

RAZVOJ ČRPALNE ENOTE ZA ČRPANJE SUROVE NAFTE IZ VELIKIH GLOBIN

Simon Oman, Marko Nagode, Jernej Klemenc, Aleš Gosar

Izveček:

Z možnostjo vrtanja v vse večje globine so se pojavile nove priložnosti za pridobivanje nafte. Ocenjeno je, da trenutno več kot 90 % vseh naftnih vrtin za pridobivanje surove nafte potrebuje črpalni sistem oz. umetno dvigovanje. Trenutno se za črpanje uporabljajo relativno stare tehnologije, ki imajo precej pomanjkljivosti in naftnim podjetjem zmanjšujejo zaslužke. Zaradi tega velika naftna podjetja vlagajo v razvoj novih tehnologij, ki bi pomanjkljivosti odpravile. Ena od največjih pomanjkljivosti je nezmožnost ene same obstoječe tehnologije za pokrivanje pretokov skozi celotno uporabno dobo vrtine, zaradi česar je potrebno sprotno prilagajanje vrste tehnologije razmeram v vrtini, kar pa je zamudno in zelo drago. V prispevku je prikazan razvoj nove tehnologije črpalke, ki bazira na sicer obstoječih principih črpanja, vendar z inovativnimi konstrukcijskimi rešitvami omogoča, da se z združevanjem večjega števila črpalnih enot lahko zagotovijo ustrezni volumski pretoki in je ni treba kombinirati z drugimi vrstami črpalk. Zaradi zelo zahtevnih in specifičnih razmer v vrtini je bilo potrebno najti tudi številne tehnične rešitve za reševanje delnih funkcij. Serija prototipov je že bila testirana v vrtinah na globini tri tisoč metrov. Prvi rezultati so zelo vzpodbudni, pokazale pa so se tudi potrebe po izboljšavah in dopolnitvah.

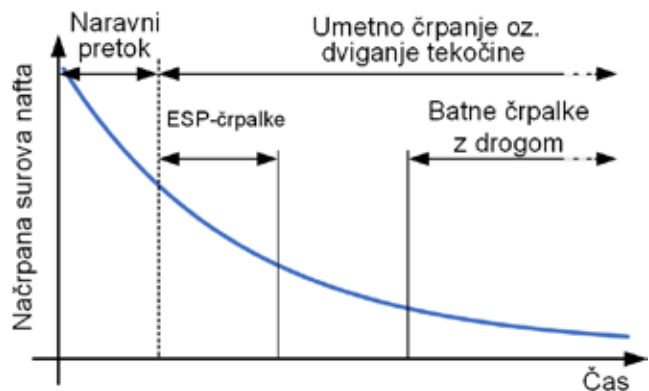
Ključne besede:

črpalke, surova nafta, abrazivni delci, umetno dvigovanje, črpalni sistemi

1 Uvod

Sistemi za črpanje oziroma umetno dvigovanje tekočine (angl. Artificial lift systems) so najpogosteje uporabljene proizvodne tehnologije v naftni in plinski industriji. Vrtine, ki same ne morejo dovajati tekočine na površje pod lastnim tlakom, za proizvodnjo potrebujejo tehnologijo dvigovanja. Nekatere vrtine potrebujejo pomoč pri dvigovanju že od samega začetka, skoraj vse pa proti koncu življenjske dobe [1], saj volumski pretok oziroma količina načrpane nafte iz posamezne vrtine s starostjo vrtine pada po eksponentni krivulji, kot je to poenostavljeno prikazano na *sliki 1*.

V vrtini z naravnim pretokom je v podzemnem zalogovniku shranjene dovolj energije (tlak) za naravni dvig surove nafte na površje. Ko se tlak zmanjša in/ali ko je želeni nivo proizvodnje večji od dejanske zmogljivosti vrtine, je za doseganje razlike treba uporabiti črpalne sisteme za umetno dvigovanje nafte [2]. Globalnih statističnih podatkov o ume-

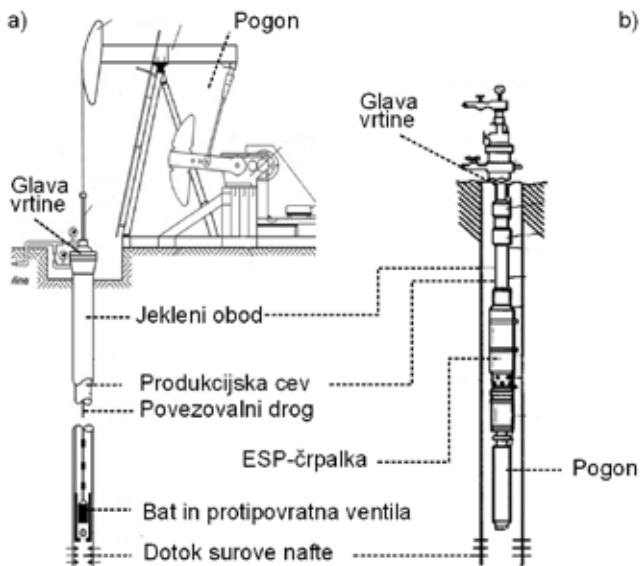


Slika 1: Karakteristike proizvodnje surove nafte tipične vrtine v odvisnosti od njene starosti

tnem črpanju ni; se pa ocenjuje, da 90 % do 95 % proizvodnih vrtin na svetu trenutno uporablja umetno črpanje [1]. Za črpanje se najpogosteje uporabljajo batne črpalke z drogom (angl. Sucker Rod Pumps), električne potopne črpalke (angl. Electric Submersible Pumps oz. ESP) in plinske črpalke. Te tehnologije so bile razvite v preteklem stoletju in imajo precej pomanjkljivosti [3], zato je na tem področju veliko inženirskih priložnosti za izboljšave.

V večini primerov se ob začetku uporabe umetnega črpanja uporabljajo ESP-črpalke (glej *slika 1* in *slika 2b*), ki lahko zagotavljajo visoke pretoke ob za-

Doc. dr. Simon Oman, univ. dipl. inž., **prof. dr. Marko Nagode**, univ. dipl. inž., **prof. dr. Jernej Klemenc**, univ. dipl. inž., **dr. Aleš Gosar**, univ. dipl. inž., vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo



Slika 2 : Shematski prikaz črpalnih sistemov z a) batno črpalko z drogom in b) ESP-črpalko

dovoljivem izkoristku [4]. Ker gre za centrifugalne črpalke, sta razpoložljivi pretok in posledično izkoristek močno odvisna od tlačne razlike, ki je potrebna za transport surove nafte iz podzemnega zalogovnika do površja. Ker tlak (in tudi proizvodnja) v podzemnem zalogovniku z uporabo pada, je treba ESP-črpalko večkrat zamenjati z novo, ki je prilagojena takratnim tlačnim razlikam in zahtevanim volumskim pretokom. Zaradi postopka vgradnje črpalke, ki je s površino povezana preko producerske cevi, ki jo sestavljajo 14 m dolgi cevni elementi, se črpanje prekine za vsaj en teden. Tem prekinitvam črpanja bi se naftna podjetja rada izognila. Pri dovolj nizkem tlaku ESP-črpalke niso več primerne in se navadno nadomestijo z batno črpalko z drogom (slika 2a). Gre za najstarejšo tehnologijo črpanja, ki pa je stroškovno ugodnejša in dovolj zanesljiva. Črpalke sestavljajo bat, protipovratna ventila in drog, ki je povezan z mehanskim pogonom na površini. Omejitve batnih črpal z drogom so razmeroma nizek volumski pretok in številne težave [5], ki so najbolj pogosto povezane z obrabo droga oziroma jeklenega oboda vrtine (drgnjenje droga ob jekleni obod vrtine). Prekomerna obraba v številnih primerih poruši drog, kar zahteva izvek črpalke, menjavo droga in orodjarsko korekcijo na jeklenem obodu vrtine. Kljub vsemu pa je življenjska doba batnih črpal z drogom bistveno daljša kot pričakovana doba ESP-črpal (približno razmerje: 1 leto ESP, 10 let batna z drogom). Ker batne črpalke z drogom omogočajo precej nižje volumske pretoke kot ESP-črpalke, se po zamenjavi v proizvodnji surove nafte pojavi manko, kot je prikazano na sliki 1. Navadno se zato čas do popolne izpraznitve naravnega zalogovnika s surovo nafto podaljša.

