

## POTVRDA VAŽNOSTI DST-A NA PRIMJERU ISPITIVANJA ISTRAŽNE BUŠOTINE

### EXPLORATION WELL TEST CASE HISTORY CONFIRMS IMPORTANCE OF DST

DARIO DAMJANIĆ

INA – Industrija nafte, d.d., Šubičeva 29, Zagreb, Hrvatska

**Ključne riječi:** ispitivanje ležišta u tijeku bušenja (DST), hidrodinamička ispitivanja ležišta (HDM), porast tlaka, ležišne karakteristike, zasićenje fluidima

**Key words:** drill stem testing (DST), well testing, pressure build-up, reservoir properties, fluid content

#### Sažetak

DST u istražnoj bušotini sastojao se od dva protočna uvjeta i dva porasta tlaka. Dobiven je plin. U sklopu HDM-a izvršeno je ispitivanje metodom modificiranog izokronalnog testa. Osim plina, koji je dobiven za vrijeme DST-a, na površinu su dobivene i male količine kondenzata, te tragovi nafte i vode. Rezultati interpretacije porasta tlaka obavljenog u sklopu DST-a pokazuju da se radi o ležištu slabe propusnosti, te da postoji oštećenje pribušotinske zone. Hidrodinamičkim mjerenjima u zacijevljenoj bušotini su potvrđeni rezultati DST-a i prošireno je saznanje o fluidima kojima je zasićeno ispitano ležište. Obavljena je kiselinaska obrada kojom je uklonjeno oštećenje, te je proizvodnja povećana višestruko. Podaci dobiveni ispitivanjem su važni za prognoziranje proizvodnih mogućnosti bušotine na dulji period, određivanje optimalne konstrukcije bušotine i izbora dubinske opreme proizvodnih bušotina. Podaci su također neophodni za projektiranje proizvodnih instalacija.

#### Abstract

Drill stem testing of the exploration well consisted of two flow and two pressure build-up periods. Gas was obtained. Modified isochronal test was used during testing the well after completion. Except gas, small quantity of condensate and traces of oil and water were obtained. Both pressure build-up analyses showed that formation permeability is low. DST pressure build-up analysis showed that wellbore damage is present. This was proved later, when acid treatment was performed, by which skin was removed and production increased significantly. Data obtained by well testing are very important for future productivity prediction and determination of optimal well completion and surface facility construction.

#### Uvod

Ispitivanja bušotina se izvode u cilju dobivanja podataka o zasićenju ležišta ugljikovodicima i o ležišnim karakteristikama ispitivanog ležišta.

DST (*drillstem test*) je kratkotrajno ispitivanje u fazi izrade bušotine (u nezacijevljenom dijelu) koje se izvodi u svrhu određivanja pozitivnosti određenog ležišta i svaki dodatni podatak dobiven takvim ispitivanjem može biti vrlo koristan. Za razliku od DST-a, hidrodinamička mjerenja (HDM) se obavljaju u zacijevljenom kanalu bušotine, te mjerenje nije vremenski ograničeno, no često je ograničeno novčanim sredstvima (Lee, 1982; Lee i Wattenbarger, 1996).

Dakle, ispitivanja se izvode u cilju dobivanja podataka o karakteristikama bušotina i ležišta. Hidrodinamička

mjerenja daju cjelovitiju sliku o budućem ležištu i smjernica su geolozima istraživačima pri usmjeravanju daljnjih istražnih zahvata, što je u ovom slučaju posebno važno budući da je ispitivana bušotina lokacijski smještena na području koje je u početnoj, istražnoj fazi.

Izrada bušotine iziskuje znatna materijalna sredstva, te samo sprema geofizičkih, geoloških i podataka dobivenih hidrodinamičkim mjerenjima može dati zadovoljavajući odgovor na pitanje što se postiže izradom neke bušotine i kako bi se dalje najracionalnije istraživala ležišta i projektirale nove bušotine. Ovim radom će biti prikazana važnost tih mjerenja, uz naglasak na mjerenja u zacijevljenom kanalu bušotine. Pokazat će se važnost izvođenja DST-a u fazi izrade bušotine za dobivanje saznanja o pozitivnosti bušotine, odnosno određenog ležišta. Prikazat će se i rezultati konkretnog DST-a na

primjeru jedne istražne bušotine. Točnost DST-a dokazati će se izvršenim hidrodinamičkim mjerenjima na istom ležištu koja su uslijedila po završetku izrade bušotine. Rezultati hidrodinamičkih mjerenja su potvrda rezultata dobivenih DST-om, uz prikaz dodatno dobivenih saznanja i podataka koja su uslijedila nakon obavljenih dugotrajnijih hidrodinamičkih mjerenja.

### Opis i analiza DST-a

Ispitivana bušotina je istražna i izrađena je tijekom 2008. godine u istočnom djelu istražnog bloka u Siriji. Iako je ispitivano nekoliko ležišta, ovim radom će biti prikazano samo ispitivanje jednog ležišta.

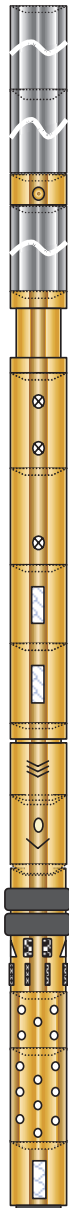
Kao što je već ranije rečeno DST podrazumijeva ispitivanje ležišta tijekom bušenja, dakle ispitivanje uz pomoć bušačeg alata. Detaljan prikaz alata za vrijeme izvođenja DST-a se nalazi na slici 1., a sastav alata korištenog za vrijeme HDM-a prikazan je u Tablici 1.

