

Projekt »Optimiranje dinamičkih brtvila u naftnom rudarstvu« financiran od Ministarstva znanosti, tehnologije i informatike Republike Hrvatske

PROBLEMI U SUSTAVU TUBING/PAKER

Davorin MATANOVIĆ i Mario LIVAJA

Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 41000 Zagreb, Hrvatska

Ključne riječi: Tubing, Paker, Sile, Kretanja, Naprezanja

U naftnim i plinskim bušotinama koje su u obradi ili proizvodnji u sustavu tubing/paker treba riješavati brojne probleme. Promjene temperatura i tlakova koje se zbivaju tijekom različitih operacija obično rezultiraju promjenama duljine tubinga ili sile između pakera i tubinga, ovisno o njihovoj vezi. Ovdje sumiramo neke ranije radove i pojašnjavamo tada uočene nedorečenosti. Također dajemo cjelovit pristup rješavanju problema kod jednoobraznih nizova, bez obzira na način povezivanja tubinga i pakera.

Key-words: Tubing, Packer, Forces, Movements, Stresses

When gas and oil wells are completed and produced or treated through the tubing connected to packer, there is a great number of problems to be solved. Changes in temperatures and pressures that occur during various operations usually result in changes in tubing lengths or tubing to packer forces, depending on tubing to packer connections. This paper summarises some earlier papers and explains partly elaborated details. It also gives a complete approach to solve problems in uniform strings regardless to tubing and packer connections.

Uvod

Komunikacija ležišta ugljikovodika s bušotinom uključuje različita stanja u kanalu bušotine. Završna etapa kod privođenja neke bušotine proizvodnji podrazumijeva proračun, ugradnju i postavljanje tubinga i pakera. Pomoću njih mora biti omogućena kontrolirana komunikacija ležišta i bušotinske opreme. Promjene tlaka i temperature koje nastaju u različitim okolnostima (proizvodnja, gušenje, obrada i sl.) uzrokuju promjene duljine niza cijevi ili naprezanja u sustavu tubinga i pakera, ako je kretanje niza cijevi ograničeno. Skraćivanje ili produljenje tubinga rezultat je djelovanja različitih čimbenika:

- klipnog učinka,
- učinka napuhavanja ili sažimanja,
- spiralnog izvijanja i
- temperaturnog učinka.

Ostvarene promjene mogu rezultirati privremenim ili trajnim deformacijama tubinga, kao i oštećenjima pakera ili kompletne bušotinske opreme. Na osnovi rezultata proračuna, uzimajući u obzir različite uvjete u kanalu bušotine, možemo odabrati opremu koju ćemo ugraditi u bušotinu i spriječiti oštećenja spomenute opreme. Za poznate uvjete i određeni sustav opreme moguće je odrediti maksimalan hod brtvenih elemenata ili silu između tubinga i pakera. Duljina brtvi, odnosno njihov stvaran hod ili pokazatelji postavljanja pakera, mogu biti usklađivani s obzirom na variranje ostalih pokazatelja (promjena promjera tubinga, otvora pakera, tlakova u tubing u i/ili prstenastom prostoru, sile nasjedanja itd).

Svi obrasci odnose se na tzv. jednoobrazni niz cijevi, tj. nema promjene vanjskog i unutarnjeg promjera tubinga, unutarnjeg promjera zaštitnih cijevi, te obujamske mase fluida po visini niza cijevi i prstenastog prostora. Navedene složene probleme rješavali su brojni autori. Lubinski, et al. (1962)

