Odstupanja od idealnog proizvodnog modela vertikalne plinske bušotine

Mateševac, Filip

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:169:480208

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-12**

Repository / Repozitorij:

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

zir.nsk.hr

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Preddiplomski studij naftnog rudarstva

ODSTUPANJA OD IDEALNOG PROIZVODNOG MODELA VERTIKALNE PLINSKE BUŠOTINE

Završni rad

Filip Mateševac
N4488

Zagreb, 2022.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Završni rad

ODSTUPANJA OD IDEALNOG PROIZVODNOG MODELA VERTIKALNE PLINSKE BUŠOTINE

FILIP MATEŠEVAC

Završni rad je izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Diferencijalna jednadžba za radijalni protok jednofaznog fluida iz ležišta u bušotinu i njena tri rješenja za neustaljeno, poluustaljeno i ustaljeno stanje protoka pri uvjetu konstantnog tlaka ili kod konstantnog protoka na dnu bušotine, su teoretska osnova idealnih modela za određivanje proizvodnih mogućnosti bušotine, odnosno za tzv. IPR ili indikatorske krivulje. Stvarni uvjeti u ležištu odstupaju od idealnih uvjeta, pa se stoga, prilikom proračuna proizvodnih mogućnosti, idealni uvjeti prilagođavaju realnima, u svrhu točnije prognoze budućeg dinamičkog tlaka ili protoka bušotine. Ova prilagodba odnosi se na matematičke izraze izvedene iz osnovnih rješenja jednadžbe difuzije opisane kroz odstupanja od idealnog proizvodnog modela. U slučaju protoka plina u vertikalnoj bušotini u radu je izdvojeno devet odstupanja, a proračun dinamičkog tlaka uz pretpostavku održavanja konstantnog protoka je proveden za dva primjera. Prvi proračun se odnosi na odstupanje uslijed stlačivosti fluida, a drugi na odstupanje radi turbulentnog protoka plina.

Ključne riječi: radijalni protok u bušotini, idealni proizvodni model

Završni rad sadrži: 23 stranice, 7 slika, 1 tablicu i 7 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Završni rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: dr. sc. Sonja Koščak Kolin, docentica RGNf-a

Ocjenjivači: dr. sc. Sonja Koščak Kolin, docentica RGNf-a
dr. sc. Vladislav Brkić, izvanredni profesor RGNf-a
dr. sc. Borivoje Pašić, izvanredni profesor RGNf-a

Datum obrane: 16. rujna 2022., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....I

POPIS TABLICA……...I

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA…….II

POPIS KORIŠTENIH KRATICA……..V

1. UVOD……..……1

2. PROTOK FLUIDA IZ LEŽIŠTA U BUŠOTINU……..……..…….....2

2.1. Zakonitosti protjecanja fluida u ležištima nafte i plina……..……..2

2.2. Radijalni protok……...……..…….…….3

2.3. Neustaljeno, poluustaljeno i ustaljeno stanje protoka……..……...…….5

2.3.1. Neustaljeni protok……..…….....5

2.3.2. Poluustaljeni protok……...……...……...……5

2.3.3. Ustaljeni protok…….……..6

3. ODSTUPANJA OD IDEALNIH MODELA…….……...……...7

3.1. Odstuapnje radi stlačivosti fluida…….....……7

3.2. Odstupanje radi dvofaznog protoka……...…….……8

3.3. Odstupanje radi promijenjene propusnosti u pribušotinskoj zoni…….……...…...8

3.4. Odstupanje radi turbulentnog protoka……...……..……..10

3.5. Odstupanje radi načina opremanja bušotine……..……11

3.5.1. Otvoreni kanal bušotine……..…….……..11

3.5.2. Kanal bušotine opremljen zaštitnim cijevima……..…...…….…..12

3.5.3. Kanal bušotine opremljen pješčanim zasipom……..…….13

3.6. Odstupanje radi promjenjivog protoka i više bušotina u ležištu……...….14

3.7. Odstupanje radi nesimetrične površine crpljenja……..…...…….14

3.8. Odstupanje radi utjecaja obujma bušotine……..…...……....…15

4. ODREĐIVANJE PROIZVODNIH MOGUĆNOSTI BUŠOTINE……..……...16

4.1. Primjena proizvodnog modela kod odstupanja radi stlačivosti fluida……... ……...16

4.2. Primjena proizvodnog modela kod odstupanja radi turbulentnog protoka……..…..…19

5. ZAKLJUČAK……..22

6. LITERATURA……...……..…….23

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Radijalni protok……...……...3

Slika 2-2. Ležišni tlak u ovisnosti o udaljenosti od kanala bušotine……...4

Slika 2-3. Ponašanje tlaka u ležištu tijekom neustaljenog i poluustaljenog protoka……...6

Slika 3-1. Skin efekt……...……9

Slika 3-2. Nezacijevljen kanal bušotine……...……12

Slika 3-3. Usporedba nezacijevljenog i zacijevljenog načina opremanja bušotine……...13

Slika 4-1. Vrijednosti pseudotlakova……...……17

POPIS TABLICA

Tablica 4-1. Ulazni podatci……16

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA

A – površina prostiranja ležišta, m^2

B – obujamski faktor, m^3/m^3

C – konstanta skladištenja bušotine, m^3/Pa

d – promjer cijevi, m

g – ubrzanje gravitacijske sile, m/s^2

k – propusnost šupljikavog medija, m^2

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

p – tlak, Pa

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

T – stvarna temperatura, K

v – prividna brzina protjecanja, m/s

μ – dinamička viskoznost fluida, Pa×s

ρ - gustoća smjese, kg/m^3

$\nabla\phi$ – gradijent tlaka u smjeru protoka, Pa/m

r – radijus, m

r_w – efektivni radijus, m

r_{eD} – bezdimenzionalni radijus bušotine, -

ϕ – šupljikavost, -

c – stlačivost, Pa^{-1}

t – vrijeme, s

t_D – bezdimenzionalno vrijeme, -

m(p) – pseudotlak realnog plina, Pa/s

p_b – tlak zasićenja naftnog ležišta, Pa

Z – faktor kompresibilnosti

$\bar{p}$ – srednji ležišni tlak, Pa

h – efektivna debljina ležišta, m

r_e – radijus crpljenja, m

r_w – radijus bušotine, m

s – skin faktor, -

p_i – početni ležišni tlak, Pa

p_D – bezdimenzionalni tlak, -

p_{sc} = 101325 Pa, standardni tlak

$\bar{\mu}$ – srednja dinamička viskoznost fluida, Pa×s

$\bar{z}$ – srednji faktor kompresibilnosti, -

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

Δp_s – pad tlaka uslijed skin faktora, Pa

r_s – radijus pribušotinske zone promijenjene propusnosti, m

k_s – promijenjena propusnost stijene u pribušotinskoj zoni, m^2

β – faktor turbulencije, m^{-1}

D – koeficijent turbulentnog protoka, s/m^3

s_0 – skin faktor bez turbulencije, -

p_e – tlak na radijusu crpljenja bušotine, Pa

β_s – faktor turbulencije u pribušotinskoj zoni, m^{-1}

s_p – skin faktor ovisan o geometriji perforacija, -

s_{dp} – skin faktor prouzročen smanjenom propusnosti u zbijenoj zoni oko perforacija, -