Svrha testiranja obavljenog na intervalu 1915-1883 m, u vršnom dijelu ležišta, bila je odrediti slojne karakteristike i prvenstveno vrstu fluida, odnosno zasićenja stijena nosioca, koje se po mineraloškom sastavu sastoje pretežito od dolomita, vapnenaca (20-40%) i lapora (do 5%). Po završetku izrade bušotine napravljena je analiza karotažnih mjerenja, čiji se rezultati mogu vidjeti u slici 2.

od ostalog dijela kanala bušotine. S obzirom na mjesto sjedišta pakera razlikujemo DST s pakerom u otvorenom kanalu i DST s pakerom u zaštitnim cijevima. Paker služi za eliminaciju anularnog tlaka stupca isplake na sloj, te se na taj način kolektor dovodi u vezu s tlakom u bušačim šipkama. Taj tlak je moguće podešavati u rasponu potrebne depresije na sloj i u pravilu je uvijek znatno manji od tlaka u sloju. Zbog razlike tlakova ležišni fluidi se pokreću prema bušotini, a poremećaj tlaka uzrokovan razlikom tlakova, odnosno depresijom na sloj se veoma brzo širi kroz ispitivani interval ležišta. Reakcija na depresiju je različita, ovisno o veličini depresije, svojstvima fluida u sloju, propusnosti sloja, dužini mjerenja, stanju kanala bušotine i dr. Za kontrolu depresije, kao i za zaštitu alata od prevelikog diferencijalnog tlaka koristi se stupac vode, isplake ili inertnog plina kojima se napune bušaće šipke u količini koja je određena zahtjevanom depresijom na sloj. Za zaštitu alata od prevelikog diferencijalnog tlaka uporebljava se voda ili isplaka, dok se za regulaciju depresije na sloj osim vode i isplake upotrebljava i dušik. Stupac dušika omogućava postupno povećanje depresije što je veoma povoljno iz više razloga. Nekontrolirana depresija na sloj može izazvati čepljenje dubinske sapnice, te se u tom slučaju testiranje mora ponoviti vađenjem dubinskog alata što je vrlo skup zahvat. Također, prevelika i nekontrolirana depresija može negativno djelovati i na ispitivano ležište (Lee, 1982; Alexander, 1976).

Tablica 1. Sastav alata kod testiranja zacijevljene bušotine  
Table 1 Bottom hole assembly during well testing