Zaradi zgoraj naštetih težav z obstoječimi tehnologijami umetnega dvigovanja nafte iz globokih vrtin so se v naftnih podjetjih pojavile želje in s tem

potencial za razvoj novih tehnologij črpanja surove nafte, ki bi lahko pokrivalo proizvodnjo celotno življenjsko dobo naravnega zalogovnika. V tem prispevku je prikazan koncept nove tehnologije, ki z inovativno rešitvijo združevanja večjega števila črpal v celoto omogoča pokritje celotnega produkcijskega območja za večino vrtin.

2 Idejna zasnova črpalne naprave

Pri iskanju nove črpalne tehnologije, ki bi omogočala velik razpon pretokov/proizvodnje in premaganje velikih tlačnih razlik, je potrebno upoštevati še dodatne geometrijske omejitve, ki močno skrčijo nabor uporabnih rešitev. Globoke naftne vrtine so namreč po premeru relativno majhne in je zato razpoložljivega prostora za črpalko ob relativno velikih maksimalnih pretokih zelo malo. Vsi robni pogoji, ki bi jih nova tehnologija morala zadostiti, so podani v tabeli 1. S krepko so zapisani parametri, ki jih mora nova tehnologija nujno dosegati.

Glede na zahteve je bil za črpalni sistem izbran že dobro preverjen aksialni batni črpalni sistem, ki dobro funkcioniira tudi v batnih črpalkah z drogom, s to razliko, da bi bil pri razviti rešitvi pogon bata nameščen poleg črpalke v vrtini in ne na površju, kot je to pri batnih črpalkah z drogom. Zaradi zahtevnih robnih pogojev, kot so visoka temperatura, trdi abrazivni delci in večje količine utekočinjenega zemeljskega plina, je bila v prvem konceptu dodana tudi enota za ločevanje surove nafte, trdih delcev in plina. Z uporabo enote za ločevanje se ob večji količini plina močno zmanjša potreba po zaustavitvi črpanja in hkrati pomembno podaljša življenjska doba črpalke [6]. Celotna shema razvitega koncepta črpalnega sistema je prikazana na sliki 3.

Zaradi številnih omejitev in zahtevnih obratovalnih pogojev je bila neposredna prilagoditev obstoječih konceptov aksialnih batnih črpal praktično nemogoča. Težave, s katerimi smo se srečali pri snovanju in bodo v nadaljevanju nekoliko bolj podrobno opisane, so bile naslednje:

i **Dimenzijske omejitve.** Podrobnejše računske analize so pokazale, da je zaradi zelo navzgor omejenega premera črpalke (114,3 mm) zahtevani volumski pretok s samo eno črpalno enoto praktično nemogoče doseči. Za doseganje želenih pretokov bi bilo tako potrebnih več vzporedno vezanih črpalnih enot. Zato smo od vsega začetka iskali rešitev, ki bi zagotovila vzporedno povezavo aktivno kontroliranih črpalnih enot z vidika pretoka in zaporedni postavitvi, ki jo dovoljuje geometrija vrtine. Tako z izbiro delujočega (aktivnega) ali nedelujočega (neaktivnega) stanja posamezne črpalne enote diskretno reguliramo volumski pretok in omogočimo namestitev redundantnih črpalnih enot, s čimer se

Tabela 1 : Zahteve in robni pogoji za optimalno tehnologijo umetnega dviganja nafte

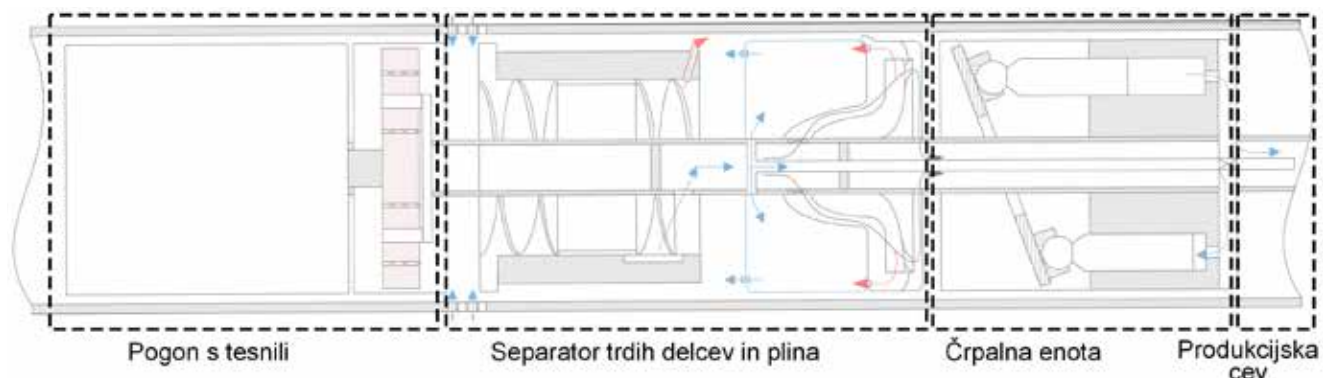
Lastnosti surove nafte	Maksimalna temperatura	°C	115,5
	Gostota	kg/m ³	809
	Viskoznost pri 26,6 °C	cP	1,7
	Viskoznost pri 115,5 °C	cP	0,2
	Točka uplinjanja (angl. Bubble point)	bar	206
	Razmerje plina in nafte: GOR	Scf/stb	150-2000
	Koncentracija trdih delcev	g/m ³	2,03
Dimenzije:	Povprečna velikost trdih delcev	µm	91,7
	Notranji premer vrtine	mm	154,8
	vrtine/produkcijske cevi/črpalke	°/m	5° na 3 m
	Povprečna ukrivljenost vrtine	°/m	2° na 27,5 m
	Notranji premer produkcijske cevi	mm	62
Tlak	Maksimalna globina vrtine	m	3200
	Maksimalni zunanji premer črpalke	mm	114,3
	Minimalni sesalni tlak	bar	20
Pretok	Imenska tlačna razlika črpalke	bar	190
	Minimalni pretok	L/min	2,76
Pretok	Še sprejemljiv maksimalni pretok	L/min	176
	Maksimalni pretok	L/min	276

pomembno poveča zanesljivost črpalnega sistema. Ker so črpalne enote funkcijsko neodvisne, razvita rešitev omogoča dodajanje, odstranjevanje ali zamenjavo črpalnih enot, s čimer je mogoče celoten sistem prilagoditi potrebam posamične naftne vrtine.

ii Zahtevni tribološki pogoji. Črpalni medij ni čist in tako neprimeren za mazanje gibljivih delov v črpalki, kot je to navadno rešeno v hidravličnih aksialnih batnih črpalkah. To je zahtevalo razvoj drugačnega principa pogona batov. Zaradi abrazivnih delcev v surovi nafti je črpalka izpostavljena povečani obrabi. Posledično so bile glede na znane rešitve potrebne prilagoditve tesnjenja in vodenja batov.

iii Zahtevni obratovalni pogoji. Poleg tlaka in nizke viskoznosti surove nafte je material konstantno izpostavljen visoki temperaturi (~ 115 °C), ki se lahko lokalno zaradi kontaktov in trenja še poveča. V surovi nafti je precej oksidativnih kemičnih spojin, zaradi tehnoloških postopkov pa se pri proizvodnji lahko uporabljajo tudi agresivne jedke spojine. Izbor primernih materialov je bil zato podrejen standardom naftne in plinske industrije in posledično precej omejen.

V nadaljevanju so prikazani ključni koraki koncipiranja ob upoštevanju danih omejitev in obratovalnih pogojev, utemeljitev izbranega koncepta ter primer eksperimentalnega vrednotenja delne rešitve – vodenje črpalnih batov.