h_p – duljina perforiranog intervala, -

k_H – horizontalna propusnost stijene, m^2

k_V – vertikalna propusnost stijene, m^2

L_p – duljina perforacija, m

N – broj perforacija, -

k_{dp} – propusnost ležišta u zbijenoj zoni oko perforacija, m^2

r_{dp} – radijus zbijene zone oko perforacije, m

r_p – radijus perforacija, m

D_{dp} – koeficijent turbulentnog protoka unutar perforacije, s/m^3

Δp_g – pad tlaka kroz pješčani zasip, Pa

k_g – efektivna propusnost ležišne stijene za plin, m^2

M_a – molarna masa zraka, kg/mol

γ_g – relativna gustoća plina

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

β_g – faktor turbulencije u pješčanom zasipu, m^{-1}

c_t – ukupna stlačivost ležišta, Pa^{-1}

C_A – faktor oblika površine crpljenja vertikalne bušotine, -

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

VLP (engl. *Vertical Lift Performance*) krivulja vertikalnog podizanja fluida

IPR (engl. *Inflow Performance Relationship*) indikatorska krivulja

1. UVOD

Proizvodni modeli, koji se koriste kao teoretska podloga za modeliranje proizvodnih sustava nafte i plina u softverima kao što je Prosper, su matematički modeli koje naftni inženjeri koriste za predviđanje, unaprjeđenje i kontrolu proizvodnje ugljikovodika od ležišta do površine. Izvedeni su na temelju mnogih analiza i daju neophodan uvid u promjene stanja proizvodnog sustav. Svako ležište je jedinstveno, ali, uz određene pretpostavke o ležištu, samome fluidu i njegovom protoku, idealizirana ležišta i fluide je moguće matematički opisati jednadžbom difuzije za radijalni protok i dobivena rješenja svrstati u jednu od šest mogućih skupina.

Stvarna ležišta i fluidi odstupaju na različite načine od idealnih pretpostavki. Upravo ta odstupanja od idealnog proizvodnog modela i njihov utjecaj na samu proizvodnju, tema su ovoga rada. Postoji mnogo odstupanja, a ovdje su predočena najznačajnija.

Za razumjevanje odstupanja od idealnog proizvodnog modela, u radu su najprije opisane postavke idealnog proizvodnog modela. Zatim je za odabrane slučajeve odstupanja napravljen preliminaran proračun procjene dinamičkih tlakova na dnu kanala bušotine pri uvjetu konstantnog protoka, nužnog za primjenu rješenja jednadžbe difuzije.

2. PROTOK FLUIDA IZ LEŽIŠTA U BUŠOTINU

2.1. Zakonitosti protjecanja fluida u ležištima nafte i plina

Protjecanje fluida u šupljikavom mediju se temelji na tri fizikalne zakonitosti: zakonu očuvanja mase, Darcyjevom zakonu i jednadžbi stanja.

Zakon očuvanja mase, u ovom slučaju, govori da fluid ne može nastati niti nestati, već je njegova masa konstantna. Međutim, napravi li se pokus u kojemu se protiskuje neki fluid kroz šupljikavi medij, količina fluida koji se protisne neće biti jednaka količini fluida koji će izaći iz tog medija jer se dio fluida uvijek zadrži unutar samoga medija.

Darcyjev zakon, nazvan po Henryju Darcyju, koji ga je prvi izveo, opisuje protok fluida kroz šupljikavi medij. Izražava volumni protok po jedinici površine kroz homogeno šupljikavi medij. Protok se odvija u smjeru smanjenja gradijenta tlaka. Zakon vrijedi za laminarni protok, a njegov matematički izraz glasi:

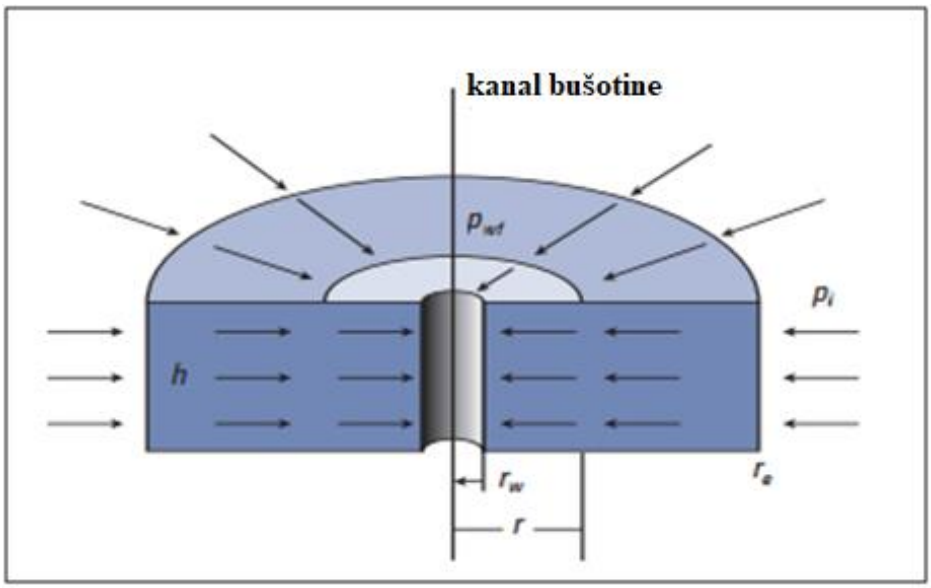
$$\nu = -\frac{k\rho}{\mu}\nabla\phi \tag{2-1}$$

Negativni predznak označava da se protok odvija u smjeru smanjenja gradijenta tlaka.

Jednadžba stanja prikazuje ovisnost gustoće fluida o tlaku i temperaturi, stoga treba birati jednadžbu stanja ovisno o vrsti fluida koji se promatra. Ležišna temperatura se može smatrati konstantom pa će gustoća fluida u ležištu ovisiti isključivo o tlaku ležišta. Kombinacijom ovih zakonitosti može se opisati laminarno protjecanje fluida kroz homogeno šupljikavi medij.