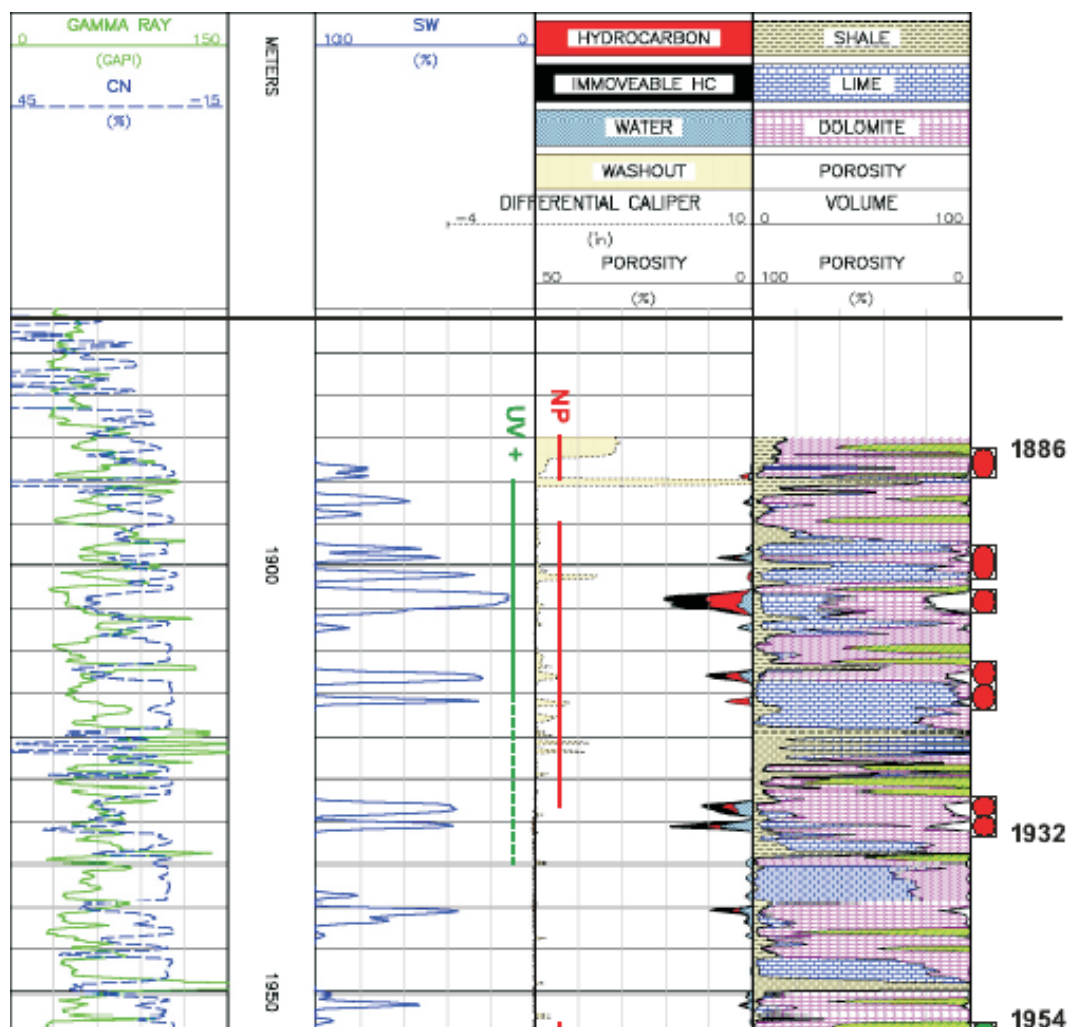
SASTAV OPREME U BUŠOTINI ZA VRIJEME HD TESTIRANJA				
Opis alata	Vanjski promjer	Unutarnji promjer	Dužina	.....
	[mm]	[mm]	[m]	[m]
<b>Vodilica 2 7/8"EUE</b>	<b>73.20</b>	<b>62.00</b>	<b>0.50</b>	<b>1865.00</b>
Elektronički pT instrument	121.00	62.00	3.49	1861.01
TUBING 2 7/8" EUE 6,5 # N-80	73.02	62.00	8.54	1852.47
Prijelaz za odlaganje "Otis X 2,313" 27/8"	82.00	58,75	0.30	1852.17
TUBING 2 7/8" EUE 6,5 # N-80 - perf.	73.02	62.00	9.30	1842.87
Prijelaz za odlaganje "Otis X 2,313" 27/8"	82.00	58,75	0.30	1842.57
Sigurnosna spojnica 27/8" EUE 6,5 # N-80 .	73.02	62.00	2.53	1840.04
<b>Paker Baker EA 7" 47 B2</b>	<b>151.50</b>	<b>62.00</b>	<b>1.90</b>	<b>1838.14</b>
Prijelaz (X/O)	88.90	60.00	0.31	1837.83
Prijelaz (X/O)	88.90	69.86	0.74	1837.09
TUBING 3 1/2" ABIJ 3SS 12.95# 1 kom	88.90	69.86	9.44	1827.65
Prijelaz (X/O)	88.90	69.86	0.94	1826.71
Klizna vrata 3 1/2" Halib. RD 2.562	122.00	65.07	1.24	1825.47
Prijelaz (X/O)	88.90	69.86	0.73	1824.74
TUBING 3 1/2" ABIJ 3SS 12.95# string	88.90	69.86		

SASTAV ALATA PRI IZVOĐENJU DST-a		Vanjski promjer	Unutarnji promjer	Dužina	Dubina
		( mm )	( mm )	( m )	( m )
	Bušaće šipke 5"	127,00	108,60	1744,07	
	Teške bušaće šipke 5"	127,00	76,20	81,68	
	Cirkulacijska spojnica	155,50	-	0,30	<b>1824,25</b>
	Teške bušaće šipke 5"	127,00	76,20	26,97	
	Prijelaz za odlaganje ( 4 1/2 IF x 4 IF )	155,50	72,80	0,72	
	Dubinska sapnica	155,50	-	1,40	1852,24
	Dubinski uzimač uzoraka	127,00	-	2,10	1853,64
	Tester ventil	127,00	-	1,50	1855,74
	Elektronički pT instrument	127,00	-	1,20	<b>1857,24</b>
	Elektronički pT instrument	127,00	-	1,20	<b>1858,44</b>
	Hidraulički udarač	127,00	-	1,50	
	Sigurnosna spojnica	127,00	-	0,80	
	RTTS paker za 9 5/8" zaštitnu kolonu	209,55	-	0,50 1,25	<b>1862,44</b>
	Perforirani anker	146,05 (5 3/4")	-	5,80	
Mehanički pT instrument			1,20	<b>1870,69</b>	
Anker peta	146,05 (5 3/4")	-	1,00	<b>1871,69</b>	
Stupac vode u bušaćem nizu ( m ):		<b>200</b>			
Tlak dušika na površini ( bar ):		<b>70</b>			
		<b>INTERVAL</b>	<b>od ( m )</b>	<b>do ( m )</b>	
		<b>( m )</b>	<b>1915,00</b>	<b>1883,00</b>	
		<b>32,00</b>			

Slika 1. Sastav alata kod DST-a  
 Figure 1 Downhole tools used during drillstem testing

Prilikom testiranja spomenutog intervala korišten je stupac vode i dušika, a paker je aktiviran u zaštitnim cijevima. Početna depresija na sloj je bila oko 30% od slojnog tlaka i ispitivano je 32 m otvorenog kanala bušotine. Test se sastojao od dva protočna uvjeta i dva

porasta tlaka. Po otvaranju tester ventila, dok je bušotina još bila zatvorena na ušću, tlak na ušću je porastao sa 70 bara na 73 bara unutar 4 minute. To je ukazivalo na dotok ugljikovodika iz sloja, što je i potvrđeno otvaranjem bušotine na ušću na sapnicu 9,52 mm.