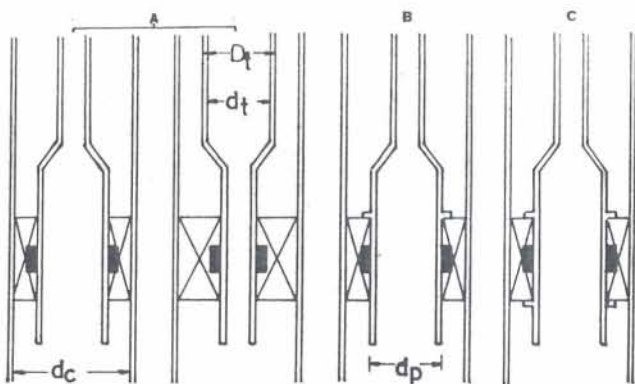
određuju promjene i naprezanja u sustavu tubinga i pakera kod jednoobraznog niza cijevi, a Hamerlindl (1977) ukazuje na rješavanje problema kod pakera koji ne dopuštaju kretanje tubinga i sve proširuje na višeobrazne nizove cijevi. U Hrvatskoj su Šindija i Miloš (1973) razmatrali problematiku ugradnje pakera u dubokim bušotinama. Rad se odnosi samo na pakere koji dozvoljavaju slobodno kretanje tubinga.

Opis sustava tubing-paker

Tubing je niz metalnih bešavnih cijevi različitih dimenzija, sastava materijala i mehaničkih karakteristika. Izrađuje se u različitim duljinama. Svaka pojedina cijev završava navojnim spojem kojim se cijevi povezuju u niz željene duljine. Karakteristike tubinga definirane su API biltenom 5C2. Osnovne funkcije tubinga povezanog s pakerom jesu: svladavanje tlaka, izolacija zaštitnih cijevi, usmjeravanje iznošenja fluida, omogućavanje utiskivanja fluida te postavljanje dubinske regulacione i sigurnosne opreme. Paker se postavlja u bušotinu kao alatka kojom odjeljujemo niz zaštitnih cijevi od unutrašnjosti tubinga. Aktiviranje pakera obavlja se mehanički ili hidraulički. Povezivanje tubinga i pakera ostvaruje se na tri načina (sl. 1):

- A) paker dopušta slobodno kretanje tubinga
- B) paker dopušta ograničeno kretanje tubinga
- C) paker ne dopušta kretanje tubinga.

Do pomaka tubinga u odnosu na paker dolazi zbog skraćivanja ili produljenja niza cijevi. Promjene duljine nastaju pri promjenama tlaka, temperature ili primijenjene sile. U slučaju kada paker dozvoljava slobodno kretanje tubinga sve te promjene u nizu cijevi ne dovode do naprezanja između tubinga i pakera. Niz se cijevi slobodno produljuje ili skraćuje,



Sl. 1 Moguće veze proizvodnog niza cijevi i pakera
Fig. 1 Possible relations between tubing and packer

a brtvenje je ostvareno sustavom brtvi u brtvenici koje se kreću u poliranoj sržnoj cijevi. Kod proračunavanja situaciju idealiziramo tako da zanemarujemo uvijek prisutno trenje. Kada paker dopušta ograničeno kretanje tubinga, to je kretanje ograničeno dosjednim ramenom. Kretanjem tubinga prema dolje, kada rame nasjedne na paker, on podnosi dodatno opterećenje. Tim trenutkom dalji tok proračuna svodi se na situaciju kada paker ne dopušta kretanje tubinga. Čvrsta veza pakera i tubinga navojnim spojem svaku promjenu koja bi nastala promjenom duljine niza cijevi transformira u vlačnu ili tlačnu silu koja djeluje na paker.

Naprezanja u tubingu

Početim stanjem u bušotini smatramo opremljenu bušotinu s ugrađenom opremom i radnim fluidom uz uravnotežene pokazatelje. Promjene uvjeta u bušotini uspostavljaju novo stanje koje možemo u nekoj situaciji smatrati konačnim. Promjenu od početnog do konačnog stanja prati promjena duljine tubinga ili sila između pakera i tubinga.