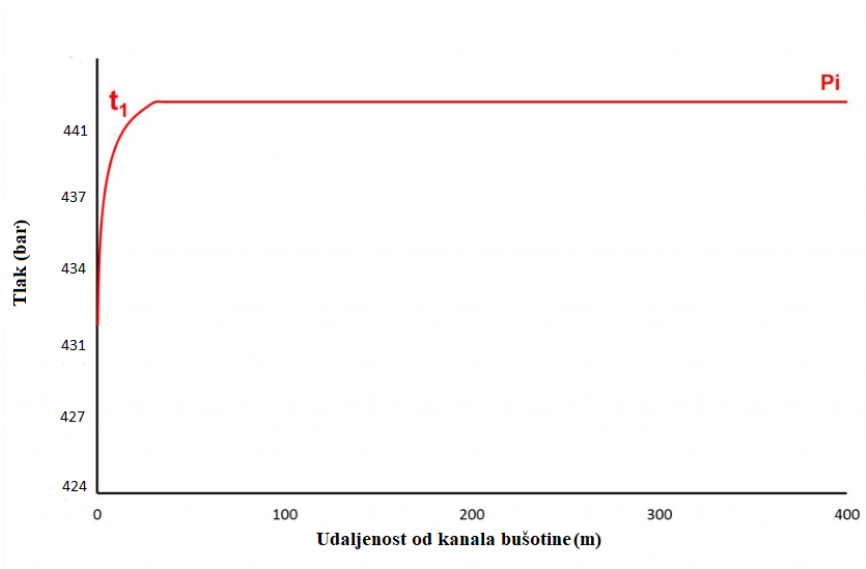
2.2. Radijalni protok

Radijalni protok je model protjecanja fluida iz ležišta u kanal bušotine (slika 2-1.). On je jednodimenzionalan, horizontalan i radijalan što znači da su smjernice protoka okomite na os kanala bušotine te sve konvergiraju k njoj. Model radijalnog protjecanja pretpostavlja da je proizvodna zona konstantne debljine, permeabilnosti te da je fluid idealan (Morton-Thompson, Woods, 1992).



Slika 2-1. Radijalni protok

Netaknuto ležište ima svoj početni tlak koji pada od trenutka kada krene proizvodnja iz toga ležišta. Taj pad tlaka u početku ne zahvaća cijelo ležište, nego samo dio koji je blizu kanala bušotine, odnosno smanjuje se s povećanjem udaljenosti od kanala (slika 2-2.). Stanje protoka kada većina ležišta ostaje nezahvaćena tim padom tlaka naziva se neustaljenim protokom (objašnjeno u poglavlju 2.3.1.).



Slika 2-2. Ležišni tlak u ovisnosti o udaljenosti od kanala bušotine (Testwells, 2015)

Radijalni protok fluida kroz šupljikavi medij matematički se može opisati diferencijalnom jednadžbom za radijalni protok koja se izvodi kombiniranjem zakona očuvanja mase i Darcyjevog zakona. Osnovni oblik diferencijalne jednadžbe za radijalni protok kroz šupljikavi medij glasi:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{k\rho}{\mu}r\frac{\partial p}{\partial r}\right) = \phi c\rho\frac{\partial p}{\partial t} \tag{2-2}$$

Ovaj oblik jednadžbe nije linearan jer se s obje strane jednadžbe nalazi tlak kao zavisna varijabla. Kako bi se mogla koristiti za dobivanje nekih analitičkih rješenja, potrebno ju je linearizirati. To se može postići na način da ju prikažemo u formi u kojoj su ostali koeficijenti zanemarivo malo ovisni o tlaku, odnosno da ih možemo smatrati konstantnima.

Linearizacija se izvodi posebno za slučaj protoka kapljevine i za slučaj protoka realnoga plina.

2.3. Neustaljeno, poluustaljeno i ustaljeno stanje protoka

Diferencijalna jednadžba za radijalni protok može dati beskonačno mnogo rješenja ovisno o zadanim uvjetima, stoga se najčešće primjenjuje metoda u kojoj se, kao početno stanje, uzimaju uvjeti u ležištu koji su vladali u njemu dok je ležište bilo netaknuto, odnosno dok je vladao početni tlak. Pretpostavlja se da se proizvodnja ugljikovodika odvija pri konstantnoj dobavi te da je radijus zone zahvaćene padom tlaka jednak radijusu kanala bušotine.

Ovom metodom možemo opisati tri najčešća, slučaja protoka fluida iz ležišta u kanal bušotine. Oni se nazivaju neustaljeni, poluustaljeni i ustaljeni protok.

2.3.1. Neustaljeni protok

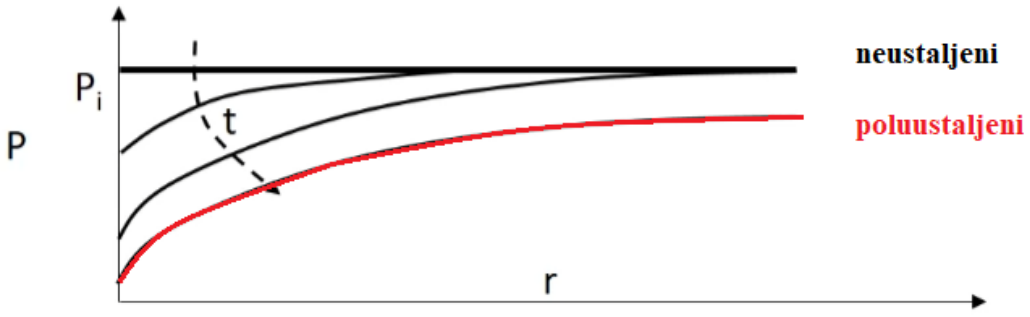
Ovaj slučaj vežemo uz rani stadij proizvodnje i relativno je kratkotrajan u odnosu na druga dva slučaja. Tijekom slučaja neustaljenog protoka na tlak još ne utječe vanjska granica ležišta, stoga ležište djeluje neograničeno.

Teorija ovoga slučaja protoka se najviše primjenjuje tijekom analize testova porasta tlaka, ali i prilikom proizvodnih testova, koji uključuje promjenu dobave te praćenje reakcije ležišta tj. tlaka u njemu, na tu promjenu kroz određeno razdoblje.

2.3.2. Poluustaljeni protok

Ovaj slučaj protoka nastupa nakon nekog vremena proizvodnje iz ležišta. Poluustaljeni protok se javlja kada granice ležišta počinju utjecati na proizvodnju, odnosno kada se pad tlaka proširi do granica ležišta. Tada se ležište prestaje ponašati kao neograničeno.

Promjena tlaka u jedinici vremena je obrnuto proporcionalna volumenu fluida u pornom prostoru, a za neustaljeni i poluustaljeni protok prikazana je na slici 2-3.



Slika 2-3. Promjene tlaka u ležištu tijekom neustaljenog i poluustaljenog protoka

2.3.3. Ustaljeni protok

Ustaljeni protok uslijedit će kada tlak na vanjskoj granici ležišta postane konstantan, dakle neće biti promjene tlaka u odnosu na vrijeme. Da bi bio moguć, potreban je neki način podržavanja tlaka. To može biti prirodan utok vode ili utisnuta voda.

Prilikom utiskivanja vode u ležište kao metodu podržavanja tlaka, nakon nekog razdoblja utiskivanja vode kroz jednu bušotinu te crpljenja smjese ugljikovodika i vode kroz drugu, te će se količine izjednačiti, odnosno crpit ćemo količinu jedanku onoj koju utiskujemo te će u ležištu vladati konstantan tlak (Dake, 1998). U tom trenutku se uspostavlja ustaljeni protok.

Bitno je napomenuti da se poluustaljeni i ustaljeni protok neće uvijek realizirati.