Slika 2. Analiza karotažnih mjerenja na intervalu 1954 – 1886 m

Figure 2 Cased-hole Reservoir Analysis logs on interval 1954 – 1886 m

Naime, nakon što je dušik ispušten plin je počeo gorjeti, što se jasno moglo vidjeti na baklji (slika 3.).

Prvi protok završio je nakon sat vremena zatvaranjem bušotine na dnu preko tester ventila čime je počelo mjerenje prvog porasta tlaka u trajanju od 3 sata. Važno je bušotinu zatvoriti na dnu kako bi utjecaj naknadnog dotoka iz sloja u kanal bušotine, koji onemogućava pravilnu interpretaciju podataka, bio što manji. U drugom protoku, koji je trajao 10 sati, radi boljeg čišćenja bušotine sapnica je povećana na 12,7 mm. Količina dobivenog plina (12 000 m<sup>3</sup>/dan) je procjenjena prema nomogramima i računski na temelju mjerenih podataka tlaka i temperature na ušću. Dotok kapljive faze na površini nije zabilježen ni u prvom ni u drugom protočnom uvjetu. Uslijedio je završni porast tlaka u trajanju od 25 sati, na temelju kojeg je i napravljena analiza (Slika 4.) računalnim programom «Interpret 2005», tvrtke «Paradigm».

Matematički model korišten pri analizi porasta tlaka jest (Bourdet et al. 1984; Ehlig-Economides et al. 1990; Ehlig-Economides et al. 1994):

- bušotinski utjecaji: skladištenje u bušotini i skin efekt,
- ponašanje ležišta: radijalno složeno ležište,
- utjecaj granica: neograničeno ležište (unutar radijusa istraživanja)

Ulazni podatci korišteni pri analizi dani su kako sljedeći:

- protok plina,  $q_g = 12\,000$  m<sup>3</sup>/dan
- polumjer kanala bušotine,  $r_w = 10,795$  cm
- efektivna debljina sloja,  $h_e = 5,5$  m
- šupljikavost ležišne stijene,  $\phi = 0,1$
- zasićenje ležišta vodom,  $s_w = 20$  %
- srednji ležišni tlak,  $p_{sr} = 168,9$  bar
- ležišna temperatura,  $T = 60,6$  °C
- obujamski koeficijent plina,  $B_g = 0,005737$  m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>
- dinamička viskoznost plina,  $\mu_g = 0,01835$  mPa·s
- stlačivost ležišne stijene,  $c_f = 7,207 \cdot 10^{-5}$  bar<sup>-1</sup>
- ukupna stlačivost ležišta,  $c_t = 4,797 \cdot 10^{-3}$  bar<sup>-1</sup>



**Slika 3.** Plamen baklje prilikom ispitivanja bušotine  
**Figure 3** Flare burning on well during testing

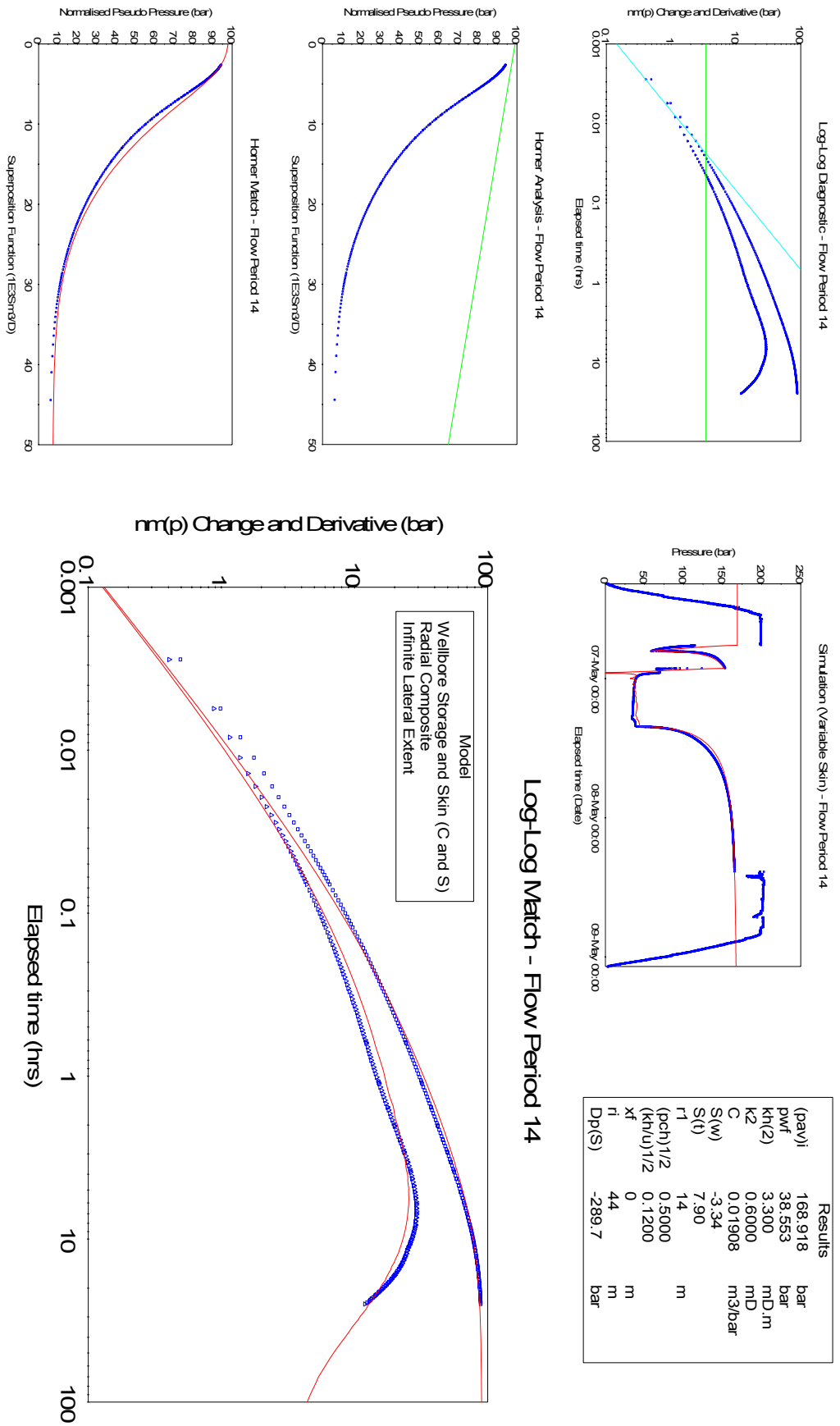
Po završetku porasta tlaka napravljena je indirektna (reversna) cirkulacija. Zadatak indirektna cirkulacije jest da istisne sve fluide iz bušačkih šipki, kako bi se daljnji radovi mogli nesmetano odvijati. Indirektnom cirkulacijom je dobivena samo isplaka i voda vodenog jastuka, bez nafte ili slojne vode, što je potvrđeno laboratorijskom analizom dobivenih uzoraka.