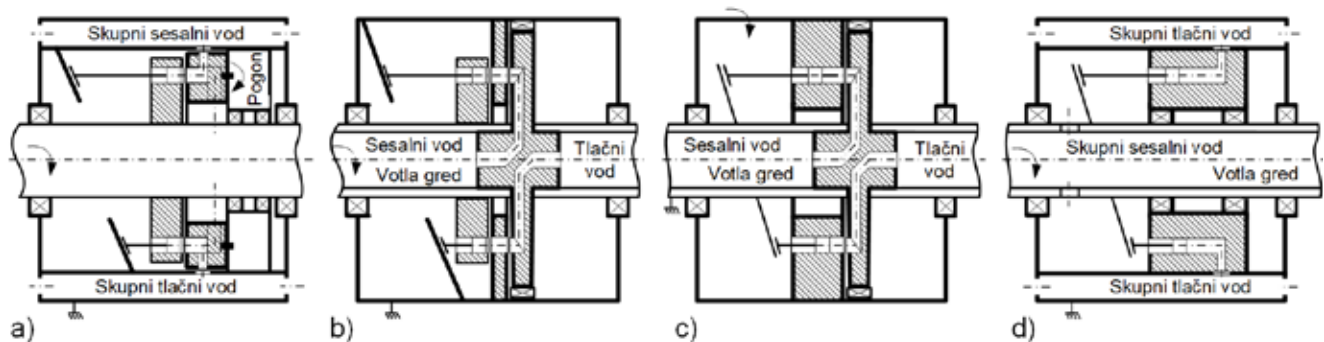
Slika 3 : Shematski prikaz sestave modularnega črpalnega sistema

3 Koncipiranje, analiza in eksperimentalno vrednotenje delnih rešitev črpalne enote

V prvem koraku konstrukcijskega razvoja je potrebno določiti koncept, ki lahko zagotavlja izpolnitev večine, če ne celo vseh, podanih zahtev. Nekaj različnih razvitih konceptov črpalnega sistema in črpalnih enot, ki bi potencialno ustrezali danim zahtevam in obratovalnim pogojem, je prikazanih v naslednjem poglavju. V nadaljevanju pa so prikazane še različne zasnove izbranega koncepta ter analizirani in eksperimentalno ovrednoteni delovni principi, ki omogočajo delovanje v oteženih okoljskih pogojih.

3.1 Koncepti črpalnih enot

Glede na izkušnje s hidravličnimi črpalniki in črpalnimi sistemi smo se pri koncipiranju in razvoju črpalne enote omejili na principe aksialnih batnih črpalnik. Med drugim tudi zaradi preverjeno dobrega in zanesljivega delovanja, robustne in relativno enostavne zgradbe in primernih črpalnih zmogljivosti. Ker je bilo znotraj dovoljenega premera ohišja zelo malo prostora za vgradnjo precej velikih mehanskih ali električnih aktivatorjev, s katerimi se pri variabilnih črpalnikah nastavlja naklon nagibne plošče za regulacijo pretoka, smo se odločili za koncept s fiksno ploščo oz. črpalno enoto s konstantno iztisinno. Nekaj od teh konceptov je prikazanih na *sliki 4*.



Slika 4 : Koncepti aksialne batne črpalke s fiksno ploščo z (a) vrtečo se gredjo in stacionarnim ohišjem, (b) z vrtečo se votlo gredjo in stacionarnim ohišjem, (c) s stacionarno votlo gredjo in vrtljivim ohišjem, (d) z vrtečo se votlo gredjo in stacionarnim ohišjem

Tabela 2 : Vrednotenje konceptov nove črpalke za črpanje nafte

Koncept	Prednosti koncepta	Slabe lastnosti koncepta	Splošna ocena
(a)	Omogoča redundanco Omogoča sklapljanje enot za doseganje poljubnega pretoka Ima polno gred in mirujoče ohišje	Ima konstantno iztisinno Potrebuje pogon za vklapljanje in izklapljanje posamezne črpalne enote	4/4
(b)	Enostavna oblika Centralni vod za pretok nafte Mirusoče ohišje	Ne omogoča redundance Velika količina kontaktnih/tesnilnih površin Ima omejen maksimalni pretok (le ena enota) Ima konstantno iztisinno Ima votlo gred	2/4
(c)	Enostavna oblika Centralni vod za pretok nafte	Ne omogoča redundance Velika količina kontaktnih/tesnilnih površin Ima omejen maksimalni pretok (le ena enota) Ima konstantno iztisinno Velike vztrajnostne mase	2/4
(d)	Omogoča redundanco Omogoča sklapljanje enot za doseganje poljubnega pretoka Mirusoče ohišje	Ima konstantno iztisinno Velika količina kontaktnih/tesnilnih površin Otežena redundanca	3/4

Vsi prikazani koncepti lahko zagotovijo zeleno tlačno razliko in jih je mogoče namestiti v ohišje, vendar pa noben ne izpolnjuje zahteve po volumskem pretoku. Izmed zamišljenih konceptov smo zato izbirali samo take, ki omogočajo sestavljanje črpalnih enot v črpalni sistem ter s tem doseganje potrebnega volumskega pretoka in redundanco. Skupni pretok je tako odvisen od vsaj dveh ali več uporabljernih in delujočih črpalnih enot, dodatna regulacija pa je mogoča z uporabo frekvenčnega reguliranja pogonskega elektromotorja. Kvalitativna ocena z utemeljitvijo v smislu izvedljivosti, redundance in izpolnjevanja zahtev je za vsak koncept na sliki 4 predstavljena v tabeli 2.

Ker lahko koncept (a) (slika 4a), v nadaljevanju tega članka poimenovan kot koncept z enotnim tlačnim in sesalnim vodom, izpolni več zahtev v primerjavi z ostalimi tremi koncepti, je bil izbran za nadaljnje raziskave in razvoj. Podrobnosti so predstavljene v naslednjih poglavjih.

3.2 Koncept z enotnim tlačnim in sesalnim vodom

V tem poglavju so prikazani ključni koraki študije izvedljivosti koncepta z enotnim tlačnim in sesalnim vodom glede na zeleni oziroma maksimalni volumski pretok. Študija je upoštevala naslednje predpostavke:

- ▶ enotni sesalni vod mora zagotavljati pretok 176 l/min (tabela 1),
- ▶ po priporočilih za hidravlične sisteme hitrost medija v sesalnem vodu ne sme presegati 1,23 m/s (ob predpostavki atmosferskega tlaka na vstopu) in 7,62 m/s v tlačnem vodu [7],
- ▶ zagotovljen mora biti prostor za skožnje povezovalne prednapete vijake,
- ▶ ohišje posamezne črpalne enote zaradi koncepta izmenljivosti ne sme biti preobremenjeno (trdnost),
- ▶ notranji premer ohišja črpalne enote mora zagotavljati dovolj prostora za ploščo z ležaji, blok cilindrov z bati, ventile, tesnila.

Pri določanju zmogljivosti posamezne črpalne enote je bilo najprej potrebno izračunati največji še dovoljeni presek tlačnega in sesalnega voda, ki ju dovoljuje razpoložljiva geometrija, preden je material napetostno in deformacijsko preobremenjen. Zaradi kompleksnosti geometrije so bile te analize narejene s pomočjo računalniških modelov in s simulacijami s končnimi elementi (Simulia Abaqus).

Prav tako je bilo treba določiti tudi najmanjši dovoljeni presek sesalnega voda, ki je vezan na dejansko hitrost črpanega medija (nafte). Pri visokih hitrostih (majhni preseki) se namreč hitro pojavijo težave s kavitacijo, z nezveznim nihanjem tlaka s turbulentnimi izgubami, padci in tlačni skoki. Najmanjši

dovoljeni presek sesalnega voda smo izračunali po enačbi (1).