3. ODSTUPANJA OD IDEALNIH MODELA

Diferencijalna jednadžba za radijalni protok fluida iz ležišta u bušotinu i njena tri rješenja za neustaljeni, poluustaljeni i ustaljeni protok je ono što smatramo teoretskom podlogom za idealni proizvodni model. Preduvjet korištenja ovih rješenja, ovisno o tome radi li se o grupi rješenja za konstantan tlak ili za konstantan protok, je pretpostavka da se radi o idealnom ležištu i ležišnom fluidu. Ležište pretpostavljamo kao izotropno, homogeno, horizontalno te vertikalno ograničeno s nekim početnim tlakom. Ležišni fluid se pretpostavlja kao neznatno stlačivi fluid konstantne stlačivosti i viskoznosti. Šupljikavi medij je propustan, šupljikav i ima određenu debljinu. Također se pretpostavlja da svojstva ležišta ne ovise o tlaku te da se protok fluida u ležištu odvija prema Darcyevom zakonu. Gradijente tlaka pretpostavljamo kao male, a gravitacijske efekte zanemarujemo.

Stvarna svojstva ležišta i ležišnog fluida odstupaju od opisanih idealnih uvjeta, stoga je, prilikom proračuna proizvodnih mogućnosti bušotine, idealne uvjete potrebno prilagoditi realnima, a u radu su opisana odstupanja do kojih, u slučaju vertikalne plinske bušotine, dolazi najčešće.

3.1. Odstupanje radi stlačivosti fluida

Ovo odstupanje je značajno za kontekst ovog rada, jer se radi o plinskoj bušotini, a plin je fluid kojega karakterizira visoka stlačivost. Jednadžba difuzije pretpostavlja malu stlačivost, što je prihvatljivo za proračune vezane uz protok nafte, ali ne i za protok plina.

Jedna mogućnost pristupa ovom problemu je kombinacija jednadžbe difuzije za naftu i zakona realnog plina.

Kombiniranjem jednadžbe difuzije za naftu $p_i - p(r,t) = \frac{qB\mu}{2\pi kh} p_D$ i zakona realnog plina

$pV = znRT$ dobivamo rješenje jednadžbe difuzuije za plin (Čikeš, 2015).

$$p_i{}^2 - p_{wf}{}^2 = \frac{p_{sc} q \bar{\mu} \bar{z} T}{\pi T_{sc} kh} (p_D + s) \tag{3-1}$$

Bezdimenzionalni oblikednadžbe difuzije za protok plina uz korištenje funkcije pseudotlaka glasi:

$$m(p_i) - m(p_{wf}) = \frac{p_{sc}qT}{\pi T_{sc}kh}(p_D + s) \tag{3-2}$$

3.2. Odstupanje radi dvofaznog protoka

Dvofazni protok podrazumijeva istovremeni protok nafte i plina kroz šupljikavi medij, a javlja se i u kanalu bušotine, pri čemu utječe na gradijente dinamičkih tlakova u uzlaznim cijevima, koji se u proizvodnim modelima i u softveru opisuju tzv. VLP (engl. *Vertical Lift Performance*) krivuljama, ali u radu je obuhvaćen samo utok iz ležišta u bušotinu, kojeg opisuju tzv. IPR (engl. *Inflow Performance Relationship*) krivulje tj. indikatorske krivulje. Zakonitosti protoka mješavine dviju faza daleko su kompleksnije od zakonitosti jednofaznog protoka.

Bezdimenzionalna rješenja jednadžbe difuzije za naftu primjenjiva su i na dvofazni protok. U slučaju da je tlak na dnu bušotine manji od tlaka zasićenja ležišta relativna propusnost za naftu postaje funkcija zasićenja naftom, odnosno plinom. Radi ovisnosti zasićenosti šupljikavog medija plinom o tlaku i relativna propusnost ovisi o tlaku.

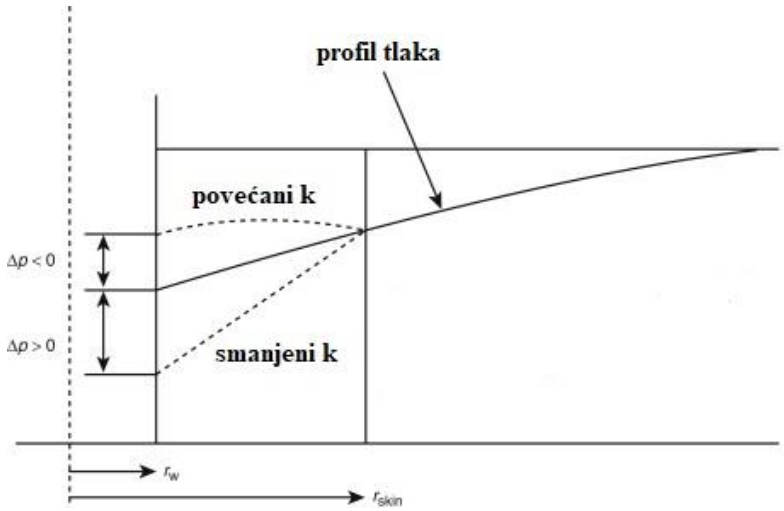
Definicija bezdimenzionalnog tlaka je:

$$p_D = \frac{\pi kh(p_i^2 - p_{wf}^2)}{qp_i(\mu_o B_o)_i} \tag{3-3}$$

3.3. Odstupanje radi promijenjene propusnosti u pribušotinskoj zoni

Razni zahvati u kanalu bušotine, kao što su kemijska obrada ili hidrauličko frakturiranje, namijenjeni su povećanju proizvodnje odnosno propusnosti, no uslijed takvih postupaka može doći do smanjenja propusnosti ležišne stijene oštećenjem. Takva oštećenja mogu nastati prilikom procesa bušenja, opremanja, kao i tijekom cjelokupnog proizvodnog vijeka bušotine. Oštećenja mogu biti prirodna (bubrenje glina, taloženje kamenca i sl.) ili izazvana (produkti kemijskih reakcija prilikom kemijske obrade, promjena močivosti uzrokovana utisnutim fluidom i sl.).

Promjenu propusnosti, bila pozitivna ili negativna, naziva se skin efekt. Skin efekt je bezdimenzionalna veličina koja određuje je li obradom ležišne stijene njena propusnost povećana, što rezultira negativnom vrijednošću skina. Vrijednost skin efekta veća od nule ukazuje na smanjenu propusnost, odnosno oštećenje, a vrijednost skin efekta jednaka nuli ukazuje na nepromijenjenu propusnost (Xingru Wu, 2018). Slučaj kada je skin efekt manji od nule ukazuje na povećanu propusnost, odnosno na uspješnost provedenog stimulacijskog postupka.



