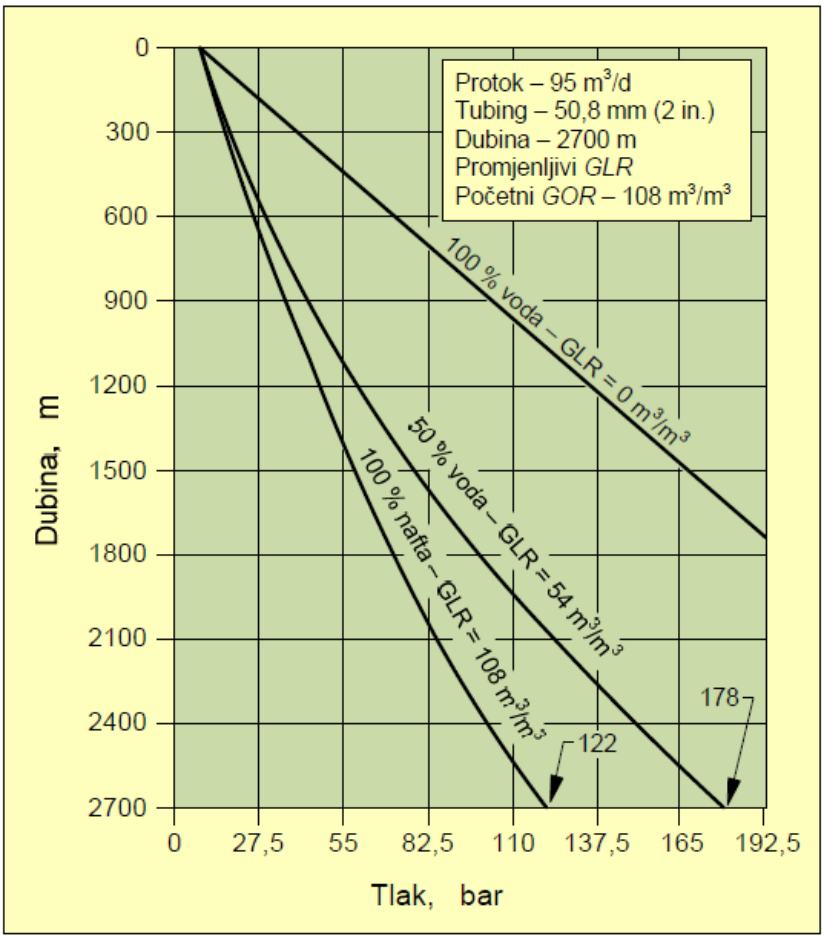
GLR – omjer plina i kapljevine, m^3/m^3

R_p – plinski faktor, m^3/m^3

Na slici 5-3 se vidi utjecaj udjela vode prilikom konstantnog GLR-a, a na slici 5-4 promatra se utjecaj vode u kapljevini na gradijent tlaka, ali s promjenjivim GLR-om.



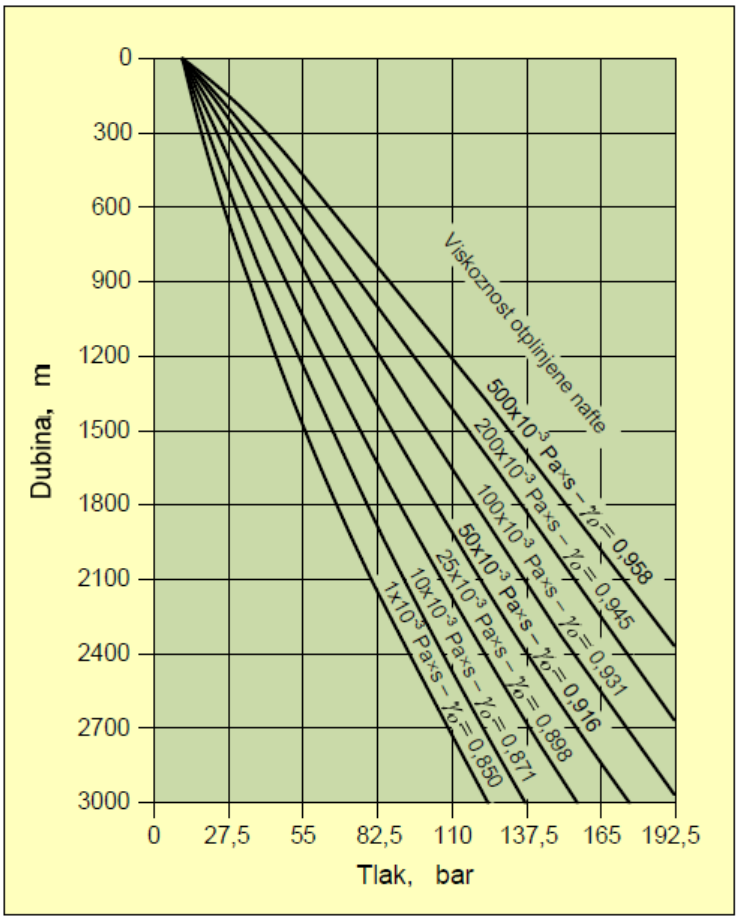
Slika 5-3. Utjecaj udjela vode u kapljevini, uz konstantan GLR, na gradijent tlaka (Čikeš 2015)



Slika 5-4. Ukupni utjecaj udjela vode u kapljevini na gradijent tlaka (Čikeš 2015)