(1)

$$A_{S,min} = \frac{Q}{v_S} = \frac{176 \cdot 10^6 \text{ mm}^3}{60 \text{ s}} \cdot \frac{1}{1,23 \cdot 10^3} \frac{\text{mm}}{\text{s}} = 2385 \text{ mm}^2$$

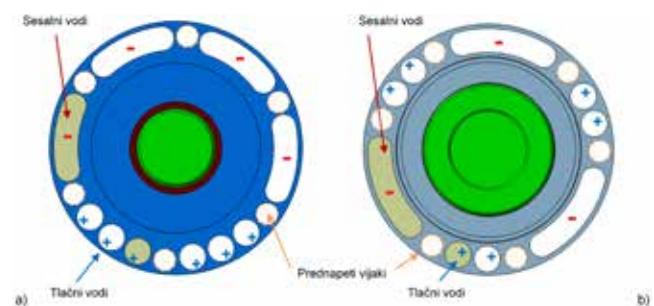
Najmanjši dovoljeni presek tlačnega voda smo izračunali po enačbi (2).

(2)

$$A_{T,min} = \frac{Q}{v_T} = \frac{176 \cdot 10^6 \text{ mm}^3}{60 \text{ s}} \cdot \frac{1}{7,62 \cdot 10^3} \frac{\text{mm}}{\text{s}} = 385 \text{ mm}^2$$

Ob znanih omejitvah, tako geometrijskih kot fizikalnih, smo izvedli geometrijsko optimizacijo preseka. Pomembno je poudariti, da smo pri geometrijski optimizaciji stremeli predvsem k povečanju prečnega preseka sesalnega voda. S tem smo želeli zmanjšati tlačne izgube na sesalni strani, ki lahko vzdolž črpalnega sistema povzročijo precej težav, kot je naravno uplinjanje utekočinjenega zemeljskega plina, ki lahko pomembno zmanjša volumetrični izkoristek črpalke ali pa jo celo onemogoči (večje količine plina ob protipovratnih ventilih se zaradi kompresijskega razmerja plin-nafta ne da izločiti in zato črpalna namesto črpanja surove nafte samo tlačni plinski mehur).

Končna geometrija presekov in postavitev sesalnih in tlačnih vodov vseh črpalnih enot sta prikazani na sliki 5b. Na sliki 5a pa je predstavljen prvotni koncept, ki pa ne zadosti trdnostnih kriterijev. Naj še omenimo, da v kolikor predvideni minimalni specifični tlak na sesalni strani ni enak 0 bar (v našem primeru je predvidenih 20 bar), je dejanska potrebna površina sesalnega voda glede na prvotni izračun iz enačbe (1) lahko sorazmerno manjša.



Slika 5 : Prečni preseki ohišja črpalne enote z enotnimi sesalnimi in tlačnimi vodi a) pred geometrijsko optimizacijo in b) po njej

3.3 Analiza in eksperimentalno vrednotenje obstoječih rešitev

Na trgu obstaja več različnih konstrukcijskih izvedb aksialnih batnih črpal, vsaka s svojo prednostjo in slabostjo. Ker se je izkazalo, da nobena od obstoječih konstrukcijskih izvedb ne bo mogla zagotoviti vseh

zahtevanih parametrov črpanja in hkrati izpolniti vseh geometrijskih in obratovalnih pogojev, smo za izbrani koncept predvideli kombinacijo delnih rešitev (tesnjenje, ventili, vpetja batov na nagibno ploščo, materiali, ...) po zgledu preverjenih in delujočih rešitev. Ob tem je bila izvedena analiza trga in veljavnih patentov.

Zaradi velikega števila mehanskih komponent in drsnih stikov med njimi je največji izziv, kako doseči zadostno zanesljivost črpalne enote. Zaradi zelo nizke viskoznosti surove nafte pa se lahko pomembno zmanjša tudi učinkovitost črpanja. Ker je bilo razvitih več tehničnih rešitev, ki naslavlajo različne funkcijske posebnosti, se bomo v tem članku omejili samo na predstavitev rešitve vodenja batov. Gre za zanimiv in zahteven tribološki in mehanski detajl, od katerega je odvisno delovanje celotnega črpalnega sistema. Primer je še toliko bolj specifičen, saj je za razliko od klasične hidravlične aksialne črpalke kontakt močno obremenjen z nečistočami, trdimi abrazivnimi delci in kemičnimi specifikami surove nafte. Namen te predstavitve je pokazati, kako nizka viskoznost surove nafte (črpanega medija) in abrazivni delci vplivajo na obrabo in zmanjšujejo predvideno dobo trajanja aksialne batne črpalke. V ta namen smo izdelali preizkuševališče in izvedli preizkuse na standardni hidravlični aksialni batni črpalci za črpanje olja in nato še na standardni aksialni batni črpalci, ki pa se uporablja za črpanje vode. Ti dve črpalci sta bili izbrani zaradi njunih specifičnih rešitev vodenja in tesnjenja batov, uporabljenih kombinacij materialov, zmožnosti zagotavljanja primerno visokega tlaka in volumskega pretoka ter predvsem povsem različnih konceptov črpanja. Detajli o materialu in poteku preizkusov so podani v nadaljevanju.

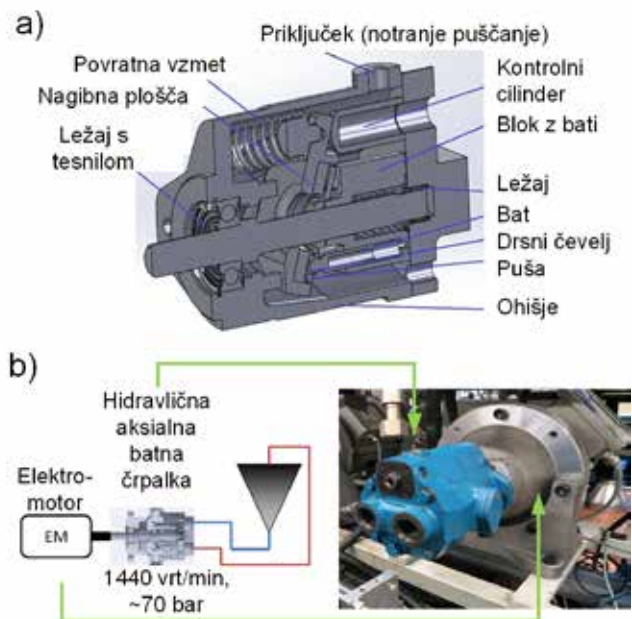
3.3.1 Eksperiment 1: vpliv olja z nizko viskoznostjo

Prva eksperimentalna postavitev je bila zasnovana za oceno delovanja standardne aksialne batne črpalke (Vickers PVQ10) pri črpanju olja z nizko viskoznostjo. Črpalka je imela konstantno iztisnino 10 cm³, vrtljivi blok cilindrov, nagibno ploščo in devet batov, kot je shematično prikazano na *sliki 6a*. Črpalka je bila na eni strani mehansko povezana z elektromotorjem, na drugi strani pa je bila s hidravličnimi cevmi povezana z rezervoarjem za olje, kot je prikazano na *sliki 6b*.

Fizikalne lastnosti uporabljenega olja so predstavljene v *tabeli 3*. Pri tem preizkusu smo olje filtrirali, trdih abrazivnih delcev nismo uporabili.

3.3.2 Eksperiment 2: vpliv trdih in abrazivnih delcev

Pri drugem eksperimentu je bil cilj preveriti vpliv trdih delcev na delovanje standardne hidravlične batne črpalke. Eksperimentalna postavitev je bila



Slika 6 : Eksperimentalni sistem: a) računalniški model aksialne batne črpalke s ključnimi sestavnimi deli in b) shema ter slika eksperimentalnega sistema

Tabela 3 : Lastnosti uporabljenega črpalnega medija pri eksperimentu 1.