Testiranje je završeno vađenjem alata i instrumenata za mjerenje tlaka i temperature na dnu bušotine. Na temelju očitanih podataka (djelomično danih u Tablici 2.) napravljena je interpretacija kojom je procijenjen utok 0,5 m<sup>3</sup> kapljevine. S obzirom na oblik krivulje i na činjenicu da nije bilo dotoka nafte ili slojne vode na površinu može se zaključiti da se radi o isplaci koja je infiltrirana u ležište tijekom bušenja.

**Tablica 2.** Periodi testiranja u otvorenom kanalu bušotine (dubina elektroničkog instrumenta, 1857 m)  
**Table 2** DST periods (memory gauge at 1857 m)

Vrijeme (min)		Tlak (bar)		Temperatura (°C)
	IHP	199,09	IHT	56,7
61	IFP <sub>1</sub>	109,69	IFT <sub>1</sub>	56,8
	FFP <sub>1</sub>	58,58	FFT <sub>1</sub>	57,6
178	ICIP	153,42	ICIT	58,4
602	IFP <sub>2</sub>	82,06	IFT <sub>2</sub>	56,1
	FFP <sub>2</sub>	38,55	FFT <sub>2</sub>	57,7
1503	FCIP	165,25	FCIT	60,6
	FHP	197,58	FHT	60,3

- IHP - početni hidrostaticki tlak isplake
- IHT - početna hidrostaticka temperatura isplake
- IFP<sub>1</sub> - početni tlak prvog protoka
- IFT<sub>1</sub> - početna temperatura prvog protoka
- FFP<sub>1</sub> - završni tlak prvog protoka
- FFT<sub>1</sub> - završna temperatura prvog protoka
- ICIP - prvi staticki tlak
- ICIT - prva staticka temperatura
- IFP<sub>2</sub> - početni tlak drugog protoka
- IFT<sub>2</sub> - početna temperatura drugog protoka
- FFP<sub>2</sub> - završni tlak drugog protoka
- FFT<sub>2</sub> - završna temperatura drugog protoka
- FCIP - završni staticki tlak
- FCIT - završna staticka temperatura
- FHP - završni hidrostaticki tlak isplake (tlak isplake nakon testiranja)
- FHT - završna hidrostaticka temperatura



Sljka 4. Rezultati analize porasta tlaka izmjenenog za vrijeme DST-a  
 Figure 4 DST pressure build-up analysis results

### Opis i analiza hidrodinamičkih mjerenja

Na temelju analize karotažnih mjerenja i podataka izmjerenih na jezgrama, te rezultata dobivenih DST-om bušotina je zacijevljena, a ležište otvoreno na intervalu 1959-1886 m, te je ispitano uz primjenu hidrodinamičkih mjerenja. Cilj hidrodinamičkih mjerenja bio je potvrditi rezultate dobivene DST-om, dakle utvrditi ležišne karakteristike i dobiti dodatna saznanja o proizvodnim sposobnostima bušotine, odnosno ispitivanih intervala ležišta.