5.4. Viskoznost kapljevine

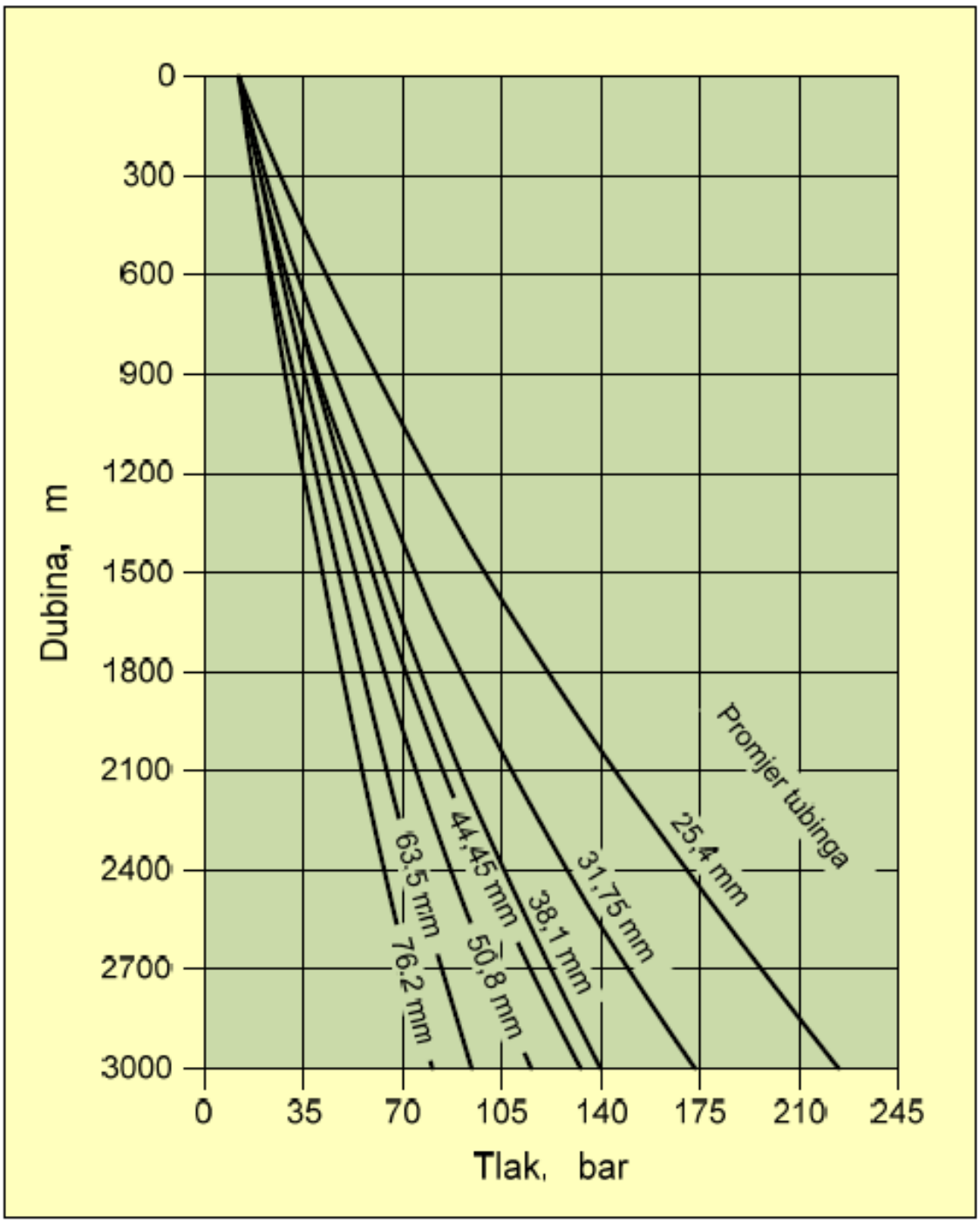
Viskoznost nema izravan utjecaj na jednadžbu (5-12), ali se koristi pri određivanju Reynoldsovog broja koji potom utječe na vrijednost faktora trenja. Viskoznost izravno utječe na gustoću nafte, a kombinirani utjecaj gustoće i viskoznosti se vidi na slici 5-5.



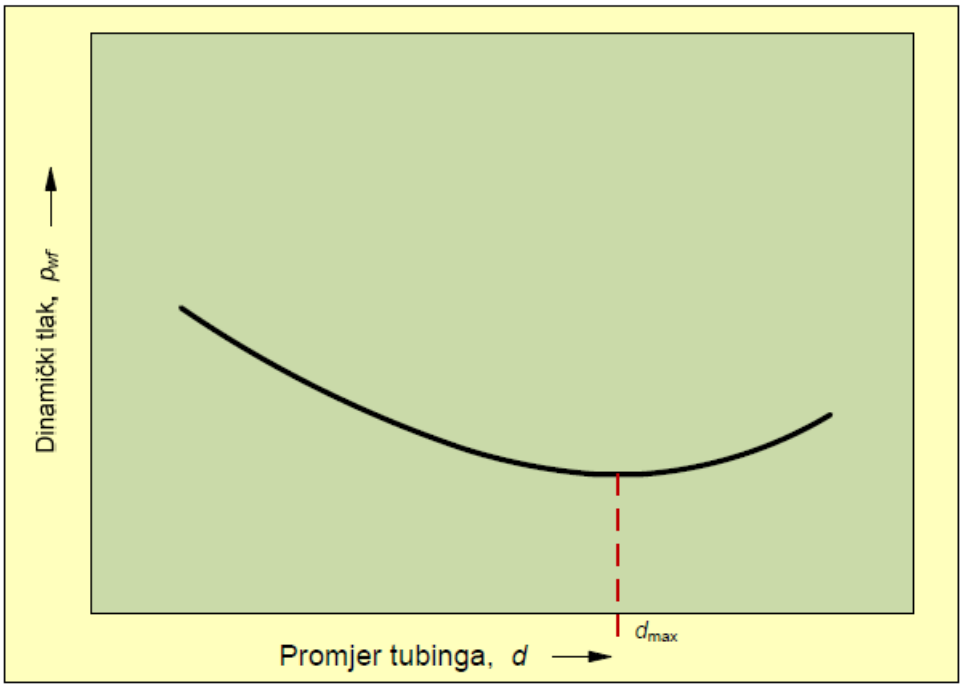
Slika 5-5. Kombinirani utjecaj gustoće i viskoznosti nafte na gradijent tlaka (Čikeš 2015)

5.5. Promjer tubinga

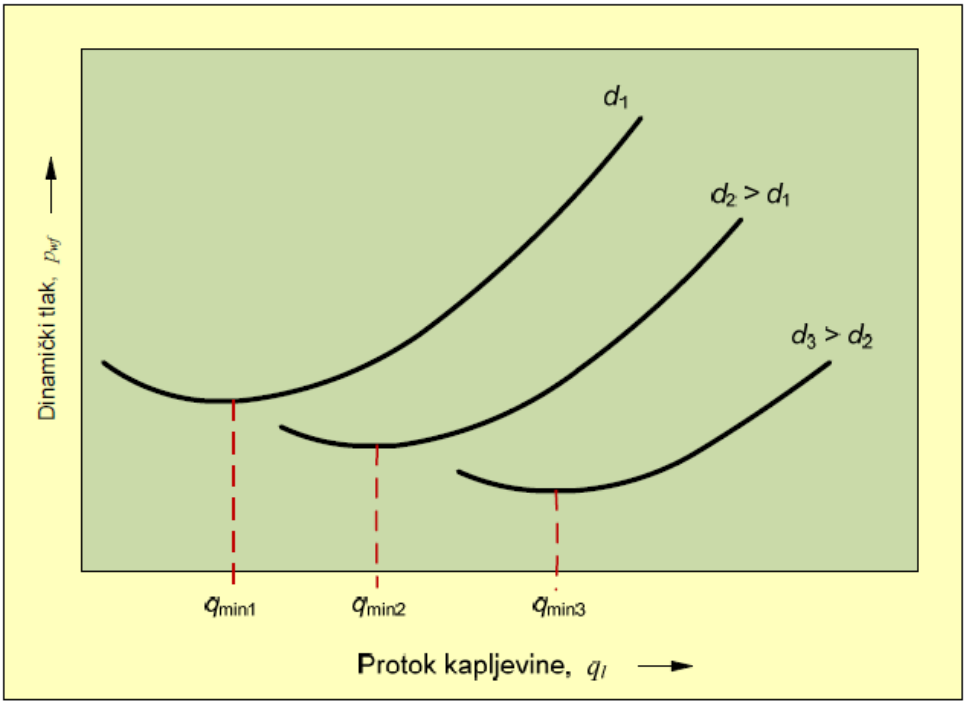
Promjer tubinga ima izravan utjecaj na komponentu trenja u jednadžbi (5-12) i njegovim povećanjem će se smanjiti ukupni gradijent tlaka do određene točke, što se može vidjeti na slici 5-6. Povećanje ove varijable utječe na smanjivanje brzine smjese, a to može dovesti do situacije gdje će brzina postati premala za iznošenje kapljevine i na kraju će prouzročiti gušenje bušotine. Korištenjem korelacija može se kreirati dijagram, slika 5-7, gdje se može odrediti maksimalan promjer pri kojem će bušotina moći održati protok. Svaka bušotina ima određen minimalni protok kapljevine koji neće prouzročiti nakupljanje u bušotine, a na tu vrijednost utječe promjer tubinga, dubina bušotine, tlak na ušću i GLR. Na slici 5-8 vidi se utjecaj dinamičkog tlaka i promjera tubinga na minimalni protok kapljevine.