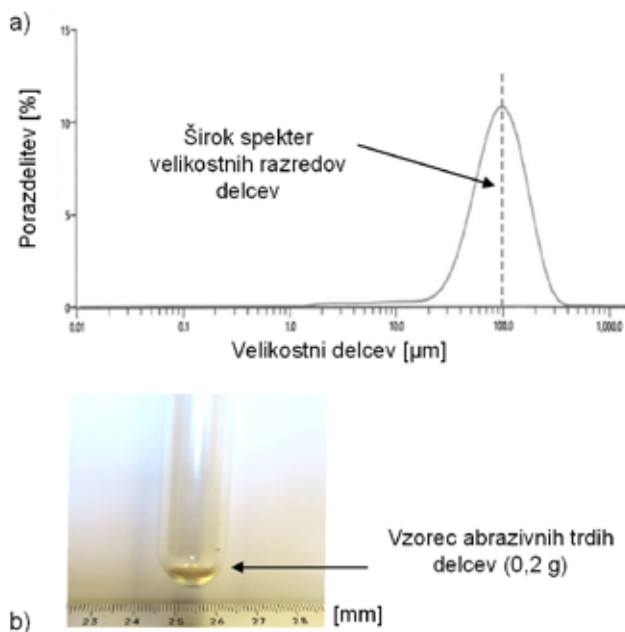
Material	Naziv	Opis in lastnosti
Črpalni medij	OLMOL EDM 270	Dielektrično olje za elektroerozijo
		Viskoznost: 2,2 cP pri 20 °C 0,4 cP pri 90 °C
Širina senzorja	11,4 mm	Gostota: 809 kg/m ³
Trdi delci	Brez delcev	/

enaka kot pri prejšnjem eksperimentu, le da je bilo uporabljeno hidravlično olje ustrezne viskoznosti. Lastnosti uporabljenega hidravličnega olja so podane v *tabeli 4*. Za izvedbo preizkusov smo uporabili vnaprej pripravljeno mešanico prahu [11] z znano porazdelitvijo velikosti trdih delcev. Prašna mešanica z znano vsebino se tudi sicer uporablja za testiranje naftnih črpalnih sistemov in filtrirnih enot, saj ima prah skoraj enako porazdelitev velikosti delcev in kemično sestavo kot tisti, najden v naftnih vrtinah. Porazdelitev velikostnih razredov trdih delcev je prikazana na *sliki 7*.

Ker je trdih delcev v naftni vrtini v resnici relativno malo, je bil ekvivalenten vzorec prahu za eksperiment skoraj neznamen. Zaradi tega v razpoložljivem času za testiranje ni bilo mogoče zagotoviti ustrezne ponovljivosti kot tudi ne intenzitete obrabe. Zato smo se odločili, da pospešimo eksperiment in ga izvedemo s povečano koncentracijo trdih del-

Tabela 7 : Lastnosti uporabljenega črpalnega medija pri Eksperimentu 2.

Material	Naziv	Opis in lastnosti
Črpalni medij	HIDROLUBRIC VG 46	Hidravlično olje
		Viskoznost: 40 cP pri 40 °C 5,8 cP pri 100 °C
		Gostota: 871 kg/m ³
Trdi delci	Fini testni prah (Powder Technology Inc.)	0,1 g/L

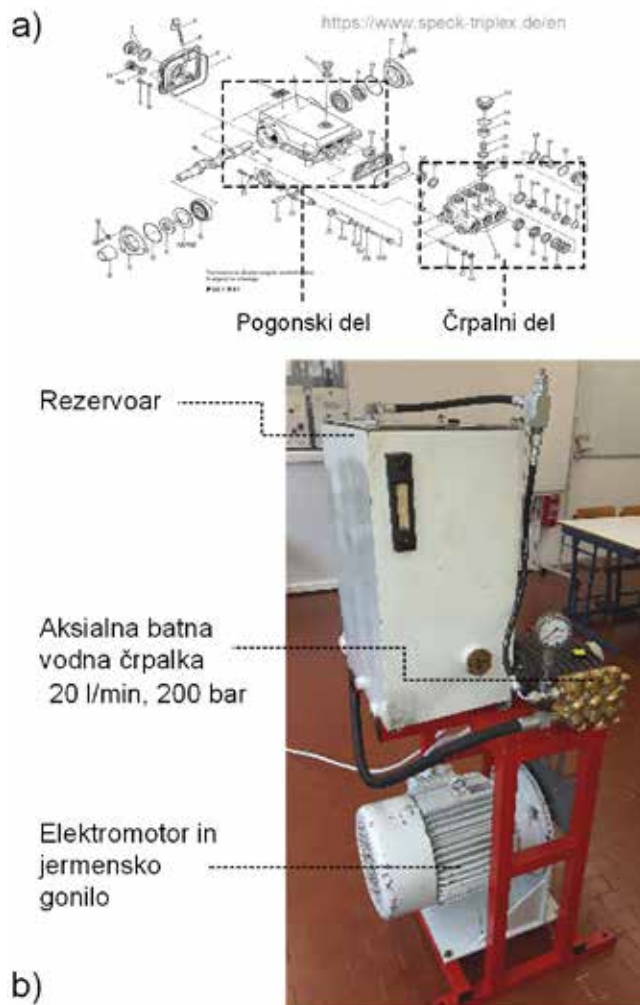


Slika 7 : Eksperimenti s trdimi abrazivnimi delci: a) mešanica testnega prahu s porazdelitvijo nominalne velikosti zrn in b) slika vrtni sorazmerno velikega vzorca prahu za ugotavljanje obrabe 1

cev. Teh je bilo glede na nazivno vrednost 2,03 g/m³ za faktor petdeset (50-krat) več.

3.3.3 Eksperiment 3: vpliv nizke viskoznosti in trdih abrazivnih delcev

Pri tretjem preizkusu je bila klasična hidravlična aksialna črpalka zamenjana s še vedno standardno aksialno črpalko, ki pa se uporablja za črpanje vode (Speck Triplex P30/36-150) in je prikazana na *sliki 8b*. Črpalka je po specifikacijah proizvajalca zmožna zagotavljati dovolj veliko tlačno razliko kot tudi črpati tekočino z nizko viskoznostjo in visoko temperaturo, npr. skoraj vrelo vodo z veliko nečistoč. Za razliko od prej omenjene hidravlične aksialne batne črpalke ima aksialna batna črpalka vodene in dva-



Slika 8 : Eksperimentalni sistem z aksialno batno črpalko Speck Triplex za črpanje vode

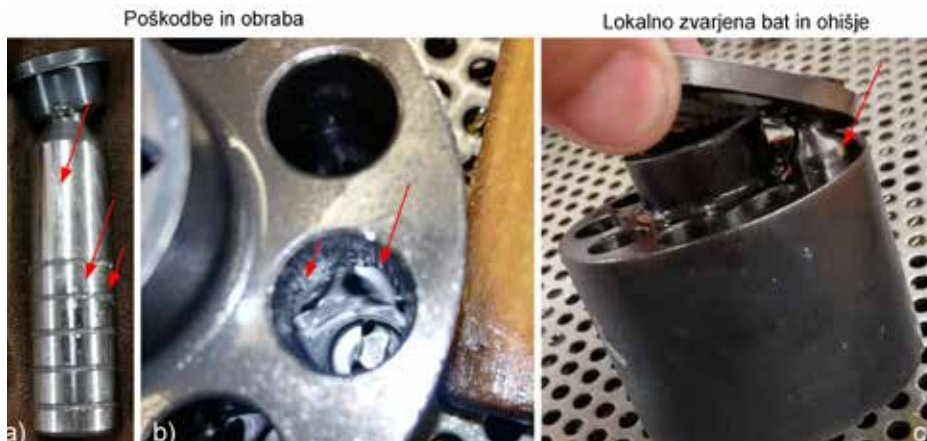
krat tesnjene bate, kar dovoljuje ločen pogonski in tlačni del, kot nazorno prikazano na *sliki 8a*.