Slika 3-1. Profil tlaka u odnosu na radijus oštećenja pribušotinske zone (Wu, 2018)

Matematički izraz za skin faktor, a koji se definira i kao dodatni uzročnik pada tlaka:

$$\Delta p_s = s\left(\frac{qB\mu}{2\pi kh}\right) \tag{3-4}$$

Vrijednost samog skin faktora se može dobiti pomoću sljedećeg izraza:

$$s = \left(\frac{k}{k_s} - 1\right)\ln\frac{r_s}{r_w} \tag{3-5}$$

Skin faktor se može prikazati i kao efektivni radijus bušotine, predstavlja umanjeni radijus unutarnje granice ležišta radi djelovanja skin efekta i dobiva se sljedećim izrazom:

$$r_w' = r_w e^{-s} \tag{3-6}$$

3.4. Odstupanje radi turbulentnog protoka

U poglavlju 2.1 objašnjeno je kako je jednadžba difuzije izvedena na temelju nekoliko različitih zakonitosti. Jedna od tih je Darcyjev zakon. Navedeno je kako Darcyjev zakon vrijedi isključivo za slučaj laminarnog protjecanja, međutim to je rijedak slučaj u stvarnosti. U stvarnim primjerima najzastupljeniji tip protjecanja je turbulentni (ne-Darcyjev), posebice u pribušotinskoj zoni plinskih bušotina.

Matematički se taj problem rješavam zamjenom Darcyjevog zakona izrazom kojega je 1901. godine predložio Forchheimer:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\mu}{k} v + \beta \rho v^2 \tag{3-7}$$

Stavimo li u omjer drugi član, koji opisuje ne-Darcyjev protok, i prvi član, koji opisuje Dracyjev protok, iz navedenog izraza, može se izračunati utjecaj ne-Darcyjevog protoka na ukupni gradijent tlaka:

$$\frac{(dp/dr)_{ne-Darcy}}{(dp/dr)_{Darcy}} = \frac{\beta \rho v^2}{\mu v/k} = DqB \tag{3-8}$$

Matematički izraz kojim se jednadžbu stanja nadopunjava utjecajem turbulentnog protoka glasi:

$$s = s_0 + \frac{ds}{dq} q = s_0 + Dq \tag{3-9}$$

pa rješenja jednadžbe difuzije za plin ima sljedeći oblik:

$$p_i^2 - p_{wf}^2 = \frac{p_{sc} q \bar{\mu} \bar{Z} T}{\pi T_{sc} k h} (p_D + s_0 + Dq) \tag{3-10}$$

Ukoliko se u prethodnoj jednadžbi koristi funkciju pseudotlaka, tada ona ima oblik:

$$m(p_i) - m(p_{wf}) = \frac{p_{sc} q T}{\pi T_{sc} k h} (p_D + s_0 + Dq) \tag{3-11}$$

Bitno je napomenuti da faktor turbulencije ovisi o propusnosti, odnosno obrnuto joj je proporcionalan, a s obzirom da se propusnost u pribušotinskoj zoni razlikuje od propusnosti ostatka ležišta, isto vrijedi za faktor turbulencije u pribušotinskoj zoni.

Kada se uzmu u obzir svi padovi tlaka uslijed skin faktora kod turbulentnog protoka u pribušotinskoj zoni i oko perforacija, tada jednadžba (3-10) u dimenzionalnom obliku glasi:

$$p_i^2 - p_{wf}^2 = \frac{p_{sc} q \mu Z T}{\pi k h T_{sc}} \left[p_D + s + Dq \left(1 - \frac{r_w}{r_s} \right) \left(\frac{\beta_s}{\beta} - 1 \right) + Dq \right] \tag{3-12}$$

3.5. Odstupanje radi načina opremanja bušotine

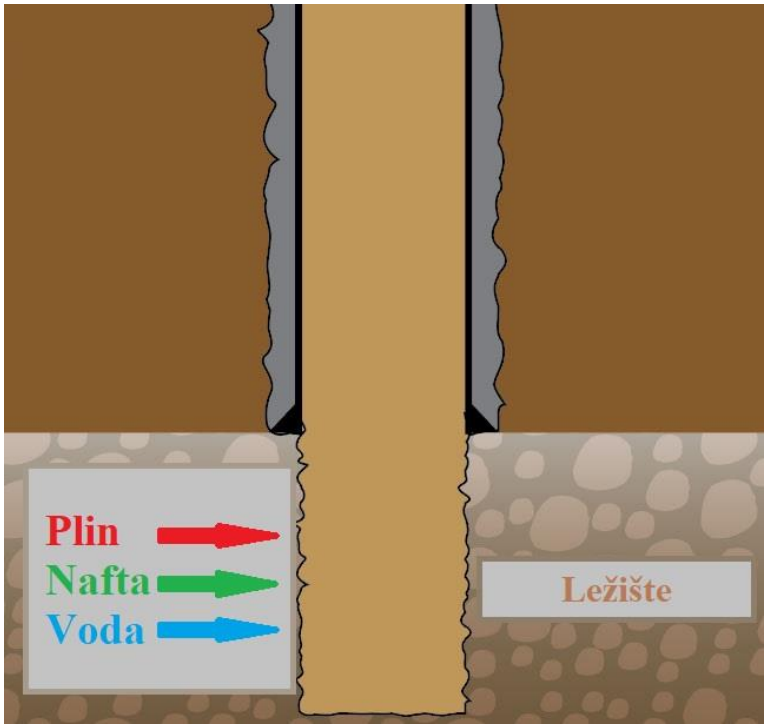
Bušotina može biti opremljena na tri različita načina:

1. otvorenim kanalom bušotine
2. zaštitnim cijevima
3. opremljena pješčanim zasipom

Način opremanja bušotine određuje zakonitosti ponašanja i protjecanja fluida u pribušotinskoj zoni.

3.5.1. Otvoreni kanal bušotine

U ovome slučaju bušotina je opremljena zacementiranim nizom zaštitnih cijevi do krovine ležišta. Od krovine pa do podine ležište je cijelom svojom debljinom nezacijavljeno (slika 3-2.). Na ovome slučaju se temelje rješenja jednadžbe difuzije za idealan slučaj. U ovakvome primjeru opremanja bušotine dolazi do odstupanja radi promijenjene propusnosti i turbulentnog protoka u pribušotinskoj zoni što je opisano u poglavlju 3.4.. Ovakav način opremanja je najrjeđi u praksi.



Slika 3-2. Otvoreni kanal bušotine

3.5.2. Kanal bušotine opremljen zaštitnim cijevima

Ovakav slučaj opremanja uključuje zacementiranu kolonu zaštitnih cijevi koja se proteže od ušća bušotine pa sve do podine ležišta za razliku od otvorenog kanala bušotine (slika 3-3.). Kontakt s ležištem je ostvaren putem perforacija.