Kada je cijevni alat ili tubing ugrađen u bušotinu i slobodno zavješeno/uklinjeno na površini, nastaju ova naprezanja:

Zbog težine alatki vlačno naprezanje u gornjem presjeku cijevi. Aksijalno naprezanje izračuna se izrazom:

$$\sigma_a = - \frac{L \cdot w_s \cdot g}{A_s} \quad (1)$$

Kada se jedan dio težine alatki prenese na dno ili paker u obrazac (1) uključujemo i primijenjenu silu:

$$\sigma_a = \frac{F_s - L \cdot w_s \cdot g}{A_s} \quad (2)$$

Ako je u bušotini prisutan jednolik fluid kod određivanja aksijalnih naprezanja u razmatranje uzimamo djelovanje uzgona. Tada obrazac za aksijalna naprezanja glasi:

$$\sigma_a = \frac{F_s + F_b - L \cdot w_s \cdot g}{A_s} \quad (3)$$

gdje su:

$$F_b = P \cdot A_s \quad (4)$$

$$P = \rho \cdot L \cdot g \quad (5)$$

S jednolikim fluidom nastaju tangencijalno i radijalno naprezanje, a izračunamo ih obrascima (6) i (7).

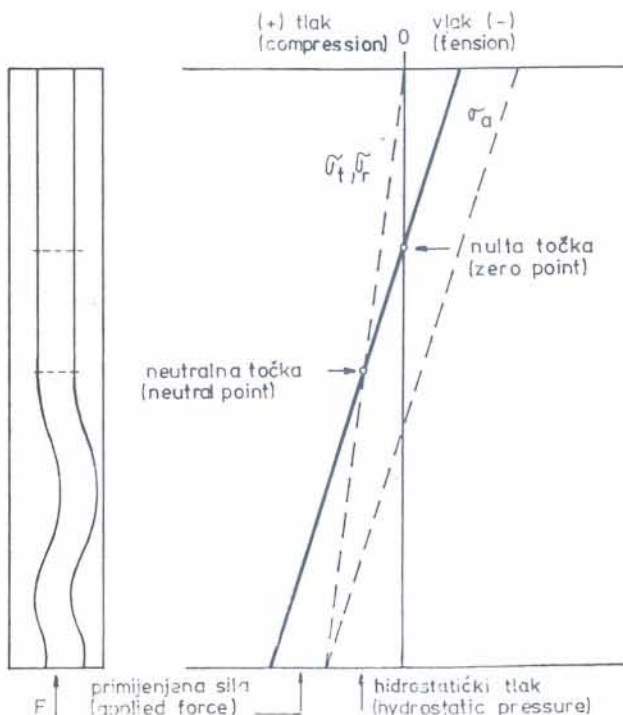
$$\sigma_t = - \left[\frac{p_i \cdot r_i^2 - p_o \cdot r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \right] - \left[\frac{p_i - p_o}{r_o^2 - r_i^2} \right] \cdot \left[\frac{r_o^2 \cdot r_i^2}{r_d^2} \right] \quad (6)$$

$$\sigma_r = - \left[\frac{p_i \cdot r_i^2 - p_o \cdot r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \right] + \left[\frac{p_i - p_o}{r_o^2 - r_i^2} \right] \cdot \left[\frac{r_o^2 \cdot r_i^2}{r_d^2} \right] \quad (7)$$

Neutralnu točku u prisustvu fluida izračunavamo iz obrasca (8):

$$n = \frac{F}{(w_s - \rho \cdot A_s) \cdot g} \quad (8)$$

Prema L u b i n s k o m i dr. (1962), neutralna točka određuje mjesto ispod kojeg je niz izvijen. Također, u toj točki su aksijalna naprezanja jednaka sumi tangencijalnih i radijalnih naprezanja. Sl. 2. shematski prikazuje raspored naprezanja u cijevnom alatu slobodno zavješeno u fluidu, uz prenošenje dijela opterećenja na dno bušotine ili paker. Ako je tubing usidren u pakeru koji dopušta pomicanje, uz zanemareno trenje, paker će omogućiti primjenu različitih fluida i/ili tlakova u tubingu ili prstenastom prostoru.