Hidrodinamička ispitivanja se sastoje od izazivanja pritjecanja fluida u kanal bušotine te mjerenja posljedica koje taj utok ostavlja na ponašanje tlaka. U tom slučaju, promjena tlaka je, po definiciji, odziv kontinuma (fluida u poroznoj sredini) na vanjsko djelovanje (izazivanje utoka u bušotinu). Da bi ugljikovodici dotekli u bušotinu potrebno je propucati interesantne intervale zacijevljenog dijela ležišta, što je u konkretnoj bušotini učinjeno na slijedećim intervalima: 1959-1954 m, 1932-1928 m, 1917-1911 m, 1906-1903 m, 1902-1898 m i 1890-1886 m. Uslijedilo je čišćenje ležišta (clean-up phase) na različite sapnice, čija je svrha očistiti pribušotinsku zonu i kanal bušotine

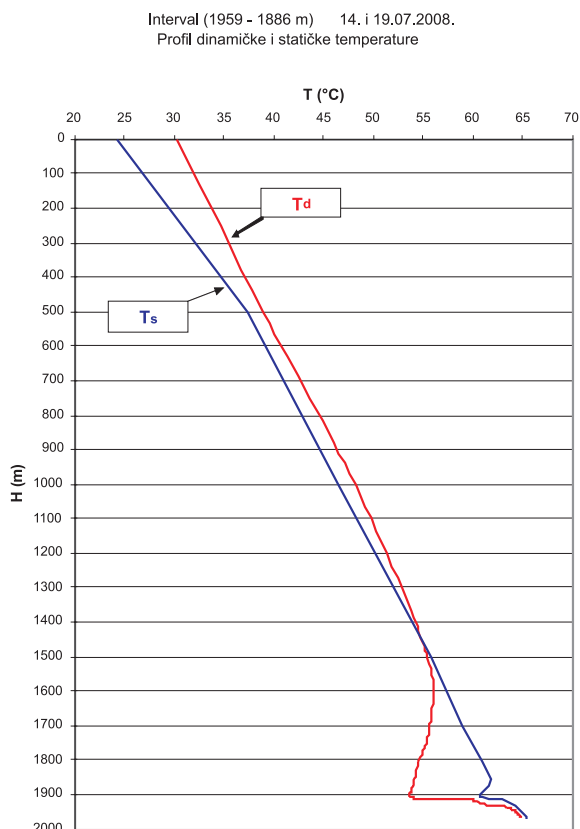
od isplake korištene tijekom bušenja i produkata nastalih za vrijeme propucavanja. Nakon toga je kao posljedica rezultata (pozitivanskin) dobivenih interpretacijom porasta tlaka za vrijeme DST-a, tj. zbog oštećenja pribušotinske zone, obavljena kiselinska obrada otvorenih intervala. Po završetku kiselinske obrade izvršeno je liftiranje bušotine u svrhu osvajanja i ponovnog čišćenja ležišta, ovog puta od produkata upravo obavljene kiselinske obrade. U početnoj fazi za čišćenje ležišta korištena je sapnica 15,9 mm, a nakon čišćenja priključen je visokotlačni separator u cilju mjerenja proizvedenih količina ugljikovodika. Podatci o manjoj proizvodnji na sapnicu 12,7 mm ukazuju na to da bušotina vjerojatno još nije u potpunosti očišćena (Tablica 3.). Istovremeno je započelo i mjerenje dinamičkog gradijenta tlaka i temperature (Slika 5., 6., 7.), a nakon što je instrument spušten na dubinu mjerenja 1886 m (vrh perforacija) nastavljeno je s mjerenjem dinamičkog tlaka i temperature. Za sva daljnja mjerenja temperature i tlaka, i u statičkim i u dinamičkim uvjetima dubina mjerenja ostala je ista, u vrhu perforacija. Nakon faze čišćenja bušotina je zatvorena za mjerenje porasta tlaka u trajanju od 24 sata kako bi se dobila vrijednost početnog slojnog tlaka.

**Tablica 3.** Rezultati hidrodinamičkih mjerenja (1959-1886 m)  
*Table 3 Well testing results (1959-1886 m)*

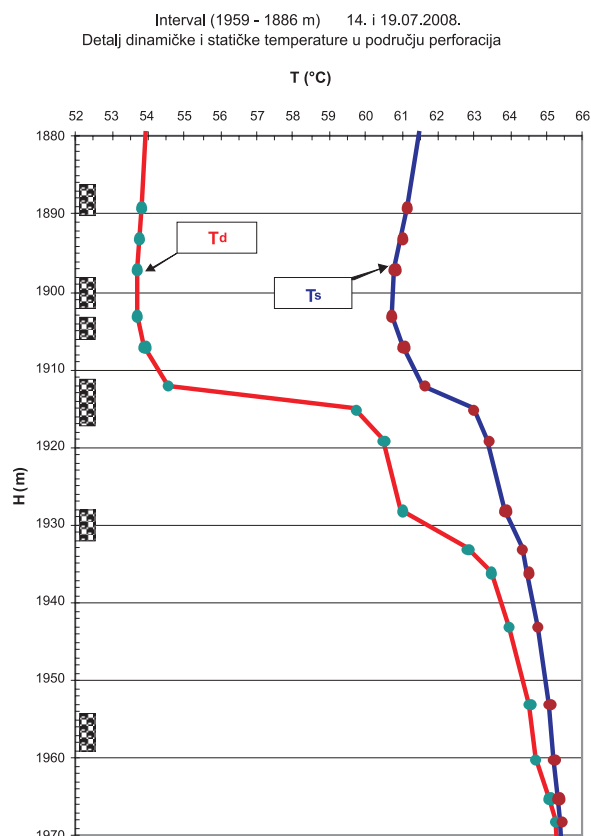
Datum i vrijeme		Veličina sapnice mm	Trajanje perioda sati	Q <sub>plin</sub> m <sup>3</sup> /dan	Q <sub>kond.</sub> m <sup>3</sup> /dan	Q <sub>voda</sub> m <sup>3</sup> /dan	CGR cm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	Tlak na ušću			Tlak @1886 m		Temp @ 1886 m		Napomena
od	do							Statički bar	Dinamički bar	Dinamička °C	Statički bar	Dinamički bar	Statička °C	Dinamička °C	
12.07. 21 <sup>00</sup>	14.07. 12 <sup>00</sup>	15,88	39	76.741	0.109	0.649	1.42		33,05	34,84		49,43		53,32	čišćenje bušotine
14.07. 12 <sup>00</sup>	15.07. 12 <sup>00</sup>	-	24	-	-	-	-	119,91				143,27		60,53	porast tlaka
15.07. 12 <sup>00</sup>	15.07. 20 <sup>00</sup>	5,56	8	43.661	0.085	0.000	1.95		98,21	30,32		117,45		59,89	I protočni uvjet I porast tlaka II protočni uvjet II porast tlaka III protočni uvjet završni porast tlaka
15.07. 20 <sup>00</sup>	16.07. 04 <sup>00</sup>	-	8	-	-	-	-	119,21				142,87		61,11	
16.07. 04 <sup>00</sup>	16.07. 12 <sup>00</sup>	9,525	8	82.573	0.289	0.076	3.50		58,74	34,78		76,53		56,73	
16.07. 12 <sup>00</sup>	16.07. 20 <sup>00</sup>	-	8	-	-	-	-	113,77				136,04		60,56	
16.07. 20 <sup>00</sup>	17.07. 20 <sup>00</sup>	12,7	24	69.581	0.205	1.313	2.95		32,90	31,90		47,54		53,71	
17.07. 20 <sup>00</sup>	19.07. 20 <sup>00</sup>	-	48	-	-	-	-	120,94				144,48		61,18	
19.07. 20 <sup>00</sup>	20.07. 08 <sup>00</sup>	-	12	Mjerenje statičkog gradijenta tlaka i temperature i demontaža opreme korištene za navedena mjerenja											