Slika 5-6. Utjecaj promjera tubinga na gradijent tlaka, odnosno na dinamički tlak u bušotini (Čikeš 2015)



Slika 5-7. Određivanje maksimalnog promjera tubinga



Slika 5-8. Utjecaj promjera tubinga na minimalno potrebni protok kapljevine

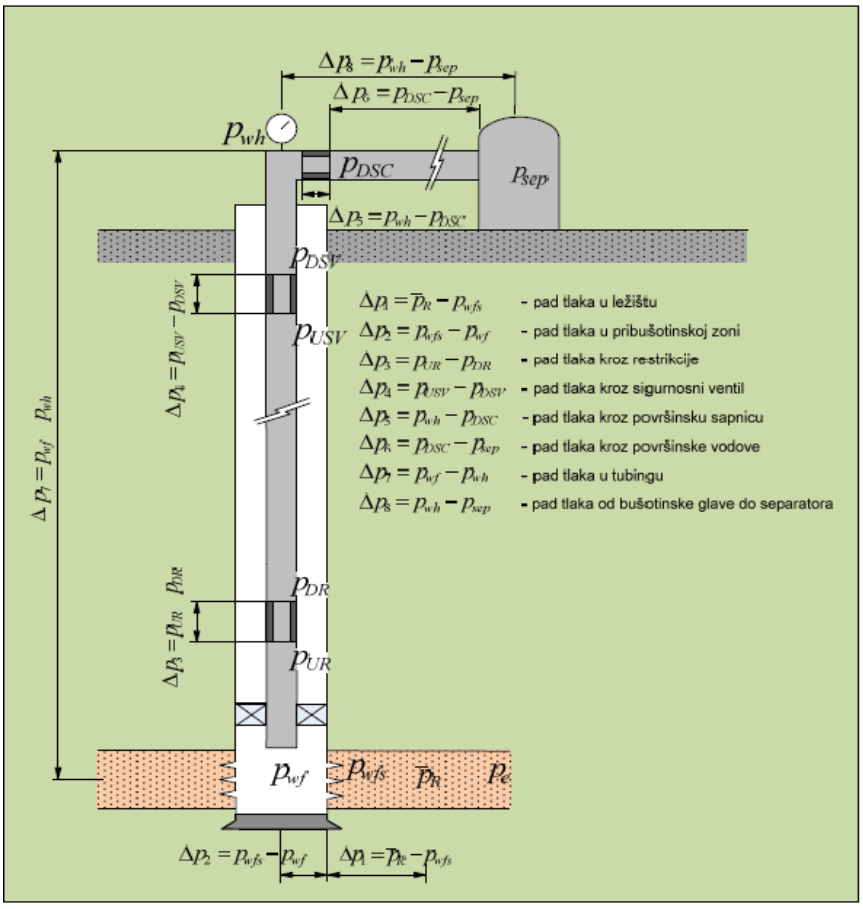
6. GUBITCI TLAKA

Prva vrijednost tlaka bitna za sustav prozivodnje je ležišni tlak. Taj tlak će odrediti metodu proizvodnje, a jedna od njih je eruptivna metoda gdje ležišni tlak ima vrijednost koja će omogućiti proizvodnju fluida od ležišta do separatora. Tlak prilikom proizvodnje pada, a prilikom prolaska kroz proizvodni tubing događa se najveći pad, odnosno 80% od ukupnog pada tlaka koji je utrošen na proizvodnju fluida od dna bušotine na površinu. Na slici 6-1 je prikazan gubitak tlaka u tubingu kao $\Delta p_7 = p_{wf} - p_{wh}$.

Δp_7 - pad tlaka u tubingu, Pa

p_{wf} - tlak na dnu bušotine, Pa

p_{wh} - tlak na ušću bušotine, Pa



Slika 6-1. Mogući gubitci tlaka u proizvodnom sutavu bušotine (Čikeš 2015)

Jednadžba gradijenta tlaka (5.1) sadrži tri komponente, a svaka od njih će utjecati na gubitak tlaka u tubingu. Utjecaj tih komponenti može se vidjeti u tablici 6-1, a određen je kao postotak od ukupnog pada tlaka u tubingu, tj. postotci od $\Delta p_7 = p_{wf} - p_{wh}$.

Komponenta akceleracije je u dosta slučajeva zanemarena u proračunima, ali zato je očit utjecaj komponente trenja i hidrostatičke komponente. Najveći utjecaj na ovakve postotke je gustoća fluida i brzina smjese. Na naftnim bušotinama se vidi veći utjecaj hidrostatičke komponente zbog koeficijenta zaostajanja kapljevine, a na plinskim bušotinama veći utjecaj ima komponenta trenja zbog velike brzine plina.

Komponenta gubitka tlaka	***Udio u ukupnom gubitku tlaka u tubingu (%)***	
	Naftne bušotine	***Plinske bušotine***
Hidrostatička (H)	70 do 90	20 do 50
Zbog trenja (F)	10 do 30	30 do 70
Zbog akceleracije (A)	0 do 10	0 do 10

Tablica 6-1. Udio pojedinih komponenti u ukupnom gubitku tlaka u tubingu (Beggs 2003)

7. METODE ODREĐIVANJA GRADIJENTA TLAKA PRI DVOFAZNOM PROTJECANJU

Razne metode su razvijene kroz godine provedenih proračuna i istraživanja. Neke od metoda su dosta pojednostavljene pa ne donose dobre rezultate. Parametri koji su najbitniji za provedbu proračuna su koeficijent zaostajanja kapljevine i dvofazni faktor trenja, ali ne postoji analitički proračun za određivanje ova dva parametra. Eksperimentalnim mjerenjima dolazi se do vrijednosti koeficijenta h_l i dvofaznog faktora trenja f_m. Varijable koje su poznate će poslužiti pri empirijskoj korelaciji gornja dva parametra koji su zapravo funkcije poznatih varijabli. Razvijanje pojedinih korelacija izgleda ovako:

1. Odredi se protok q_l i q_g, promjer cijevi, nagib cijevi itd. Protjecanje mora biti stabilno.
2. Ispitna cijev duljine ΔL služi za mjerenje h_l i Δp. Providan dio ispitne cijevi omogućuje određivanje strukture protjecanja, a gustoća se mjeri pomoću nuklearnog mjerača gustoće.
3. Računanje gustoće smjese te hidrostatičke komponente gradijenta tlaka:

$$\rho_m = \rho_l h_l + \rho_g (1 - h_l)$$

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_H = \rho_m g \sin\theta$$

4. Ako se ne zanemaruje komponenta akceleracije provede se proračun, a potom se i dobije vrijednost komponente trenja:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_A = \frac{(\rho v dv)_k}{dL}$$

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_F = \frac{\Delta p}{\Delta L} - \left(\frac{dp}{dL}\right)_H - \left(\frac{dp}{dL}\right)_A$$

5. Proračun dvofaznog faktora trenja:

$$f_m = \frac{2d}{\rho_m v_m^2}\left(\frac{dp}{dL}\right)_F$$

6. Mijenjaju se ispitni uvjeti te proračun se vraća u točku 2 kako bi se odredili h_l, f_m i struktura protjecanja u širokom rasponu uvjeta.
7. Sada se mogu razviti empirijske korelacije za h_l, f_m i ako je moguće za strukturu protjecanja koje su funkcije poznatih varijabli, a to mogu biti v_{sl}, v_{sg}, d, svojstva fluida, kut nagiba cijevi itd.