Sl. 2 Shematski prikaz stanja proizvodnog niza cijevi uronjenog u fluidu kada na njegov kraj djeluje neka sila

Fig. 2 Schematic presentation of tubing immersed in fluid when its end is affected by some force

U takvim uvjetima obrazac za izračunavanje aksijalne sile glasi:

$$F_a = (A_p - A_i) \cdot P_i - (A_p - A_o) \cdot P_o \quad (9)$$

Ostvaruje se također i tzv. fiktivna sila; tlačna sila jednaka umnošku površine unutrašnjeg presjeka pakera i razlike tlakova na njegovoj razini:

$$F_f = A_p \cdot (P_i - P_o) \quad (10)$$

Klipni učinak

Klipni učinak rezultat je promjene tlakova koji djeluju na tubing koji je preko brtvenice povezan s pakerom. Stvarna sila nastala promjenom stanja u bušotini od početnih na konačne uvjete glasi:

$$F_a = \Delta P_i \cdot (A_p - A_i) - \Delta P_o \cdot (A_p - A_o) \quad (11)$$

Pripadajuća promjena u duljini niza određuje se izrazom:

$$\Delta L_1 = - \frac{L \cdot F_a}{E \cdot A_s} \quad (12)$$

Pozitivna promjena duljine tubinga podrazumijeva produljenje, a negativna skraćenje niza.

Spiralno izvijenje

Djelovanjem neke tlačne sile na dno tubinga doći će do njegovog izvijanja. Djelovanje sile smanjuje se s udaljenošću od dna. Neutralna točka predstavlja mjesto iznad kojeg niz više nije izvijen. Udaljenost neutralne točke od dna niza cijevi određuje se izrazom:

$$n = \frac{F}{w} \quad (13)$$

Sila F može biti ili sila nasjedanja F_s ili fiktivna sila zbog ograničenja kod pakera F_f^* ovisno u kojoj se situaciji traži lokacija neutralne točke. Korak spirale neposredno iznad donjeg kraja tubinga je:

$$k = \pi \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot E \cdot I}{F}} \quad (14)$$

U prisutnosti fluida (tlaka) u tubing u i u prstenastom prostoru, tubing će se ponašati kao da na njega djeluje slijedeća fiktivna sila:

$$F_f = A_p \cdot (\Delta P_i - \Delta P_o) \quad (15)$$

Niz će se izvijati ako je fiktivna sila pozitivna, a ako je fiktivna sila jednaka ili manja od nule izvijanja nema. Promjenu duljine tubinga nastalu spiralnim izvijanjem kada je ($n < L$) računamo po obrascu:

$$\Delta L_2 = - \frac{r^2 \cdot F_f}{8 \cdot E \cdot I \cdot w} \quad (16)$$

Težina niza po jedinici duljine kada je uronjen u fluide, određuje se jednadžbom:

$$w = (w_s + \rho_i \cdot A_i - \rho_o \cdot A_o) \cdot g \quad (17)$$

Zazor tubinga i zaštitnih cijevi određuje se jednadžbom:

$$r = \frac{d_c - D_t}{2} \quad (18)$$

a moment inercije presjeka tubinga jednadžbom:

$$I = \frac{(D_t^4 - d_t^4)}{64} \cdot \pi \quad (19)$$

Ako je neutralna točka izvan niza cijevi ($n > L$) tada se za određivanje promjene duljine zbog izvijanja koristi jednadžba:

$$\Delta L_2 = \frac{r^2 \cdot F_f^2}{8 \cdot E \cdot I \cdot w} \cdot \left[\frac{L \cdot w}{F_f} \cdot \left(2 - \frac{L \cdot w}{F_f} \right) \right] \quad (20)$$

Napuhavanje

Napuhavanje je učinak uzrokovan tlakom i odražava se promjenom duljine niza cijevi. Promjena duljine može biti znatna, a računa se po obrascu:

$$\Delta L_3 = - \frac{v}{E} \cdot \frac{\Delta \rho_i - R^2 \cdot \Delta \rho_o - \frac{1 + 2 \cdot v}{2 \cdot v} \cdot \delta}{R^2 - 1} \cdot L^2 - \frac{2 \cdot v}{E} \cdot \frac{\Delta p_i - R^2 \cdot \Delta p_o}{R^2 - 1} \cdot L \quad (21)$$

gdje je:

$$R = \frac{D_t}{d_t} \quad (22)$$

Kada je kretanje niza onemogućeno ostvaruje se sila adekvatna potrebnom pomaku (G o i n s, 1980):

$$F_{bal.} = 2 \cdot v \cdot (\Delta P_{ia} \cdot A_i - \Delta P_{oa} \cdot A_o) \quad (23)$$