Perforiranje u potpunosti mijenja geometriju protoka te uzrokuje dodatni pad tlaka koji ovisi o karakteristikama perforacija. Ovaj pad tlaka možemo prikazati kao kombinaciju dvaju skin faktora (Čikeš, 2015):

- skin faktor ovisan o geometriji perforacija, s_p
- skin faktor prouzročen smanjenom propusnosti u zbijenoj zoni oko perforacija, s_{dp}

Skin faktor ovisan o geometriji perforacija se može dobiti pomoću izraza:

$$s_p = \left(\frac{h}{h_p} - 1\right)\left[\ln\left(\frac{h}{r_w}\sqrt{\frac{k_H}{k_V}}\right) - 2\right] \tag{3-13}$$

Skin faktor prouzročen smanjenom propusnosti u zbijenoj zoni oko perforacija se može dobiti pomoću izraza:

$$s_{dp} = \left(\frac{h}{L_p N}\right)\left(\frac{k}{k_{dp}} - \frac{k}{k_s}\right)\ln\frac{r_{dp}}{r_p} \tag{3-14}$$

Kada se navedeni skinovi radi utjecaja perforacija uvrste u jednadžbu (3-12), tada ona ima oblik:

$$p_i^2 - p_{wf}^2 = \frac{p_{sc} q \mu Z T}{\pi k h T_{sc}}\left[p_D + s + s_p + s_{dp} + Dq\left(\frac{\beta_s}{\beta} - 1\right)\left(1 - \frac{r_w}{r_s}\right) + Dq + D_{dp} q\right] \tag{3-15}$$

Slika 3-3. Usporedba nezacijevljenog i zacijevljenog kanala bušotine

3.5.3. Kanal bušotine opremljen pješčanim zasipom

Opremanje bušotine pješčanim zasipom se koristi kada se u ležištu nalazi velik udio nekonsolidiranog materijala, ponajviše radi pijeska. Pijesak nije poželjan jer erodira alatke i onemogućava potpuna dosjedanja ventila i navoja.

Ovakav način opremanja podrazumijeva ugradnju pješčanog filtera u područje perforiranog intervala, a često se i same perforacije zapunjavaju pijeskom. Pješčani filter onemogućava pijesku iz ležišta da dospije do proizvodnog niza cijevi, ali i uzrokuje dodatni pad tlaka i

turbulencije u protoku plina. Pad tlaka radi protoka plina kroz perforacije zapunjene pijeskom se može aproksimirati novom komponentom skin faktora.

Jednadžba pada tlaka za protok plina kroz pješčani zasip glasi (za utjecaj perforacija na ukupan pad tlaka za protok plina):

$$\Delta p_G^2 = p_{wfs}^2 - p_{wf}^2 = \frac{2q\mu}{\pi k_G r_p^2 N}\frac{p_{sc}ZTL}{T_{sc}} + \left(\frac{q}{\pi r_p^2 N}\right)^2 \left(\frac{p_{sc}}{T_{sc}}\right)^2 \frac{2M_a\gamma_g ZTL}{R}\beta_G \qquad (3\text{-}16)$$

3.6. Odstupanje radi promjenjivog protoka i više bušotina u ležištu

Idealni model pretpostavlja proizvodnju iz jedne bušotine s konstantnim protokom. Protok se mijenja kroz vrijeme, stoga je bitno i to uzeti u obzir.

Rijetko kad iz jednog ležišta proizvodi samo jedna bušotina, već ih je gotovo uvijek više. Taj problem se matematički rješava korištenjem načela superpozicije. Načelo superpozicije govori da je ukupni pad tlaka u jednoj točki u ležištu jednak zbroju padova tlaka u toj točki prouzročenim protokom svake bušotine u ležištu.

Na primjer, u ležištu s tri bušotine, od kojih su dvije proizvodne, a jedna mjerna, pad tlaka na mjernoj bušotini je jednak zbroju padova tlaka kojeg uzrokuju dvije proizvodne bušotine. U slučaju puštanja treće bušotine u proizvodnju, pad tlaka na toj, trećoj, bušotini bi bio jednak zbroju sva tri pada tlaka, te padu tlaka uzrokovanog skin efektom pribušotinske zone.

3.7. Odstupanje radi nesimetrične površine crpljenja

Idealni proizvodni model pretpostavlja koncentrično smještenu bušotinu u sredini cilindričnog ležišta. U stvarnosti nailazimo na različite oblike ležišta radi čega dolazi do odstupanja od idealnih pretpostavka.

Opća jednadžba koja se može primjenjivati za bilo koji oblik ležišta te bilo koji smještaj bušotine unutar njega za poluustaljeni protok nafte glasi:

$$p_i - p_{wf}(t) = \frac{qB\mu}{2\pi kh}\left[2\pi\frac{kt}{\phi\mu c_t A} + \frac{1}{2}\left(\ln\frac{A}{C_A r_w^2} + 0{,}80907\right) + s\right] \qquad (3\text{-}17)$$

Član C_A ovisi o obliku ležišta i o smještaju bušotine unutar njega i on se uzima iz Earlougherove tablice (Čikeš, 2015).

3.8. Odstupanje radi utjecaja obujma bušotine

Kada se bušotina zatvori radi testa porasta tlaka, najčešće se zatvara na ušću. S obzirom da fluid u proizvodnom nizu ima veću kompresibilnost nego fluid u ležištu, još će neko vrijeme, nakon zatvaranja, ležišni fluid pritjecati u proizvodni niz. Vremenski odmak od trenutka zatvaranja bušotine do trenutka prestanka protoka ovisi o karakteristikama bušotine, odnosno o njenom obujmu. Ta pojava se naziva naknadni dotok ili engl. *Wellbore storage effect*.

Na početku testa porasta tlaka bušotina je zatvorena, a hidrostatski tlak unutar proizvodnog niza je jednak ležišnom tlaku. Ako se bušotina otvori, prvo izlazi fluid iz proizvodnog niza, a protok iz ležišta je jednak nuli. S vremenom se izjednače protoci na ušću i na dnu bušotine. Treba uzeti u obzir i ekspanziju fluida. Količina fluida koja ostaje uskladištena unutar bušotine određena je koeficijentom skladištenja. Ako uzmemo slučaj bušotine ispunjene samo plinom, koeficijent skladištenja bušotine bit će isključivo ovisan o tlaku (Dake, 1998).

Efekt skladištenja ili naknadni dotok je fenomen kojeg uzrokuje promjenjivi dotok prilikom proizvodnog testa. To se očituje protokom fluida iz ležišta u bušotinu nakon zatvaranja bušotine. Pritjecanje mješavine kapljevine i plina u zatvoreni proizvodni niz uzrokuje njihovu gravitacijsku separaciju. Kapljevina pada na dno, a plin se uzdiže. Radi velike kompresibilnosti plina tlak u proizvodnom nizu naglo raste sve dok se više plina ne može izdvojiti radi prevelikog tlaka. Moguće je da se s vremenom taj tlak smanji probijanjem djela fluida natrag u formaciju.

4. ODREĐIVANJE PROIZVODNIH MOGUĆNOSTI BUŠOTINE

U ovom poglavlju su napravljena dva primjera proračuna proizvodnih mogućnosti bušotine, odnosno dinamičkih tlakova na dnu, prema ulaznim podatcima (tablica 4-1) hipotetske bušotine i ležišta. Prvi proračun uzima u obzir odstupanje radi stlačivosti fluida, a drugi odstupanje radi turbulentnog protoka.