7.1. Metoda Poettmanna i Carpentera

Prva metoda koja se bavila rješavanjem problema višefaznog protjecanja u bušotinama. Metoda se koristila na proizvodnim bušotinama koje su proizvodile eruptivno ili plinskim liftom.

Podaci koji su korišteni za razvoj metode su dobiveni iz 334 eruptivnih bušotina i 15 bušotina koje su proizvodile kontinuiranim plinskim liftom. Većina bušotina je proizvodila manje od 80 m^3/dan kapljevine s GLR-om manjem od 270 m^3/m^3. Tubing kroz koji su bušotine proizvodile su bili u rasponu od 60,325 mm (2 3/8 in.) do 88,9 mm (3 ½ in.). Mjereni su samo tlak na ušću i dnu bušotine, te protok pa je zbog toga samo izvedena korelacija za dvofazni faktor trenja. Pretpostavljeno je da ne postoji klizanje između kapljevine i plina pa se zbog toga koristio koeficijent zaostajanja kapljevine bez klizanja, λ_l, za proračun gustoće smjese preko jednadžbe (3-13). Jednadžba gradijenta je zapisana pomoću jednadžbi (3-29), (3-30), (3-31), a komponenta akceleracije je zanemarena.

$$\frac{dp}{dH} = \rho_m g + \frac{f_m \rho_f v_m^2}{2d} \tag{7-1}$$

Autori metode su koristili Fanningov dvofazni faktor trenja, $f' = f_m/4$, te su uzeli $\rho_f = \rho_m$. Ako se brzina protjecanja smjese, v_m, izrazi preko masenog protoka, $\dot{m}$, tada jednadžba glasi:

$$\dot{m} = \rho_m v_m A = \rho_m v_m \frac{d^2\pi}{4} = v_m = \frac{4\dot{m}}{\rho_m d^2 \pi} \tag{7-2}$$

$\dot{m}$ – maseni protok smjese, kg/s

$$\frac{dp}{dH} = \rho_m g + \frac{32 f' \dot{m}^2}{\pi^2 d^5 \rho_m} \tag{7-3}$$

Kako bi odredili gradijent tlaka dvofaznog protjecanja potrebno je odrediti gustoću smjese i maseni protok smjese. Pretpostavljeno je da nema klizanja između faza pa će se gustoća smjese izračunati pomoću jednadžbe (3-13):

$$\rho_m = \left.\frac{\rho_l q_l + \rho_g q_g}{q_l + q_g}\right|_{p,T} = \frac{\dot{m}}{q_m|_{p,T}} \tag{7-4}$$

U gornjoj jednadžbi je potrebno odrediti maseni protok smjese i obujamski protok smjese pri stvarnom tlaku i temperaturi kako bi se odredila gustoća smjese. Maseni protok se računa kao suma masenog protoka nafte i masenog protoka vode:

$$\dot{m}_l = q_o\rho_o + q_w\rho_w = q_o\rho_o + q_o\frac{f_w}{f_o}\rho_w = q_o\left(\rho_o + \frac{f_w}{f_o}\rho_w\right) \tag{7-5}$$

$\dot{m}_l$ – maseni protok kapljevine, kg/s

Maseni protok plina jednak je umnošku obujamskog protoka i gustoće plina pri standardnom tlaku i temperaturi, tj:

$$\dot{m}_g = q_g\rho_g\big|_{p_{sc},T_{sc}} = q_o R_p \frac{M_g p_{sc}}{RT_{sc}} \tag{7-6}$$

$\dot{m}_g$ – maseni protok plina, kg/s

M_g – molarna masa plina, kg/mol

$R = 8{,}314\ \frac{J}{mol\,K}$, opća plinska konstanta

$p_{sc} = 101325\ Pa$, standardni tlak

$T_{sc} = 288{,}15K$, standardna temperatura

Proizvodni plinski faktor, R_p, je omjer obujma proizvedenog plina i obujma proizvedene nafte pri standardnim uvjetima tlaka i temperature. Jednadžbe (7-5) i (7-6) daju konačnu jednadžbu masenog protoka smjese:

$$\dot{m} = q_o\left(\rho_o + \frac{f_w}{f_o}\rho_w + R_p\frac{M_a\gamma_g p_{sc}}{RT_{sc}}\right) \tag{7-7}$$

M_a – molarna masa zraka, kg/mol

γ_g – relativna gustoća plina

Obujamski protok kapljevine odgovara sumi obujamskog protoka vode i nafte pri stvarnim uvjetima tlaka i temperature:

$$q_l|_{p,T} = q_o B_o + q_w B_w = q_o \left(B_o + \frac{f_w}{f_o} B_w \right) \tag{7-8}$$

Obujamski protok plina se računa kao omjer masenog protoka slobodnog plina i gustoće plina pri stvarnoj temperaturi i tlaku:

$$q_g\big|_{p,T} = \left. \frac{\dot{m}_g}{\rho_g} \right|_{p,T} = q_o \left(R_p - R_s\right) \frac{p_{sc} Z T}{p T_{sc}} \tag{7-9}$$

R_s – faktor otopljenog plina pri stvarnom tlaku i temperaturi, m^3/m^3

Z – faktor kompresibilnosti

p – stvarni tlak, Pa

T – stvarna temperatura, K

Obujamski protok smjese je suma obujamskog protoka kapljevine i obujamskog protoka plina pri stvarnim uvjetima:

$$q_m|_{p,T} = q_o \left[B_o + \frac{f_w}{f_o} B_w + \left(R_p - R_s\right) \frac{p_{sc} Z T}{p T_{sc}} \right] \tag{7-10}$$

Tlakovi su mjereni na ušću i dnu bušotine pa se iz njih može odrediti gradijent tlaka dp/dH. Koristeći jednadžbu (7-7) i (7-10) izračuna se maseni protok i obujamski protok na dnu i ušću bušotine, a potom i gustoća smjese preko jednadžbe (7-4). Između dna i ušća bušotine gustoća smjese se proračuna kao aritmetička sredina. Sada je moguće odrediti dvofazni faktor trenja, odnosno Fanningov faktor trenja, f', pomoću jednadžbe (7-3):

$$f' = \frac{\frac{dp}{dH} \pi^2 d^5 \rho_m}{\rho_m^2 g \pi^2 d^5 + 32 \dot{m}^2} \tag{7-11}$$

Autori su korelirali izračunati faktor trenja s brojnikom Reynoldosovog broja, tj. s parametrom $\rho_m v_m d$, koji se još može iskazati preko masenog protoka, kao:

$$\rho_m v_m d = \frac{4\dot{m}}{\pi d} \tag{7-12}$$

Proračunati parametri su prikazani na slici 7-1, a korelacija se može iskazati i sljedećim izrazom (Guo i Ghalambor, 2002):