4 Rezultati

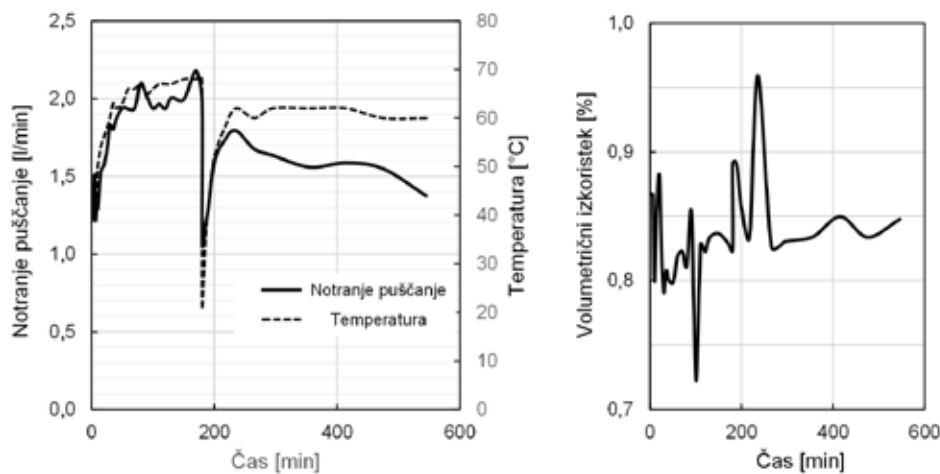
4.1 Eksperiment 1

Pri prvem eksperimentu je črpalka odpovedala v manj kot 2 minutah po zagonu. Ugotovljeno je bilo, da so okvaro povzročile lokalno preobremenjene kontaktne površine med cilindrom in bati, zaradi česar je eden od batov zaribal. Podrobnosti opazovanih lokalno poškodovanih površin na enem batu in znotraj ene od lukenj bata v cilindru so prikazane na *sliki 9a* oziroma *sliki 9b*. Po poskusu enega bata zaradi lokalne zavaritve z ohišjem ni bilo mogoče odstraniti, kar je prikazano na *sliki 9c*.

Rezultat testa je pokazal, da klasične hidravlične črpalke niso sposobne črpanja medijev z nizko viskoznostjo, saj zaradi slabega mazanja prihaja do težav. Rešitev za odpravo teh težav je v menjavi



Slika 9 : Aksialna batna črpalka po eksperimentu s trdimi delci: a) lokalna površinska poškodba na enem od batov in b) v luknjah cilindra ter c) lokalno zvarjena (zaribana) bat in ohišje



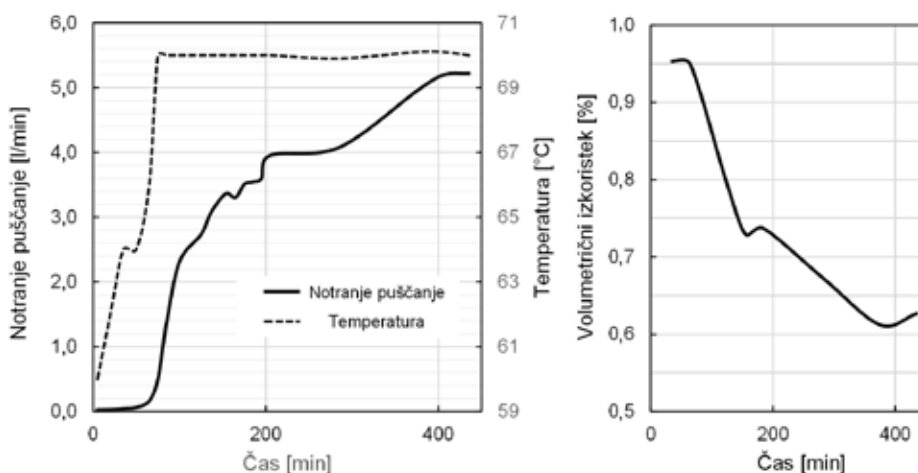
Slika 10 : Rezultati meritev črpalke z batki, prevlečenimi z DLC-prevleko: a) temperatura in notranje puščanje v odvisnosti od časa in b) volumetrični izkoristek v odvisnosti od časa

materialnega para, kjer prihaja do težav. V naslednjem koraku je bila opravljena raziskava vpliva različnih kombinacij materiala na obnašanje med preizkusom. Najprej so bili batki prevlečeni s trdo DLC-oblogo, v naslednjem koraku pa luknje cilindra povečane in vanje vstavljene keramične puše iz cirkonijeve keramike (ZrO_2), ki zagotavlja zelo nizke koeficiente trenja in relativno veliko udarno odpornost. Že eksperiment s prevlečenimi bati je pokazal, da so se kontaktne razmere občutno popravile in je zato črpalka delovala stabilno, kar potrjujeta dia-

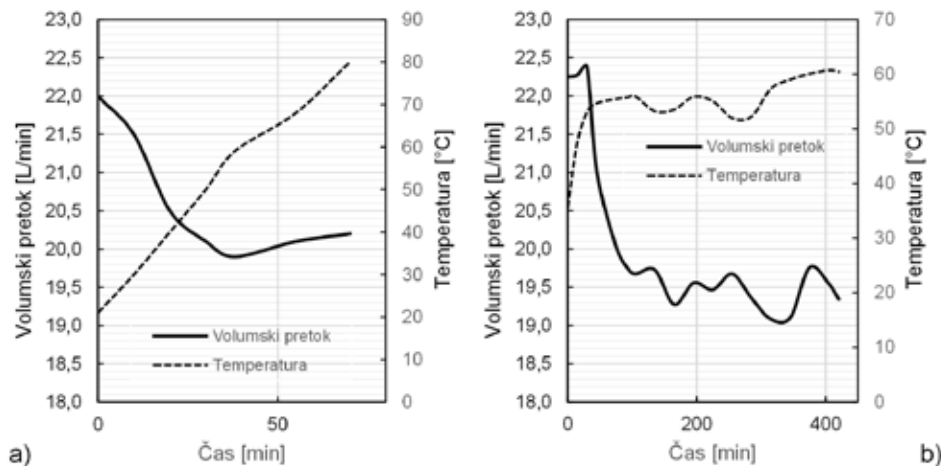
grama temperature in notranjega puščanja ter volumetričnega izkoristka na sliki 10. Pojasnilo k *sliki 10*: eksperiment je bil po 180 min začasno prekinjen, zaradi česar sta na grafu notranje puščanje in temperatura pred ponovnim zagonom upadla.

4.2 Eksperiment 2

Pri drugem eksperimentu je črpalka delovala štiri ure, preden je volumetrični izkoristek padel pod 70 %. Zaradi abrazivnih lastnosti uporabljenega te-



Slika 11 : Rezultati meritev s hidravličnim oljem: a) notranje puščanje in temperatura in b) volumetrični izkoristek v odvisnosti od časa



Slika 12 : Rezultati meritev volumskega pretoka in temperature hidravličnega olja v odvisnosti od časa za eksperiment z vodno črpalko: a) brez trdih delcev in b) s trdimi delci

stnega prahu se je notranje puščanje nenehno povečevalo. To je ob koncu eksperimenta doseglo že 5 l/min, zaradi česar je bil eksperiment ustavljen. Izmerjeno notranje puščanje in temperatura ter pripadajoči volumetrični izkoristek črpalke so predstavljeni na *sliki 11a* oziroma *sliki 11b*.

Detajlna analiza črpalke po eksperimentu je pokazala, da se obraba (vizualna kontrola) pojavlja na vseh mestih z drsnim kontaktom. Opažena obraba med bati, prevlečenimi z DLC-prevleko in cilindrom, je bila relativno majhna v primerjavi z obrabo, ki je nastala na ventilski plošči, ki je v tem primeru največ doprinesla k notranjemu puščanju. Te ugotovitve so pripeljale do sklepa, da koncept črpalke z ventilsko ploščo ni primeren za predvideno dolgotrajno delovanje pri zahtevnih pogojih obratovanja z veliko količino abrazivnih delcev. Hkrati pa smo ugotovili, da trde prevleke na batih lahko bistveno pripomorejo k izboljšanju obrabne odpornosti drsnih kontaktov. Prav tako bi bilo za dolgotrajno delovanje potrebno kontakt bat-cilinder še dodatno izboljšati in po zgledu raziskave Wang et al. [9] v cilinder namestiti keramične puše.