Uslijedilo je mjerenje po metodi modificiranog izokronalnog testa (Lee, 1982; Lee et al. 1996). Izokronalni testovi obično se provode pri ispitivanju slabo propusnih ležišta, kao što je primjerice naše ispitivano ležište. Princip mjerenja je takav da se između svakog protoka jednakog trajanja, bušotina zatvara za porast tlaka. Ako porast tlaka traje isto tako dugo kao i protok, onda govorimo o modificiranoj izokronalnoj metodi, a upravo ta metoda je primjenjena tijekom hidrodinamičkih ispitivanja perforiranih intervala. Na taj način se dobivaju podaci o proizvodnosti uvijek istog područja crpljenja. Zadnji protok se obično produlji s ciljem da se postigne što bolja stabilizacija tlaka, a time i realniji podaci za izračun indeks proizvodnosti ispitivanog ležišta. Tako

dobiveni podaci su važni za prognoziranje proizvodnih mogućnosti bušotine na dužji period, određivanje optimalne konstrukcije bušotine i izbora dubinske opreme. Podaci su također neophodni za projektiranje nadzemne proizvodne opreme. Takvi testovi se obvezno provode na prvoj bušotini koja je otkrila ležište, a ponavljaju se i na ostalim istražnim bušotinama, ako se prethodno utvrdi da su one bitno različitih svojstava od već izmjerenih. Pošto se plin pri mjerenju spaljuje, treba voditi brigu o trajanju pojedinih protočnih uvjeta. Slabije propusna ležišta zahtijevaju, (razumije se), više vremena za stabilizaciju protočnog uvjeta, te točnost podataka ovisi direktno o raspoloživom vremenu, odnosno raspoloživim novčanim sredstvima, za mjerenje.



Slika 5. Profil statičke i dinamičke temperature  
Figure 5 Flowing and static temperature profiles



Slika 6. Detalj statičke i dinamičke temperature u području perforacija  
Figure 6 Flowing and static temperature profiles in detail

Točnost interpretacije svih navedenih testova ovisi o poznavanju svojstava ležišnog fluida. Uzorkovanje svih proizvedenih fluida, posebno na novoj bušotini na nekom ležištu, treba posvetiti maksimalnu pozornost. Ako je prisutna i kapljevita faza, kao u našem primjeru, potrebno je izvršiti uzorkovanje objiju faza i na osnovi rekombinirane pVT analize konstruirati p-T dijagram ležišnog fluida i utvrditi krivulju rosišta. Postavljanjem u odnos početnog tlaka, temperature i krivulje rosišta određuje se vrsta ležišta, tj. da li se radi o ležištu mokrog plina ili o plinsko kondenzatnom ležištu. U prvom slučaju, tijekom iskorištavanja ležišta neće dolaziti do izmjene sastava plina, no u slučaju plinsko kondenzatnog ležišta uzorkovanje treba obaviti tako da dinamički tlak na dnu bušotine bude što viši i unutar jednofaznog područja. Kada ležišni tlak padne u dvofazno područje, uzorkovanja više nisu valjana. Dakle, potrebno je sve poduzeti da uzorci budu reprezentativni, te da se upoznaju i zabilježe uvjeti pod kojim su uzeti. Na osnovi analize sastava bušotinskog fluida izračunavaju se sve ostale karakteristike plina u funkciji tlaka i temperature, kao što su viskoznost, stlačivost i dr. Ako su u sastavu prisutne neugljikovodične komponente, kao  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  ili  $\text{N}_2$ , potrebno je izvršiti korekcije pri proračunu ponašanja njihove smjese.