4.1. Primjena proizvodnog modela kod odstupanja radi stlačivosti fluida

U nastavku su dani ulazni podatci za proračun proizvodnih mogućnosti bušotine uz konstantan protok od 35000 m^3/d za vrijeme polustacionarnog stanja koje počinje nakon 22 dana rada bušotine:

Tablica 4-1. Ulazni podatci hipotetske bušotine i ležišta

$A = 10\ km^2$	$p_i = 270\times10^5$ Pa
$h = 10$ m	$T_R = 120$ °C
$\phi = 0{,}15$	$k = 1{,}5\times10^{-3}\ \mu m^2$
$S_w = 0{,}25$	$s = 4$
$c_f = 5{,}92\times10^{-10}\ Pa^{-1}$	$r_w = 0{,}1$ m
$z = 0{,}954$	$r_e = 400$ m
$c_g = 2{,}584\times10^{-8}\ Pa^{-1}$	$c_w = 6{,}79\times10^{-10}\ Pa^{-1}$
$\mu_g = 0{,}0241\times10^{-3}$ Pa×s	$c_t = 2{,}01\times10^{-8}\ Pa^{-1}$
$B_g = 0{,}00451\ m^3/m^3$	$q = 35000\ m^3/d$

Potrebno je proračunati dinamički tlak na dnu bušotine nakon pola godine (180 dana) proizvodnje odabrane bušotine.

S obzirom da se u proračunu koristi funkcija pesudotlaka, vrijednosti za očitani tlak su preuzete iz literature prema tablici na slici 4-1.

1. p, Pa	2. Z	3. μ, Paxs	4. $p/(\mu Z)$, s^{-1}	5. $(p/(\mu Z))_{sr.}$, s^{-1}	6. Δp, Pa	7. $2(p/(\mu Z))_{sr} \times \Delta p$, Pa/s	8. $m(p)$, Pa/s
0,00E+00			0				
1,01E+05	0,999	1,45E-05	6,98E+09	3,49E+09	1,01E+05	7,08E+14	7,08E+14
2,50E+06	0,979	1,47E-05	1,73E+11	9,01E+10	2,40E+06	4,32E+17	4,33E+17
5,00E+06	0,959	1,51E-05	3,44E+11	2,59E+11	2,50E+06	1,29E+18	1,73E+18
7,50E+06	0,941	1,57E-05	5,09E+11	4,27E+11	2,50E+06	2,13E+18	3,86E+18
1,00E+07	0,926	1,63E-05	6,63E+11	5,86E+11	2,50E+06	2,93E+18	6,79E+18
1,25E+07	0,914	1,70E-05	8,03E+11	7,33E+11	2,50E+06	3,66E+18	1,05E+19
1,50E+07	0,907	1,79E-05	9,26E+11	8,64E+11	2,50E+06	4,32E+18	1,48E+19
1,75E+07	0,904	1,88E-05	1,03E+12	9,78E+11	2,50E+06	4,89E+18	1,97E+19
2,00E+07	0,905	1,98E-05	1,12E+12	1,07E+12	2,50E+06	5,36E+18	2,50E+19
2,25E+07	0,912	2,08E-05	1,18E+12	1,15E+12	2,50E+06	5,75E+18	3,08E+19
2,50E+07	0,922	2,19E-05	1,24E+12	1,21E+12	2,50E+06	6,05E+18	3,68E+19
2,75E+07	0,936	2,30E-05	1,28E+12	1,26E+12	2,50E+06	6,28E+18	4,31E+19
3,00E+07	0,954	2,41E-05	1,31E+12	1,29E+12	2,50E+06	6,45E+18	4,96E+19

Slika 4-1. Vrijednosti pseudotlakova (Čikeš, 2015)

Rješenje za t = 180 d

1. Bezdimenzionalno vrijeme

$$t_{D_{180}} = \frac{kt}{\phi(\mu_g c_t)_i r_w^2}$$

$$t_{D_{180}} = \frac{1{,}5 \times 10^{-15} \times 180 \times 86400}{0{,}15 \times 0{,}0241 \times 10^{-3} \times 2{,}01 \times 10^{-8} \times 0{,}1^2} = 3{,}21 \times 10^7$$

2. Bezdimenzionalni radijus crpljenja

$$r_{eD} = \frac{r_e}{r_w}$$

$$r_{eD} = \frac{400}{0{,}1} = 4000$$

3. Bezdimenzionalni tlak

$$p_D(t_D) = \frac{2t_D}{r_{eD}^2} + \ln r_{eD} - \frac{3}{4}$$

$$p_D(t_{180}) = \frac{2}{4000^2} \times 3{,}21 \times 10^7 + \ln 4000 - \frac{3}{4} = 11{,}56$$

4. Funkcija pseudotlaka

$$m(p_{wf}) = m(p_i) - \frac{p_{sc} q T}{\pi T_{sc} k h}(p_D + s)$$

Linearnom interpolacijom vrijednosti iz tablice pseudotlakova sa slike 4-1. određena je vrijednost funkcije pseudotlaka za početni ležišni tlak:

$$m(p_i) = 4{,}184 \times 10^{19} Pa/s$$

$$m(p_{wf}) = 4{,}184 \times 10^{19} - \frac{1{,}01325 \times 10^5 \times \left(\frac{35000}{24 \times 60 \times 60}\right) \times 393{,}15}{\pi \times 288{,}15 \times 1{,}5 \times 10^{-15} \times 10}(11{,}56 + 4)$$

$$m(p_{wf}) = 2{,}335 \times 10^{19} Pa/s$$

Linearnom interpolacijom vrijednosti iz tablice pseudotlakova sa slike 4-1. određena je vrijednost dinamičkog tlaka na dnu bušotine nakon 180 dana proizvodnje koja odgovara izračunatom pseudotlaku:

$$p_{wf_{180}} = 192{,}2 \times 10^5 Pa$$

Primjenom funkcije pseudotlaka, odnosno uzimanjem u obzir utjecaja stlačivosti fluida, rezultat dobiven za tlak na dnu bušotine je točniji u odnosu na rezultat koji bi se dobio bez njegove primjene.

Također, iz rezultata proizlazi da se u bušotini uz protok plina od 35000 m^3/d uočava pad tlaka s početnog, u iznosu od 270 bara, na 192 bara nakon 180 dana proizvodnje, koja se od 22. dana odvija u polustacionarnom stanju.