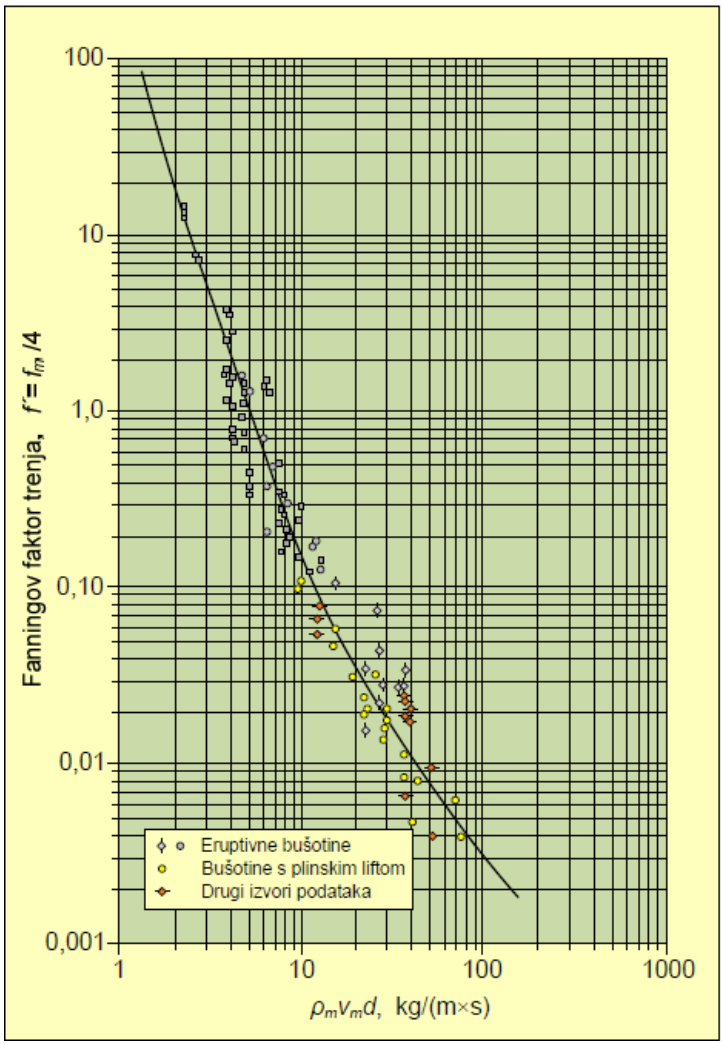
$$f' = 10^{1.444 - 2{,}5 \log(\rho_m v_m d)} \tag{7-13}$$

gdje su dimenzije parametra $\rho_m v_m d$ iskazane u $lb_m/(ft \times s)$. Korelirajući parametar dan u SI jedinicima (kg/(m×s)) pretvara jednadžbu u:

$$f' = 10^{1{,}8766 - 2{,}5 \log(\rho_m v_m d)} \tag{7-14}$$

Metoda u praktičnoj primjeni se koristi kao i u prethodno opisanom postupku, ali se faktor trenja odredi pomoću korelacije (7-14), a s pomoću jednadžbe (7-3) računa se gradijent tlaka. Gradijent tlaka se pretpostavlja i pomoću njega se izračuna gustoća smjese pa je zbog toga postupak iterativan. Mora se naglasiti da osrednjavanje gustoće smjese može znatno utjecati na rezultate pa se zbog toga bušotina može podijeliti na manje segmente i model proračuna se može primijenitit na svaki segment za bolji rezultat.

Metoda obuhvaća sve gubitke u komponenti trenja i koristila se zbog nemogućnosti određivanja zaostajanja kapljevine. Uvjeti pod kojima su napravljene korelacije će jako utjecati na proračune kod nekih bušotina koje imaju sasvim različite uvjete.



Slika 7-1. Poettmann-Carpenterova korelacija faktora trenja (Poettmann i Carpenter 1952)

7.2. Metoda Hagedorna i Browna

Metoda razvijena 1965. godine na osnovi dobivenih podataka o padu tlaka i protoku u ispitnoj bušotini dubokoj 500 m. Promjer tubinga kreće se od 31,75 mm (1 ¼ in.) do 73 mm (2 7/8 in.). Protok kapljevine te omjer plina i kapljevine se proučavao u širokom rasponu, a viskoznost se proučavala pomoću vode i nafte kao kapljevite faze. Vrijednost viskoznosti nafte u standardnim uvjetima iznosila je 10, 35 i 110 mPa·s.

U pokusima je dana korelacija za izračunato zaostajanje kapljevine. Dvofazni Reynoldsov broj je poslužio kako bi se preko Moodyjevog dijagrama odredio dvofazni faktor trenja. Vrijednost

koeficijenta, h_l, u izrazu za viskoznost je bitan za određivanje Reynoldsovog broja. Izračunati h_l se dobije postupkom od šest koraka:

1. Mjerenje dp/dL.
2. Pretpostavi se vrijednost koeficijenta zaostajanja kapljevine, h_l^*.
3. Dvofazni Reynoldsov broj, Re_m, se izračuna pomoću jednadžbe (7-18) i dvofazni faktor trenja, f_m, se očita iz Moodyjevog dijagrama.
4. Komponenta $(dp/dL)_F$ se izračuna preko jednadžbe (3-34) i komponenta $(dp/dL)_A$ preko jednadžbe (3-35).

5. Hidrostatička komponenta računa se iz mjerenog gradijenta tlaka i dobivenih komponenata u koraku 4, $(dp/dL)_H = \Delta p/\Delta L - (dp/dL)_F - (dp/dL)_A$. Proračunata komponenta se koristi u jednadžbi za određivanje gustoće smjese, $\rho_m = (dp/dL)_H/g$.
6. Iz jednadžbe (3-12) računa se $h_l = (\rho_m - \rho_g)/(\rho_l - \rho_g)$ i potom se usporedi s h_l^*.

Postupak je iterativan jer se želi postići konvergencija koeficijenata h_l^* i h_l, a postupak se ponavlja od koraka broj 3. Odabrani faktor trenja utječe na proračun gubitka tlaka, a dobivena vrijednost h_l ne mora biti stvarni koeficijent zaostajanja kapljevine, ali je to vrijednost koja će uravnotežiti gubitak tlaka.

Koeficijent zaostajanja kapljevine koreliran je s nekoliko bezdimenzionalnih brojeva i dva sekundarna popravna faktora. Bezdimenzionalne brojeve je razvio Ros 1961. godine, a računaju se prema jednadžbama:

- broj brzine kapljevine

$$N_{lv} = v_{sl}\left(\frac{\rho_l}{g\sigma}\right)^{0,25} \tag{7-14}$$

- broj brzine plina

$$N_{gv} = v_{sg}\left(\frac{\rho_l}{g\sigma}\right)^{0,25} \tag{7-15}$$

- broj promjera cijevi

$$N_d = d\left(\frac{g\rho_l}{\sigma}\right)^{0,5} \tag{7-16}$$

- broj viskoznosti kapljevine

$$N_L = \mu_l\left(\frac{g}{\rho_l\sigma^3}\right)^{0,25} \tag{7-17}$$

Pomoću ovih bezdimenzionalnih brojeva dobiju se tri korelacije, slika 7-2, za određivanje vrijednost h_l.