Tlak veći s unutarnje strane tubinga nego s vanjske radikalno napreže cijev povećavajući njenu horizontalnu dimenziju na uštrb vertikalne. Drugim riječima cijev se »napuhava«-širi, ali istovremeno i skraćuje. Veći tlak s vanjske strane cijevi nastoji sploštiti cijev, što se istovremeno kompenzira njenim produljenjem. Smanjenje tlaka po jedinici duljine kod protjecanja fluida u tubing u može se zanemariti, čime se olakšava proračun.

Temperaturni učinak

Cijevi izložene promjeni temperature mijenjaju duljinu. Veličina promjene ovisi o ukupnoj duljini promatrane cijevi, linearnom koeficijentu termičkog istezanja materijala cijevi i ostvarenoj promjeni temperature. Promjenu duljine niza računamo prema obrascu:

$$\Delta L_4 = L \cdot \beta \cdot \Delta t \quad (24)$$

Kada je kretanje niza onemogućeno, ostvaruje se sila predstavljena obrascem:

$$F_{temp.} = \beta \cdot E \cdot A_s \cdot \Delta t \quad (25)$$

Ukupna promjena duljine niza kada paker dopušta slobodno kretanje tubinga iznosi dakle:

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3 + \Delta L_4 \quad (26)$$

Kada paker dopušta ograničeno kretanje tubinga rame ograničava kretanje tubinga prema dolje, nakon što je rame nasjelo na paker. Promjena duljine koja bi se ostvarila kada bi to ograničenje bilo uklonjeno računa se iz obrazaca:

$$\Delta L_5 = -(\Delta L_1^* + \Delta L_2^*) \quad (27)$$

$$\Delta L_1^* = -\frac{L \cdot F_s}{E \cdot A_s} \quad (28)$$

$$\Delta L_2^* = -\frac{r^2 \cdot F_s^2}{8 \cdot E \cdot I \cdot w} \quad (29)$$

Ukupna promjena duljine niza tada je:

$$\Delta L_6 = \Delta L + \Delta L_5 \quad (30)$$

U slučaju da je ΔL_6 negativno (skraćenje), tada izračunata vrijednost predstavlja kretanje tubinga u pakeru nakon promjene tlaka i temperature. Ako je ΔL_6 pozitivno (produljenje), tada se taj pomak ne može ostvariti zbog ramena koje ga onemogućava. Umjesto toga ostvaruje se međudjelovanje između tubinga i pakera.

Kada paker ne dopušta kretanje tubinga (čvrsta veza navojnim spojem), promjena tlaka i temperature, uz promjenu duljina niza, uzrokovala bi silu između tubinga i pakera F_p . Tada je stvarna sila jednaka:

$$F_a^* = F_{af} + F_p \quad (31)$$

a fiktivna sila jednaka je tada:

$$F_f^* = F_{ff} + F_p \quad (32)$$

Nastavak proračunavanja, slijedi analitički postupak koji je primijenio Miska (1987), obrađujući radove A. Lubinskog.

Za određivanje sile F_p postupa se na sličan način kao i kod pakera koji omogućava ograničeno kretanje tubinga. Uz pretpostavku da je ograničenje kretanja uklonjeno, treba izračunati ΔL_6 i pretpostaviti da je:

$$\Delta L_p = -\Delta L_6 \quad (33)$$

Kako se promjena računa za konačne uvjete u bušotini, slijedi da su:

$$F_{af} = (A_p - A_d) \cdot P_{if} - (A_p - A_o) \cdot P_{of} \quad (34)$$

$$F_{ff} = A_p \cdot (P_{if} - P_{of}) \quad (35)$$

Ako je određena fiktivna sila manja od nule ($F_{ff}^* < 0$) tada niz nije izvijen i prividna promjena duljine izračunava se izrazom:

$$\Delta L_f^* = -\frac{L \cdot F_{ff}^*}{E \cdot A_s} \quad (36)$$

Ako je međutim $F_{ff}^* > 0$, a $n < L$ prividna promjena duljine računa se kao:

$$\Delta L_f^* = -\frac{L \cdot F_{ff}^*}{E \cdot A_s} - \frac{r^2 \cdot F_{ff}^{*2}}{8 E \cdot I \cdot w} \quad (37)$$