4.3 Eksperiment 3

Rezultati tretjega eksperimenta so pokazali (*slika 12*), da kombinacija keramike in jekla v kontaktnem paru bat-cilinder zelo dobro deluje (zanemarljiva obraba in notranje puščanje), pospešeni testi s povečano količino prahu pa kažejo, da sedežni tip protipovratnega ventila v primerjavi z drsno ploščo kaže večjo odpornost na mehansko obrabo in posledično omogoča doseganje daljše dobe trajanja kljub prisotnosti abrazivnih delcev. Dodatno spoznanje med testiranjem vodne črpalke je tudi to, da rešitev s povsem ločenim pogonskim in hidravličnim delom omogoča črpanje olja/vode z nizko viskoznostjo pri visokih tlakih in odlično prenaša nečistoče in abrazivne delce. Velja pa omeniti, da tovrstna rešitev zahteva večjo skrb za zagotavljanje ustreznih mazalnih pogojev pogonskega dela, saj voda ali olje z nizko viskoznostjo ne nudita primerljivih mazalnih pogojev hidravličnemu olju z dodatki.

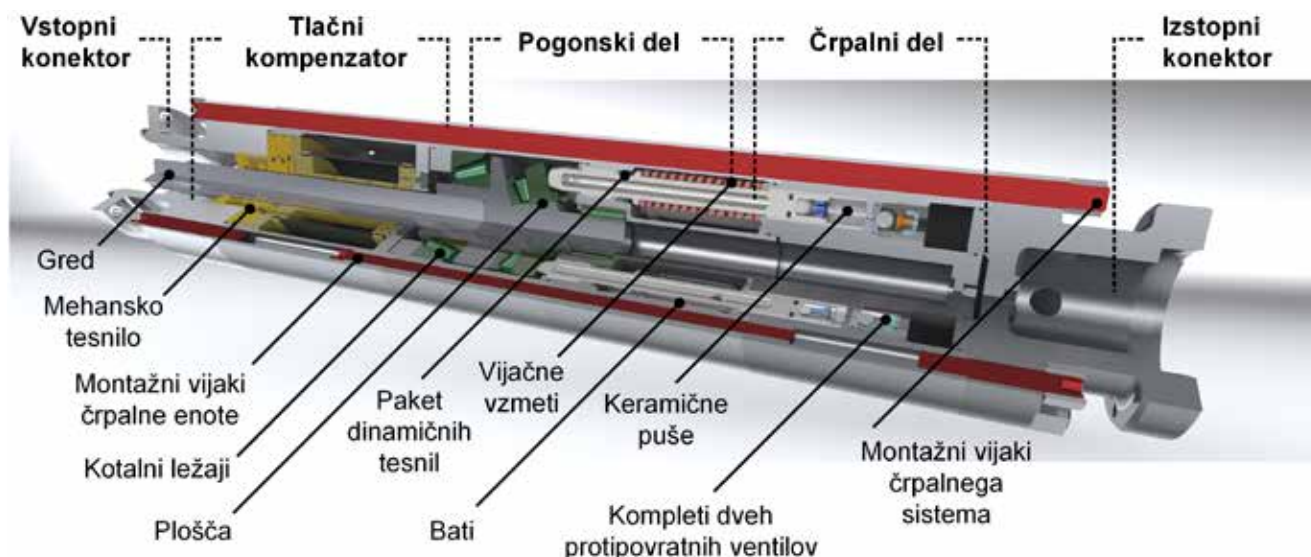
Vsa navedena spoznanja so ob še številnih vmesnih analizah in eksperimentalnem vrednotenju pripeljala do končne tehnične rešitve konstrukcije črpalke za črpanje surove nafte z nizko viskoznostjo pri visokem tlaku in visoki temperaturi, ki je predstavljena v naslednjem poglavju.

5 Predstavitev končne konstrukcijske črpalke

Po številnih korakih optimizacije, eksperimentalnih verifikacij in vpeljavi posameznih inovativnih rešitev za reševanje delnih funkcij je bila določena končna konstrukcija črpalne enote. Računalniški model razvite črpalne enote je v prerezu prikazan na *sliki 13*.

Črpalna enota je v grobem sestavljena iz sredinskega dela s pogonskim in tlačnim delom ter dveh priključnih konektorjev. Priključni konektor na izhodni strani omogoča spojitve črpalne enote s produkcijsko cevjo (cev, po kateri teče surova nafta iz naravnega zalogovnika do površine), priključni konektor na vhodni strani pa priključitev črpalne enote na separator trdih delcev in plina. vzdolž votle sredine separatorja se vrti gred, ki povezuje črpalno enoto in pod separatorjem nameščen pogonski elektromotor. To omogoča, da se med oba konektorja lahko namesti poljubno (glede na zmožnosti elektromotorja) število črpalnih enot in s tem regulira trenutni in posledično tudi največji razpoložljivi volumski pretok.

Tlačni del predstavlja devet batov s pripadajočim parom povratnih ventilov, ki omogočajo ustvarjanje tlačne razlike, potrebne za črpanje surove nafte. Ta se, tako na sesalni ali tlačni strani, pretaka po vzdolžnih kanalih, ki so nameščeni po zunanjem obodu ohišja. Patentirani koncept [10] z združenimi sesalnimi kanali in združenimi tlačnimi kanali omogoča poleg možnosti zaporednega sestavljanja črpalnih enot tudi ustrezno hlajenje pogonskega dela črpalne enote, v katerem je nagibna plošča skupaj s celotnim uležanjem. Ležaji so mehansko in termično



Slika 13 : Računalniški model razvite črpalne enote v prerezu z označenimi ključnimi sestavnimi elementi

močno obremenjeni, zato je pogonski del v celoti napolnjen z mazalnim oljem, zaradi česar mora biti zagotovljeno dobro tesnjenje na mestih, kjer bati vstopajo v pogonski del. Podobno velja tudi za mesto, kjer v pogonski del vstopa gred. Oba načina tesnjenja sta rešena z namensko razvitimi tesnili: z radialnimi dinamičnimi tesnili na mestih z bati in radialno-aksialnim dinamičnim tesnilom na mestu z gredjo. Zaradi segrevanja in s tem ekspanzije mazalnega olja je v pogonskem delu črpalne enote nameščen tudi tako imenovani tlačni kompenzator, ki poleg kompenzacije ekspanzije olja zagotavlja, da je tlak v pogonskem in črpalnem delu (na sesalni strani) črpalne enote vseskozi izenačen. Slednje močno olajša pogoje tesnjenja.

Delovni oziroma tlačni gib bata je zagotovljen s potiskanjem (oscilacijo) nagibne plošče, na katero so bati le naslonjeni, povratni oziroma sesalni gib pa z vijačno vzmetjo, ki tudi skrbi, da je vrh bata v neprestanem kontaktu z nagibno ploščo. Potisk nagibne plošče se ob ustrezni geometriji ustvarja z vrtenjem gredi, ki ga zagotavlja elektromotor. Takšna zasnova zato zgolj ob menjavi gredi s ploščo z drugim nagibnim kotom zaradi spremembe dolžine hoda batov omogoča prilagoditev nazivne iztislile. Pri danih geometrijskih omejitvah je največji naklonski kot omejen na 16° (iztislina $28,6 \text{ cm}^3$). Če dejanska potreba po pretoku presega zmogljivosti ene črpalne enote, lahko to zagotovi sistem s kombinacijo zaporedno sestavljenih črpalnih enot. Ker je

Tabela 5 : Primer sestava črpalnih enot s prikazom skupnega pretoka (D-delujoča enota, R-redundantna oz. nedelujoča enota)

Črpalna enota št.	Kot naklonske plošče [°]	Iztislina črpalne enote [cm^3/obrat]	Primer 1 Stanje črpalne enote	Primer 2 Stanje črpalne enote	Primer 3 Stanje črpalne enote
1	16	28,6	D	R	D
2	16	28,6	D	R	R
3	16	28,6	R	R	R
4	10	17,9	D	R	R
5	10	17,9	R	R	R
6	6	10,7	D	R	D
7	6	10,7	R	R	R
8	4	7,1	D	D	R
9	4	7,1	R	R	R
Skupni pretok pri 1500 vrt/min [l/min]			140	10,6	58,9
Skupni pretok pri 1500 vrt/min [sodov na dan*]			1261	95	530

* 1 sod = 158,987 l

vsaka črpalna enota povezana na skupni sesalni in skupni tlačni vod, z vgrajenim potnim ventilom pa enoto lahko vklopimo ali izklopimo, je omogočena diskretna regulacija pretoka tudi brez regulacije hitrosti vrtenja gredi in hkrati tudi uporaba redundantnih črpalnih enot. Dodatno prilagodljivost sistema lahko dosežemo s kombinacijo črpalnih enot z različnimi koti naklonskih plošč. V *tabeli 5* so za primer predstavljene tri kombinacije s preračunanimi teoretičnimi črpalnimi zmogljivostmi sestava devetih črpalnih enot z različnimi koti naklonske plošče.