Korelacije se koriste na sljedeći način:

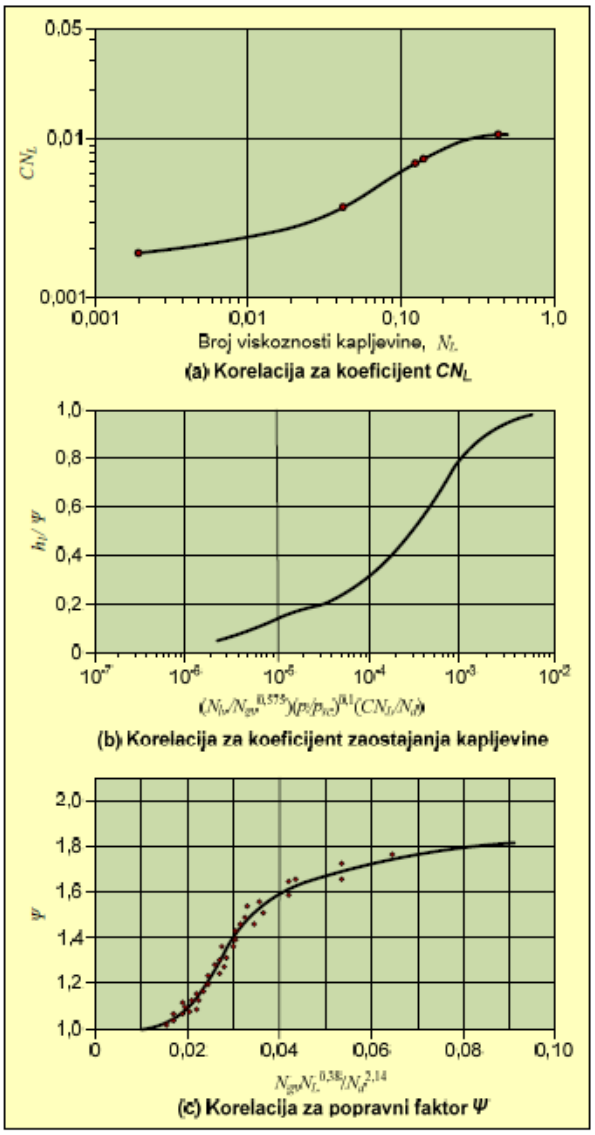
1. Proračun bezdimenzionalnih brojeva N_{lv}, N_{gv}, N_d i N_L prema jednadžbama (7-14) do (7-17).
2. Naći odgovarajući CN_L za izračunati N_L na slici (a).
3. Na slici (b) potrebno je odrediti vrijednost apscise za određeni tlak, p. Jednadžba za parametar na apscisi glasi:

$$\frac{N_{lv}}{N_{gv}^{0,575}}\left(\frac{p}{p_{sc}}\right)^{0,1}\frac{CN_L}{N_d}$$

4. Iz slike (b) isčitati odgovarajući omjer h_l/Ψ.
5. Na slici (c) izračuna se parametar na apscisi, a jednadžba glasi:

$$\frac{N_{gv}N_L^{0,38}}{N_d^{2,14}}$$

6. Iz slike (c) naći odgovarajući Ψ.
7. Sada je moguć proračun h_l iz očitanih vrijednosti h_l/Ψ i Ψ.



Slika 7-2. Korelacije Hagedorna i Browna (Hagedorn i Brown 1965)

Nakon što je određen koeficijent zaostajanja kapljevine računaju se komponente gradijenta tlaka. Jednadžba (3-30) se koristi za proračun hidrostatičke komponente, a komponenta trenja se računa prema jednadžbi (3-34) uz to da je gustoća smjese definirana kao $\rho_f = \rho_n^2/\rho_m$. Moodyjev dijagram koristi za određivanje dvofaznog faktora trenja, a prije toga se mora proračunati Reynoldsov broj pomoću jednadžbe:

$$Re_m = \frac{\rho_n v_m d}{\mu_m} \tag{7-18}$$

Re_m – Reynoldsov broj smjese

μ_m – viskoznost smjese, Pa×s

Komponenta akceleracije se zanemaruje osim u slučaju da je brzina protjecanja velika, a tada se koristi jednadžba (Beggs 2003):

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_A = \frac{\rho_m v_m v_{sg}}{p}\frac{dp}{dL} \tag{7-19}$$

Izraz u gornjoj jednadžbi se može zapisati kao:

$$E_k = \frac{\rho_m v_m v_{sg}}{p} \tag{7-20}$$

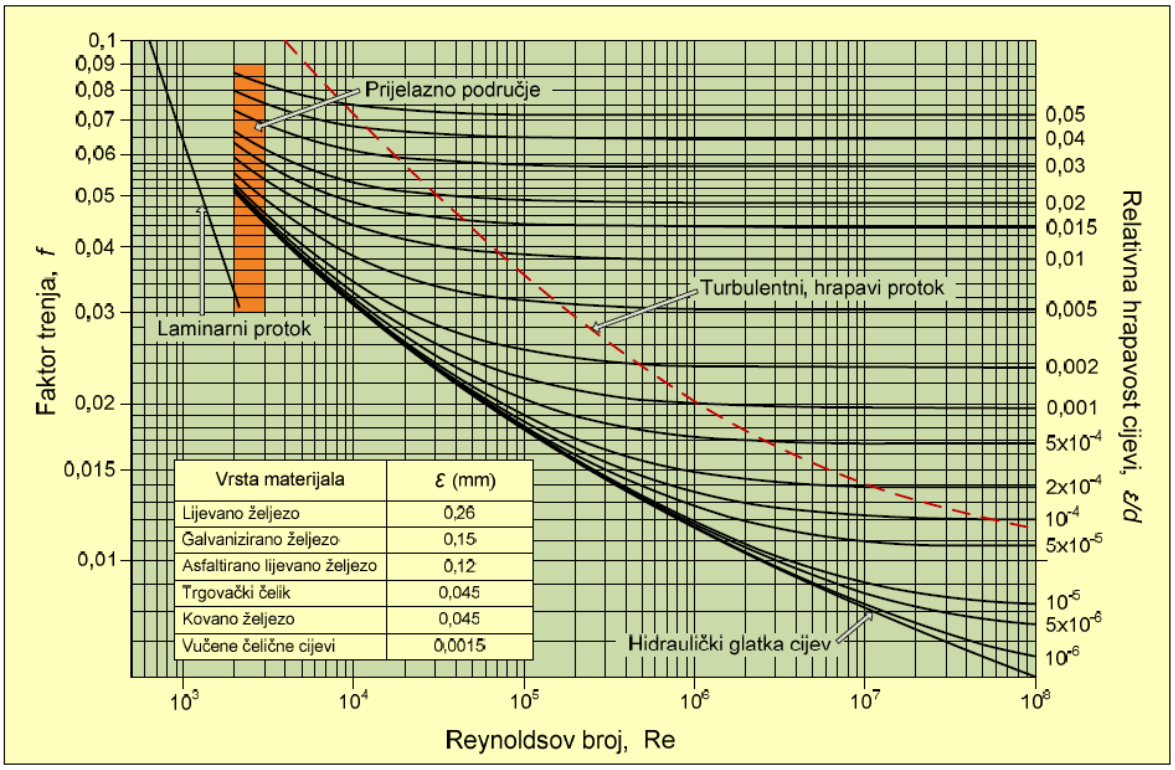
Jednadžba ukupnog gradijenta tlaka sada glasi:

$$\frac{dp}{dL} = E_k \frac{dp}{dL} + \left(\frac{dp}{dL}\right)_H + \left(\frac{dp}{dL}\right)_F \tag{7-21}$$

Nakon sređivanja, krajnja jednadžba izgleda ovako:

$$\frac{dp}{dL} = \frac{\left(\frac{dp}{dL}\right)_H + \left(\frac{dp}{dL}\right)_F}{1 - E_k} \tag{7-22}$$

Metoda Hagedorna i Browna jedna je od najraširenijih metoda koja se koristi u naftnoj industriji, a pokazala je da daje dobre rezultate u širokom rasponu bušotinskih uvjeta.