Ako je $F_{ff}^* > 0$, a $n > L$ tada se upotrebljava jednadžba:

$$\Delta L_f^* = -\frac{L \cdot F_{ff}^*}{E \cdot A_s} - \frac{r^2 \cdot F_{ff}^{*2}}{8 \cdot E \cdot I \cdot w} \cdot \left[\frac{L \cdot w}{F_{ff}^*} \cdot \left(2 - \frac{L \cdot w}{F_{ff}^*} \right) \right] \quad (37a)$$

Nadalje se proračunava:

$$\Delta L_f^* = \Delta L_f + \Delta L_p \quad (38)$$

Ukoliko je $\Delta L_f^* > 0$, tada izračunavamo fiktivnu silu F_f^* koja postoji zbog ograničenja na pakeru, izrazom:

$$F_f^* = -\frac{\Delta L_f^* \cdot E \cdot A_s}{L} \quad (39)$$

Međutim, ako je $\Delta L_f^* < 0$ sila F_f^* određuje se iz slijedeće jednadžbe:

$$F_f^* = \frac{-L + \sqrt{L^2 - \frac{A_s^2 \cdot r^2 \cdot E \cdot \Delta L_f^*}{2 \cdot I \cdot w}}}{\frac{A_s \cdot r^2}{4 \cdot I \cdot w}} \quad (40)$$

Kada je sila F_f^* jednom poznata, tada se sila između pakera i tubinga izračunava kao:

$$F_p = F_f^* - F_{ff} \quad (41)$$

a F_a^* iz jednadžbe 31.

Moguće je nadalje odrediti i naprezanja u vanjskoj i unutarnjoj stijenci tubinga, kako bi unaprijed odabrali materijal tubinga odgovarajućih mehaničkih svojstava. Naprezanje u vanjskoj stijenci određuje se iz obrasca:

$$\sigma_o = \sqrt{3 \cdot \left(\frac{P_{if} - P_{of}}{R^2 - I} \right)^2 + \left(\frac{P_{if} - R^2 \cdot P_{of}}{R^2 - I} + \sigma_1 \pm \sigma_2 \right)^2} \quad (42)$$

a naprezanje u unutarnjoj stijenci iz obrasca:

$$\sigma_i = \sqrt{3 \cdot \left(\frac{R^2 \cdot (P_{if} - P_{of})}{R^2 - I} \right)^2 + \left(\frac{P_{if} - R^2 \cdot P_{of}}{R^2 - I} + \sigma_1 \pm \frac{\sigma_2}{R} \right)^2} \quad (43)$$

Predznaci za σ_1 , σ_2 odabiru se tako da dobijemo maksimalni iznos naprezanja.

$$\sigma_1 = \frac{F_a^*}{A_s} \quad (44)$$

$$\sigma_2 = \frac{D_i \cdot r \cdot F_f^*}{4 \cdot I} \quad (45)$$

Ako je $F_f^* \leq 0 \rightarrow \sigma_2 = 0$ znači da tubing nije izvijen nakon promjene tlaka i temperature.

Za pakere koji dozvoljavaju slobodno kretanje tubinga u jednadžbe (44) i (45) umjesto F_a^* , F_f^* , uključuju se F_w , F_f određeni jednadžbama (9) i (10) za konačne uvjete.