6 Zaključek

V članku je povzet razvoj nove črpalke za črpanje surove nafte z nizko viskoznostjo pri velikih tlačnih razlikah in visokih temperaturah. Glavna inovacija predstavljene črpalke temelji na razviti geometrijsko-tehnični rešitvi, ki z združevanjem večjega števila zaporedno vezanih črpalnih enot omogoča diskretno povečanje razpoložljivega volumskega pretoka (sicer princip vzporedne vezave). Rešitev je bila med potekanjem razvojnega postopka zaščitena z dvema ameriškima patentoma [10,11].

V članku so na kratko predstavljeni eksperimentalni rezultati, s katerim smo na osnovi zahtevanih obratovalnih pogojev pri snovanju koncepta preverili možnost uporabe konstrukcijskih rešitev standardnih hidravličnih črpalk za primer vodenja batov. Podani so razmisleki in ugotovitve glede zdržljivosti in obrabe črpalk ob povečani koncentraciji nečistoč in trdih abrazivnih delcev. Rezultati kažejo, da klasični principi, ki se uporabljajo za črpanje izredno čistega hidravličnega olja, v primeru črpanja nafte niso pri-



Slika 14 : Izdelani prototipi črpalk za testiranje v vrtinah

merni. Kot alternativo smo eksperimentalno preverili visokotlačno črpalno za črpanje vode. Nato so v splošnem prikazani še ključni razmisleki in izvedeni ukrepi, ki so pripeljali do končne delujoče in sprejemljive rešitve vodenja batov. Končna rešitev je tako nadgrajena kombinacija rešitev, poznanih iz visokotlačnih aksialnih batnih črpalk za črpanje vode in hidravličnih aksialnih batnih črpalk z nagibno ploščo.

Prva serija štirih polnofunkcionalnih prototipov črpalk, ki so bile razen posameznih specifičnih sestavnih delov (ležaji, tesnila ipd.) izdelani v Sloveniji (*slika 14*), je že bila testirana v naftni vrtini na globini 3000 m ob realnih pogojih uporabe. V črpalnem sestavu je trenutno po ena črpalna enota. Rezultati so zelo vzpodbudni, saj črpalna enota manjših težav deluje ustrezno in s pričakovanimi zmogljivostmi. Med testiranjem smo imeli še največ težav z nadziranjem parametrov črpalnišča (velike razdalje in slabo odziven kontrolni sistem) in nepričakovanimi specifičnimi lastnostmi posamezne vrtine, npr. akumuliranjem trdih delcev na izstopu iz črpalke, kjer se hitrost medija zaradi velikega premera produkcijske cevi močno zmanjša. V pripravi so tudi konstrukcijske rešitve, ki bodo odpravile tudi te pomanjkljivosti.

Viri

- [1] J. Parshall, Challenges, Opportunities Abound for Artificial Lift, *Journal of Petroleum Technology*, 65(03) 70-75, 2013. <https://doi.org/10.2118/0313-0070-JPT>.
- [2] S. Goswami, T. S. Chouhan, Artificial Lift to Boost Oil Production, *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 26, 1-5, 2015. <http://dx.doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V26P201>.
- [3] J. Presley, Artificial Lift: Adapting to Change, *Journal of Petroleum Technology*, 74(10), 22-26, 2022.
- [4] K. E. Patron, X. C. Billdal; H. Lu, D. Kutluev, D. Kimery, K. Gau, L. Diederichs, S. Fears, Artificial Lift Strategy for the Life Cycle of Unconventional Wells: A Case Study for Horizontal Shale Wells, *SPE Middle East Artificial Lift Conference and Exhibition, Bahrain*, 2018. <https://doi.org/10.2118/192458-MS>.
- [5] L. R. Heinze, Z. Ge, M. M. Rahma, Sucker-Rod-Pumping Failures in the Permian Basin, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston*, 1999. <https://doi.org/10.2118/0300 0044-JPT>.
- [6] J. Konieczny, W. Łatas, J. Stojek, Classification of Wear State for a Positive Displacement Pump Using Deep Machine Learning, *Energies*, 16(3) 1408, 2022. <https://doi.org/10.3390/en16031408>.
- [7] Spletni vir: L. A. Li, K. Kolmetz, A. Dwijayanti, Piping Hydraulics Fluid Flow Line Sizing and Material Selection - Rev. 5, *Kolmetz Handbook of Process Equipment Design*, KLM Technology Group, West Malaysia, 2018. <https://www.klmtechgroup.com/PDF/EDG->

EQU/ENGINEERING-DESIGN-GUIDELINES fluid-flow-Rev5.2web.pdf (Datum zadnjega obiska 25.5.2023).

- [8] Spletni vir: Mešanice prahu za naftno in plinsko industrijo. <https://www.powdertechologyinc.com/>. (Datum zadnjega obiska 25. 5. 2023.)
- [9] C. Wang, Y. Ye, X. Guan, J. Hu, Y. Wang, J. Li, An analysis of tribological performance on Cr/GLC film coupling with Si₃N₄, SiC, WC, Al₂O₃ and ZrO₂ in seawater, Tribology In-

ternational, 96 77-86, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2015.12.010>.

- [10] S. Oman, M. Nagode, J. Klemenc, F. Majdič, M. Hočevar, A. Gosar, A. Škrlec, L. Olah. Patent US10995745B1, Alexandria: United States Patent and Trademark Office, 2021.
- [11] S. Oman, M. Nagode, J. Klemenc, F. Majdič, M. Hočevar, A. Gosar, A. Škrlec, L. Olah. Patent US10883488B1, Alexandria: United States Patent and Trademark Office, 2021.

Development of a pumping unit for the artificial lift of crude oil from great depths

Abstract:

With the ability to drill to ever greater depths, new opportunities for oil production have emerged. It is estimated that currently more than 90% of all oil wells require artificial lifting. Currently, relatively old technologies are used for production, which have significant drawbacks that reduce oil companies' revenues. For this reason, major oil companies are investing in the development of new technologies to address the shortcomings. One of the major drawbacks is that a single existing technology is not capable of covering the production flows throughout the life of the well, which requires constant adjustment of the technology type to the downhole conditions, which is time consuming and very expensive. The paper demonstrates the development of a new pumping technology based on existing pumping principles, but with innovative design solutions that allow combining multiple pumping units in one pumping system. This ensures sufficient maximum flow, which can be regulated to practically zero. Due to the very demanding and specific conditions in the well, it was also necessary to find a number of technical solutions to solve partial functions. A number of prototypes have already been tested in wells at a depth of three thousand meters. The initial results are very encouraging, but the need for improvements and additions has already become clear.

Keywords:

pumps, crude oil, abrasive particles, artificial lift, pumping systems

**Zanesljiv partner
vaše proizvodnje**

OLMA
www.olma.si

Olma d.o.o., Poljska pot 2, 1000 Ljubljana,
tel.: (01) 58 73 600, faks: 54 63 200,
e-pošta: order@olma.si, <http://www.olma.si>

Quaker Houghton
MOTUL
tribo-chemie
setral
SLOVENOIL
STORM