Slika 7-3. Moodyjev dijagram (Moody 1944)

7.3. Metoda Dunsa i Rosa

Istraživanje je provedeno na 4000 pokusa sa 20 000 podataka, a rabljeni su zrak, nafta i voda kao komponente fluida s tim da su pokusi provedeni pri niskim tlakovima. Promjeri cijevi bili su u rasponu od 3,2 do 8,02 cm, a ispitni dio cijevi je bio 10 m dug.

Struktura protjecanja je određivana pomoću providnog dijela cijevi, a zaostajanje kapljevine je mjereno s radioaktivnim obilježivačima. Površinske brzine kapljevite i plinovite faze su iskorištene tako da je konstruirana karta strukture protjecanja. Područja protjecanja su opisana ovako:

- Područje *I*.: Mjehuričasta struktura protjecanja. Kapljevita faza je kontinuirana, a plinovita se giba kao diskontinuirani mjehurići ili čepovi.
- Područje *II*.: Čepolika struktura protjecanja. Plinska i kapljevita faza su diskontinuirane.

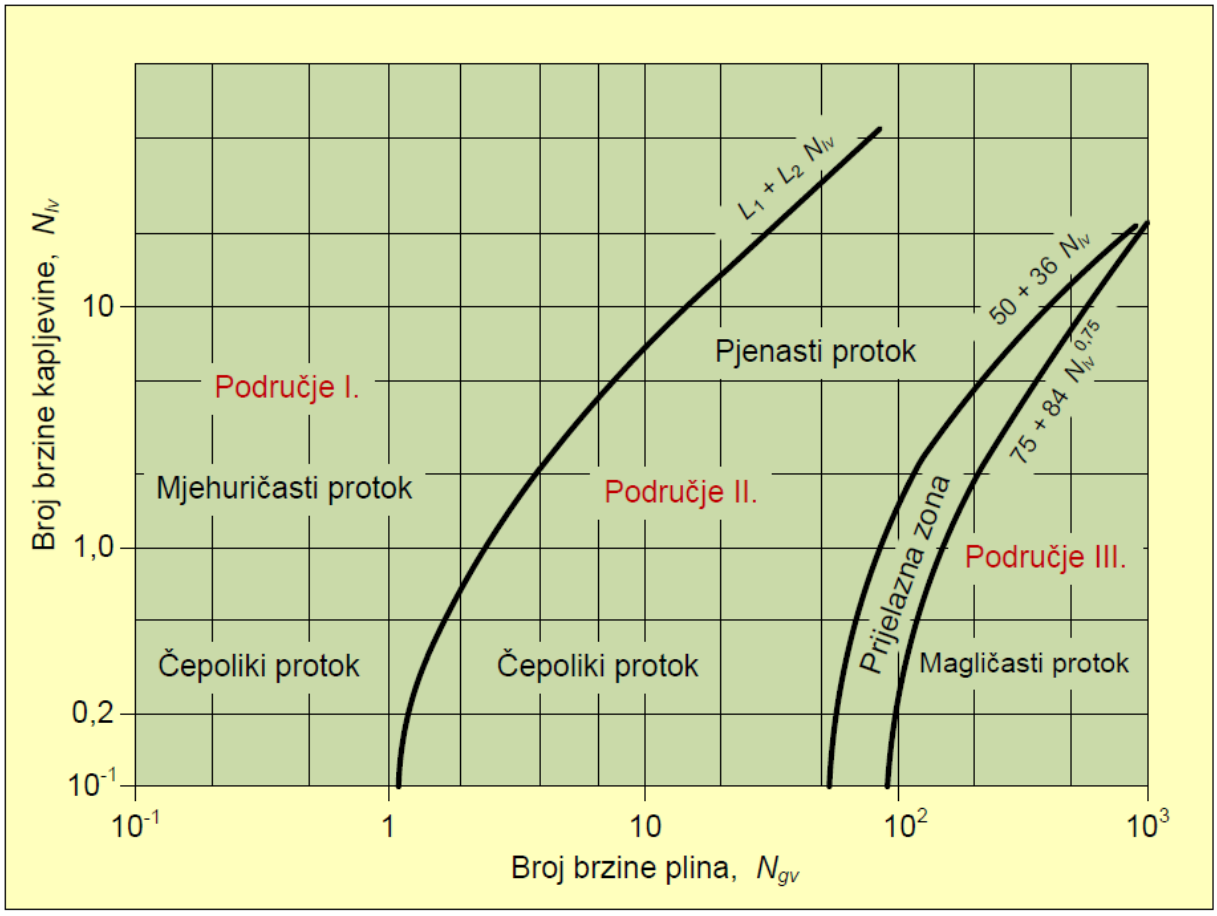
- Područje $III.$: Magličasta struktura. Kapljevita faza se giba kao kapljice dispergirane u plinu ili kao prsten uz stijenke cijevi, a plinovita faza je kontinuirana.

Karta područja se nalazi na slici 7-4. Granice područja su funkcije bezdimenzionalnih brojeva N_{lv}, N_{gv}, N_d, i N_L. Bezdimenzionalni brojevi izračunati su iz jednadžbi (7-14) do (7-17).

Granice su određene na sljedeće način:

- Područje $I.$: $0 \leq N_{gv} \leq (L_1 + L_2 N_{lv})$
- Područje $II.$: $(L_1 + L_2 N_{lv}) \leq N_{gv} \leq (50 + 36 N_{lv})$
- Područje $III.$: $N_{gv} \geq \left(75 + 84 N_{lv}^{0,75}\right)$

L_1 i L_2 – pokazatelji koji su funkcija N_d dani grafički na slici 7-4



Slika 7-4. Karta struktura protjecanja prema Dunsu i Rosu (Duns i Ros 1963)

Za svako područje korištene su posebne korelacije za koeficijent zaostajanja kapljevine i za faktor trenja. Akceleracija se smatra bitnom samo u području *III*, a to je zbog prevladavajuće količine plinovite faze. Bezdimenzionalna brzina klizanja je korištena za korelaciju koeficijenta zaostajanja kapljevine, a jednadžba za brzinu glasi:

$$N_s = v_s \left(\frac{\rho_l}{g\sigma}\right)^{0,25} \tag{7-23}$$

Određena brzina klizanja će poslužiti za proračun koeficijenta zaostajanja kapljevine preko jednadžbe:

$$v_s = v_g - v_l = \frac{v_{sg}}{h_g} - \frac{v_{sl}}{h_l} \tag{7-24}$$

Prebacivanjem h_l na jednu stranu dobije se jednadžba:

$$h_l = \frac{v_s - v_m + [(v_m - v_s)^2 + 4v_s v_{sl}]^{1/2}}{2v_s} \tag{7-25}$$

Metoda Dunsa i Rosa daje dobre rezultate za proračune u širokom rasponu bušotinskih uvjeta, a obnovljena verzija metode se naziva *Shell* metoda.

7.4. Usporedba metoda

Metoda Poettmanna i Carpentera korištena je u početcima rješavanja problema višefaznog protjecanja u bušotini, ali ne preporuča se za današnje analize. Davala bi dobre rezultate, ako bi se koristila za analizu bušotina koje imaju slične uvjete pod kojima je metoda zapravo i nastala. Najveći utjecaj na pogreške ima izostavljanje hidrostatičke komponente i komponente akcelaracije iz proračuna gradijenta tlaka.