Zaključak

Namjera je ovog rada bila približiti i pojasniti neke nedorečenosti citiranih radova. Služeći se samo nekim od njih, uz djelomično poznavanje problematike, moguće je nesvjesno učiniti pogrešku bitnu za stabilnost sustava tubinga i pakera. Vjerujemo da je ovim radom omogućen pravilan slijed proračunavanja za potvrđen provjerama programom izrađenim za elektroničko računalo. Program je na raspolaganju potencijalnim interesentima u Zavodu za naftno rudarstvo Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta.

Primljeno: 8. III. 1993.

Prihvaćeno: 24. V. 1993.

LITERATURA

- Goins, W. C. (1980): Better Understanding Prevents Tubular Buckling Problems, Part 2., *World Oil, Feb.*, 35–40, Houston
- Hammerlindl, D. J. (1977): Movement, Forces, and Stresses Associated With Combination Tubing Strings Sealed in Packers, *J. Pet. Tech.*, 195–208, Dallas
- Livaja, M. (1992): Upotreba računala kod određivanja naprezanja u sistemu tubinga i pakera, Diplomski rad, RGN fakultet, str. 46, Zagreb
- Lubinski, A. (1987): Collected Works of Arthur Lubinski Edited by Stefan Miska, Gulf Publishing Company, 160–190, Houston
- Lubinski, A., Althouse, S. W., Logan, J. L. (1962): Helical Buckling of Tubing Sealed in Packers, *J. Pet. Tech.*, 655–670, Dallas
- Šindija, I., Miloš, J. (1973): Technical Problems of Packers Setting in Deep Wells, Drugi Jadranski susret bušača, 232–246, Poreč

OZNAKE

A_i – površina određena unutarnjim promjerom tubinga, m^2

$$A_i = \frac{d_i^2 \cdot \pi}{4}$$

A_o – površina određena vanjskim promjerom tubinga, m^2

$$A_o = \frac{D_i^2 \cdot \pi}{4}$$

A_p – površina određena promjerom otvora pakera, m^2

$$A_p = \frac{d_p^2 \cdot \pi}{4}$$

A_s – površina presjeka tubinga, m^2

$$A_s = \frac{(D_i^2 - d_i^2) \cdot \pi}{4}$$

d_c – unutarnji promjer zaštitnih cijevi, m

d_p – promjer otvora pakera, m

d_i – unutarnji promjer tubinga, m

D_i – vanjski promjer tubinga, m

E – Youngov modul elastičnosti (21×10^{10}), Pa

F – sila, N

F_a – stvarna sila (Lubinski), N

F_{af} – stvarna sila za konačne uvjete, N

F_a^* – stvarna sila zbog ograničenja kod pakera, N

F_b – sila zbog djelovanja uzgona, N

F_{bal} – sila u nizu uslijed napuhavanja/sažimanja, N

F_f – fiktivna sila (Lubinski), N

F_f^* – fiktivna sila zbog ograničenja kod pakera, N

F_{ff} – fiktivna sila za konačne uvjete, N

F_p – sila između tubinga i pakera, N

F_s – sila ostvarena na dno niza cijevi ili paker (nasjedanje), N

F_{temp} – sila u nizu cijevi ostvarena zbog promjene temperature, N

g – gravitacija, ms^{-2}

I – moment inercije tubinga, m^4

k – korak spirale, m

L – duljina tubinga, m

ΔL – ukupna promjena duljine tubinga, kada paker dozvoljava slobodno kretanje, m

ΔL_1 – promjena duljine tubinga zbog djelovanja klipnog efekta, m

ΔL_2 – promjena duljine tubinga zbog izvijanja, m

ΔL_2^* – promjena duljine tubinga zbog izvijanja, kada je neutralna točka izvan niza, m

ΔL_3 – promjena duljine tubinga zbog napuhavanja/sažimanja, m

ΔL_4 – promjena duljine tubinga zbog temperaturnog efekta, m

ΔL_5 – promjena duljine tubinga zbog nasjedanja na paker, m

ΔL_6 – promjena duljine tubinga koja bi bila ostvarena kada bi odstranili ograničenje na pakeru, m