4.2. Primjena proizvodnog modela kod odstupanja radi turbulentnog protoka

Nastavno na iste ulazne podatke iz poglavlja 4.1., u ovom primjeru izračunat je utjecaj turbulentnog protoka na dinamičkitlak na dnu bušotine. U tu svrhu može se nadopuniti račun iz prethodnog primjera za slučaj polustacionarnnog protoka za vrijeme od pola godine (180 dana). Srednje vrijednosti PVT svojstava plina preuzete su iz literature (Čikeš, 2015) i iznose:

$$\bar{\mu} = 2{,}19 \times 10^{-5} Pa \times s$$

$$\bar{Z} = 0{,}9295$$

$$\bar{c_t} = 2{,}89 \times 10^{-8} Pa^{-1}$$

1. Bezdimenzionalno vrijeme i tlak

$$t_{D_{180}} = \frac{kt}{\phi \overline{\mu c_t} r_w^2}$$

$$t_{D_{180}} = \frac{1{,}5 \times 10^{-15} \times 180 \times 86400}{0{,}15 \times 2.19 \times 10^{-5} \times 2{,}89 \times 10^{-8} \times 0{,}1^2} = 2{,}46 \times 10^7$$

$$p_D(t_D) = \frac{2t_D}{r_{eD}^2} + \ln r_{eD} - \frac{3}{4}$$

$$p_D(t_{180}) = \frac{2}{4000^2} \times 2{,}46 \times 10^7 + \ln 4000 - \frac{3}{4} = 10{,}62$$

2. Faktor turbulencije

$$\beta = \frac{0{,}005}{[\phi(1 - S_w)]^{5{,}5} k^{0{,}5}}$$

$$\beta = \frac{0{,}005}{[0{,}15 \times (1 - 0{,}25)]^{5{,}5} \times (1{,}5 \times 10^{-15})^{0{,}5}} = 2{,}136 \times 10^{10} m^{-1}$$

3. Faktor turbulencije u pribušotinskoj zoni

Za vrijednost radijusa oštećenja pribušotinske zone odabrano je r_s=0,25 m i korespondirajuća vrijednost za propusnost oštećene zone k_s=0,3×10^{-15} m^2.

$$\beta_s = \frac{8 \times 10^{-8}}{k_s^{1{,}2}}$$

$$\beta_s = \frac{8 \times 10^{-8}}{(0{,}3 \times 10^{-15})^{1{,}2}} = 3{,}4 \times 10^{11} m^{-1}$$

4. Koeficijent turbulentnog protoka

$$D = \frac{k\beta}{2\pi\bar{\mu}hr_w}\frac{M_a\gamma_g p_{sc}}{RT_{sc}}$$

$$D = \frac{1{,}5 \times 10^{-15} \times 2{,}136 \times 10^{10}}{2\pi \times 2{,}19 \times 10^{-5} \times 10 \times 0{,}1} \times \frac{28{,}964 \times 10^{-3} \times 0{,}7 \times 1{,}01325 \times 10^5}{8{,}3145 \times 288{,}15}$$

$$D = 0{,}2\ s/m^3$$

5. Dinamički tlak na dnu bušotine

Primjenjena je jednadžba za dinamički tlak nakon 180 dana koja ne uključuje funkciju pseudotlaka.

$$p_{wf} = \sqrt{p_i^2 - \frac{p_{sc}q\bar{\mu}\bar{Z}T}{\pi khT_{sc}}\left\{p_D + s + Dq\left[\left(\frac{\beta_s}{\beta} - 1\right)\left(1 - \frac{r_w}{r_s}\right) + 1\right]\right\}}$$

$$p_{wf} = \sqrt{\begin{array}{l}(270 \times 10^5)^2 - \dfrac{1{,}01325 \times 10^5 \times \left(\dfrac{35000}{86400}\right) \times 2{,}19 \times 10^{-5} \times 0{,}9295 \times 393{,}15}{\pi \times 1{,}5 \times 10^{-15} \times 10 \times 288{,}15} \\ \times \left\{10{,}62 + 4 + 0{,}2 \times \dfrac{35000}{86400} \times \left[\left(\dfrac{3{,}4 \times 10^{11}}{2{,}136 \times 10^{10}} - 1\right) \times \left(1 - \dfrac{0{,}1}{0{,}25}\right) + 1\right]\right\}\end{array}}$$

$$p_{wf_{180}} = 188{,}64 \times 10^5 Pa$$

Iz rezultata za dinamički tlak vidljivo je da je on manji nego kod prvog primjera, gdje je iznosio oko 192 bara, jer ova metoda uzima u obzir i dodatan pad tlaka radi utjecaja turbulentnog protoka.

To znači da bi uz pretpostavku istog protoka od 35000 m^3/d, dinamički tlak na dnu bušotine bio za 4 bara manji, odnosno da se zanemarivanjem odstupanja radi turbulentnog protoka može doći do krive procjene proizvodnih mogućnosti bušotine. To je posebno značajno u kasnijim fazama prognoziranja putem ovakvih proizvodnih modela, s obzirom na činjenicu da se očekuje daljnji pad dinamičkog tlak na dnu bušotine, jer je već tijekom prve polovine godine pao za više od 100 bara.

5. ZAKLJUČAK

Idealni proizvodni model temelji se na idealnim pretpostavkama o ležišnom fluidu i o samome ležištu. Iako su takve pretpostavke nerealne, pružile su inženjerima mogućnost okvirnog predviđanja mnogih vrlo bitnih parametara u proizvodnom inženjerstvu. Odstupanja od idealnog modela su zapravo način približavanja stvarnim uvjetima u ležištu i dobivanja preciznijih rezultata što je od velike važnosti, jer su takvi modeli jedini način uvida i predviđanja proizvodnih mogućnosti bušotine.

Korištenje isključivo idealnog proizvodnog modela bi uzrokovalo velike greške, probleme i komplikacije, stoga treba poznavati svaku bušotinu i služiti se matematičkim modelima odstupanja kao načina optimizacije proizvodnog procesa u svim aspektima.

6. LITERATURA

1. ČIKEŠ, M., 2015. Proizvodno inženjerstvo nafte i plina. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
2. DAKE, L., P., 1998. Developments in Petroleum Science, 8: fundamentals of reservoir engineering. Hag, Nizozemska.
3. MORTON-THOMPSON, D., WOODS, A., 1992. Development Geology Reference Manual, Fluid flow fundamentals
4. PETEX, 2015. Prosper katalog. https://www.petex.com/media/2272/prosper-brochure.pdf (14. 8. 2022.)
5. TESTWELLS, 2015. Radius of investigation. https://testwells.com/radius-of-investigation/ (15. 8. 2022.)
6. WU, X., 2018. Formation Damage During Improved Oil Recovery, Positive Skin Factor. https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/positive-skin-factor (16. 8. 2022.)
7. SCHLUMBERGER, 1998. Schlumberger Energy Glossary. https://glossary.slb.com/en/terms/b/buildup_test (17. 8. 2022.)

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:

Filip M.

Filip Mateševac

KLASA: 602-01/22-01/129
URBROJ: 251-70-12-22-2
U Zagrebu, 08.09.2022.

Filip Mateševac, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/22-01/129, URBROJ: 251-70-12-22-1 od 11.05.2022. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

ODSTUPANJA OD IDEALNOG PROIZVODNOG MODELA VERTIKALNE PLINSKE BUŠOTINE

Za mentoricu ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Doc.dr.sc. Sonja Koščak Kolin nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentorica:

(potpis)

Doc.dr.sc. Sonja Koščak Kolin

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

REPUBLIKA HRVATSKA

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje Pašić

(titula, ime i prezime)