Hagedorn i Brown metoda se koristi u širokom rasponu bušotinskih uvjeta. Promjena svojstava kapljevine i plina, odnosa kapljevine i plina neće toliko utjecati na rezultate metode. Dokazano je da daje dobre rezultate pri njihovoj promjeni i zato se može koristiti pri analizi proizvodnje plinskim liftom ili pumpama u naftnim bušotinama.

Na rezultate će utjecati struktura dvofaznog protjecanja pa je preporučeno koristiti metode pri mjehuričastom ili čepolikom protjecanju. Veće količine plina u uzlaznim cijevima će promijeniti strukturu protjecanja i dolazit će do pojave pogrešaka u proračunu. Odnos

kapljevine i plina pri kojima metoda daje dobre rezultate; $GLR = 0 - 580 m^3/m^3$. Bitno je i napomenuti granice protoka kapljevine; $q_l = 5 - 270 m^3/d$.

Postoji i mogućnost reduciranja metode na procjenu jednofaznog protoka gdje vrijednost zaostajanja kapljevine ili plina i protok kapljevine ili plina se izrazi kao ništica te se analizira protjecanje samostalne faze.

Za razliku od prošle metode, metoda Dunsa i Rosa se koristi pri svim strukturama protjecanja, a od svih metoda daje najbolje rezultate tijekom prstenasto – magličastog protjecanja. Metoda se koristi za razne bušotine i daje dobre rezutate u širokom rasponu bušotinskih uvjeta, ali vrijedno je spomenuti da je često korištena pri analizi protjecanja u plinsko – kondenzatnim bušotinama, gdje se javljaju velike vrijednosti odnosa kapljevine i plina.

Pošto se u metodi određuju područja protjecanja, važno je poznavanje vrijednosti superficijalnih brzina kapljevine i plina. Vrijednost superficijalne brzine kapljevine se kreće u rasponu: $v_{sl} = 0 - 100 m/s$, vrijednost superficijalne brzine plina se kreće u rasponu; $v_{sg} = 0 - 3 m/s$.

Brzine će se mijenjati kao i svojstva i to će utjecati na provedbu proračuna u jednoj od strukturi protjecanja.

Pri kojoj strukturi se odvija protjecanje će utjecati na točnost proračuna. U svim metodama postoji mogućnost zanemarivanja komponente akceleracije, ali ta upotreba je ograničena jer u slučaju gdje dolazi do povećanja protjecanja plina, porasti će brzina protjecanja smjese i komponenta akceleracije će se morati uvesti u proračun gradijenta tlaka za dvofazno protjecanje.

8. ZAKLJUČAK

Cijela analiza dvofaznog protjecanja se bavi određivanjem gradijenta tlaka. Jednadžba gradijenta tlaka se zasniva na zakonu održanja energije. Bitno je poznavati koliki će biti pad tlaka kroz tijek proizvodnje jer ležišni tlak nakon početka proizvodnje je u konstantom padu, a nakon toga slijede sekundarne metode pridobivanja ugljikovodika iz bušotine.

Prije nego se krene u analizu gradijenta tlaka različitim metodama, potrebno je poznavati varijable dvofaznog protjecanja, kao što su: gustoća i viskoznost kapljevine, itd. Na gradijent tlaka utječe i promjer tubinga pa se i to mora uzeti u obzir prilikom projektiranja proizvodnje bušotine.

Metode za određivanje gradijenta tlaka se osobito bave određivanjem koeficijenta zaostajanja kapljevine i dvofaznog faktora trenja. Njihovo određivanje nije jednostavan analitički proračun, nego je potrebno koristiti empirijske korelacije te iterativne proračune.

Poznato je da nafta u ležištu sadrži otopljeni plin, količina tog plina će utjecati na strukturu dvofaznog protjecanja. Kroz cijelu duljinu uzlaznih cijevi dolazi do promjene strukture dvofaznog protjecanja zbog odvajanja plina prilikom pada tlaka, a tlak pada u smjeru protjecanja tekućine. Što se fluid više približava ušću bušotine, to se više plin izdvaja te može postati prevladavajuća faza u odnosu na naftu.

Struktura dvofaznog protjecanja ima veliki utjecaj na metode za određivanje gradijenta tlaka. Neke metode neće davati točne rezultate, ako fluid ima različitu strukturu od onog na kojem je zasnovana metoda, npr. metoda Hagedorna i Browna daje najbolje rezultate prilikom mjehuričastog ili čepolikog protjecanja. Metoda Dunsa i Rosa se može koristiti pri svim strukturama protjecanja, ali najtočnije rezultate daje pri prstenasto-magličastom protjecanju.

Sve ove metode mogu se koristiti za određivanje gradijenta tlaka, ali najbolje rezultate daju ako su uvjeti jednaki ili slični onim uvjetima pri kojima su metode nastale. Ipak, metoda koja bi davala najbolje rezultate i s najmanje pogrešaka u slučaju da su i uvjeti različiti, bila bi metoda Dunsa i Rosa.

9. LITERATURA

BEGGS, H.D., 2003. *Production optimization using NODAL analysis*. 2.izd. Online: STEM Akamigas Cepu.

ČIKEŠ, M., 2015. *Proizvodno inženjerstvo nafte i plina*. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

GOVIER, G.W., AZIZ VAN NOSTRAND REINHOLD, K., 1972. *The flow of complex mixtures in pipes*. Online: Cambridge University Press.

SEČEN, J., 1977. *Pridobivanje nafte eruptivnim načinom*. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

TURCOTTE, D., SCHUBERT, G., 2018. *Geodynamics*. 3.izd. Online: Cambridge University Press.

VULIN, D., 2016. *Višefazni protok u poroznoj stijeni: interna skripta*. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

INTERNET IZVORI:

XIAOPENG, (ROY), LI., 2013. *A combined bottom-hole pressure calculation procedure using multiphase correlations and artificial neural network models.*: https://mountainscholar.org/bitstream/handle/11124/79529/LI_mines_0052N_10287.pdf?sequence=1;A (2.7.2020)

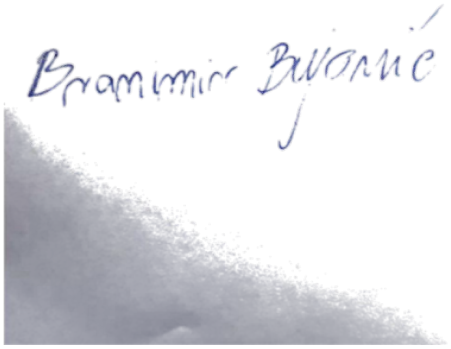
MAURER ENGINEERING INC., 1994. *Multiphase flow production model*: https://www.bsee.gov/sites/bsee.gov/files/tap-technical-assessment-program//300ae.pdf (2.7.2020)

IZJAVA

o samostalnoj izradi završnog rada

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na temelju stečenih znanja na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, služeći se navedenom literaturom.

Potpis studenta/ice:



KLASA: 402-04/20-01/59
URBROJ: 251-70-03-20-3
U Zagrebu, 04.09.2020.

Branimir Bujanić, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM: 602-04/20-01/59, UR.BROJ: 251-70-12-20-1 od 03.04.2020. godine priopćujemo temu završnog rada koja glasi:

DVOFAZNO PROTJECANJE KAPLJEVINE U UZLAZNIM CIJEVIMA

Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o završnom ispitu dr. sc. Vladislav Brkić, docent Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Voditelj

(potpis)

Doc. dr. sc. Vladislav Brkić
(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za završne i diplomske ispite

(potpis)

Doc. dr. sc. Vladislav Brkić
(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek
(titula, ime i prezime)