ΔL_t – prividna promjena duljine tubinga u konačnim uvjetima, m

ΔL_t^* – prividna promjena duljine tubinga kada paker ne dozvoljava kretanje, m

ΔL_p – promjena duljine tubinga potrebna da se kraj tubinga postavi u razini pakera, m

n – udaljenost neutralne točke od kraja tubinga, m

P – tlak, Pa

P_i – tlak u tubingu na razini pakera, Pa

P_o – tlak u prstenastom prostoru na razini pakera, Pa

P_{if} – tlak u tubingu na razini pakera u konačnim uvjetima, Pa

P_{ifa} – srednji tlak u tubingu u konačnim uvjetima, Pa

$$P_{ifa} = \frac{P_{if} - P_{if}}{2}$$

P_{ii} – tlak u tubingu na razini pakera u početnim uvjetima, Pa

P_{iia} – srednji tlak u tubingu u početnim uvjetima, Pa

$$P_{iia} = \frac{P_{ii} - P_{ii}}{2}$$

P_{of} – tlak u prstenastom prostoru na razini pakera u konačnim uvjetima, Pa

P_{oi} – tlak u prstenastom prostoru na razini pakera u početnim uvjetima, Pa

P_{oia} – srednji tlak u prstenastom prostoru u početnim uvjetima, Pa

$$P_{oia} = \frac{P_{oi} - P_{oi}}{2}$$

P_{ofa} – srednji tlak u prstenastom prostoru u konačnim uvjetima, Pa

$$P_{ofa} = \frac{P_{of} - P_{of}}{2}$$

ΔP_i – promjena tlaka u tubingu na razini pakera, Pa

$$\Delta P_i = P_{if} - P_{ii}$$

ΔP_o – promjena tlaka u prstenastom prostoru na razini pakera, Pa

$$\Delta P_o = P_{of} - P_{oi}$$

ΔP_{ia} – promjena srednjeg tlaka u tubingu, Pa

$$\Delta P_{ia} = P_{ifa} - P_{iia}$$

ΔP_{oa} – promjena srednjeg tlaka u prstenastom prostoru, Pa

$$\Delta P_{oa} = P_{ofa} - P_{oia}$$

p_i – tlak u tubingu na površini, Pa

p_o – tlak u prstenastom prostoru na površini, Pa

p_{ii} – tlak u tubingu na površini u početnim uvjetima, Pa

p_{if} – tlak u tubingu na površini u konačnim uvjetima, Pa

p_{oi} – tlak u prstenastom prostoru na površini u početnim uvjetima, Pa

p_{of} – tlak u prstenastom prostoru na površini u konačnim uvjetima, Pa

Δp_i – promjena tlaka u tubingu na površini, Pa

Δp_o – promjena tlaka u prstenastom prostoru na površini, Pa

r – zazor između tubinga i zaštitnih cijevi, m

r_i – unutarnji polumjer tubinga, m

r_o – vanjski polumjer tubinga, m

r_d – polumjer na kojem određujemo naprezanje, m

R – omjer vanjskog i unutarnjeg promjera tubinga

Δt – promjena temperature, $^{\circ}C$

w – težina tubinga po dužnom metru, N/m

w_s – masa tubinga po dužnom metru u zraku, kg/m

β – linearni koeficijent termičkog istežanja za čelik ($12,43 \times 10^{-6} \text{ } ^{\circ}C^{-1}$)

δ – pad tlaka po jedinici duljine tubinga, zbog protjecanja fluida, Pa/m

ν – Poissonov omjer za čelik, (0,3)

π – Ludolfov broj, (3,14)

Q_i – gustoća fluida u tubingu, kg/m^3

Q_o – gustoća fluida u prstenastom prostoru, kg/m^3

$\Delta \rho_i$ – promjena gustoće fluida u tubingu, kg/m^3
 $\Delta \rho_o$ – promjena gustoće fluida u prstenastom prostoru, kg/m^3
 σ_a – aksijalno naprezanje tubinga, Pa
 σ_r – radijalno naprezanje tubinga, Pa

σ_t – tangencijalno naprezanje tubinga, Pa
 σ_1 – određeno jednačbom (44)
 σ_2 – određeno jednačbom (45)