Izvedeni modificirani izokronalni test na intervalu 1959-1886 m sastojao se od tri protočna uvjeta (sapnice 5,5 mm, 9,5 mm i 12,7 mm) i, naravno, tri porasta tlaka. Prva dva protočna uvjeta i porasta tlaka su trajala po 8 sati dok je zadnji protok trajao 24 sata, a porast 48 sati. Zadnji porast tlaka je analiziran računalnim programom «Interpret 2005», tvrtke «Paradigm» (Slika 12.).

Korišten je isti model kao i pri analizi porasta tlaka za vrijeme DST-a:

- bušotinski utjecaji: skladištenje u bušotini i skin efekt,
- ponašanje ležišta: radijalno složeno ležište,
- utjecaj granica: neograničeno ležište (unutar radijusa istraživanja)

Ulazni podaci korišteni pri analizi porasta tlaka u sklopu modificiranog izokronalnog testa su prikazani kako slijedi (podaci o proizvodnji mogu se vidjeti u tablici 4.):

- polumjer kanala bušotine,  $r_w = 10,795$  cm
- efektivna debljina sloja,  $h_e = 7,3$  m
- šupljikavost ležišne stijene,  $\phi = 0,054$
- zasićenje ležišta vodom,  $s_w = 50$  %
- srednji ležišni tlak,  $p_{sr} = 183,5$  bar
- ležišna temperatura,  $T = 61,0$  °C
- objamski koeficijent nafte,  $B_o = 1,950$  m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>



- obujamski koeficijent plina,  $B_g = 0,005248 \text{ m}^3/\text{m}^3$
- obujamski koeficijent vode,  $B_w = 1,008 \text{ m}^3/\text{m}^3$
- dinamička viskoznost nafte,  $\mu_o = 0,1484 \text{ mPa}\cdot\text{s}$
- dinamička viskoznost plina,  $\mu_g = 0,01954 \text{ mPa}\cdot\text{s}$
- dinamička viskoznost vode,  $\mu_w = 0,6914 \text{ mPa}\cdot\text{s}$
- stlačivost nafte,  $c_o = 5,191 \cdot 10^{-4} \text{ bar}^{-1}$
- stlačivost plina,  $c_g = 5,104 \cdot 10^{-3} \text{ bar}^{-1}$
- stlačivost vode,  $c_w = 4,806 \cdot 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$
- stlačivost ležišne stijene,  $c_f = 9,388 \cdot 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$
- ukupna stlačivost ležišta,  $c_t = 2,670 \cdot 10^{-3} \text{ bar}^{-1}$
- relativna gustoća plina (zrak=1),  $\gamma_g = 0,679$
- gustoća nafte,  $\rho_o = 731 \text{ kg}/\text{m}^3$
- salinitet vode, = 185,46 g NaCl/dm<sup>3</sup>

anomalija pothlađenja u intervalu 1932-1886 m kao posljedica proizvodnje plina. Dinamička temperatura nam potvrđuje zaključke dobivene mjerenjem statičke temperature i pokazuje početak utoka plina na dubini 1932 m uz dodatni utok plina na dubini 1917 m.

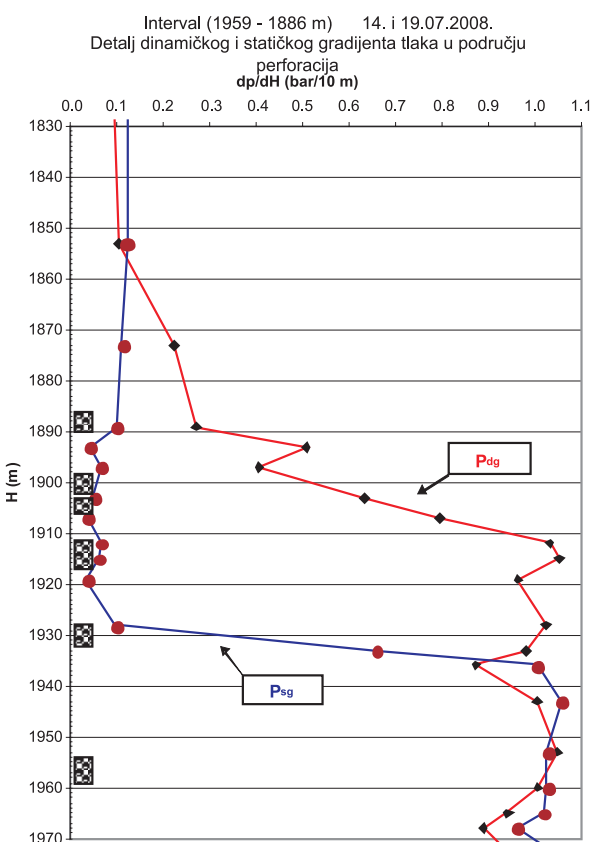
### Rezultati analize

Tijekom testiranja (DST) i hidrodinamičkih mjerenja (HDM) vrijednosti tlaka i temperature su snimane mehaničkim i elektroničkim instrumentima (*memory gauge*) na dnu i ušću bušotine (Slike 9., 10., 11., 12., 13., 14.). Za vrijeme izvođenja hidrodinamičkih mjerenja bilo je moguće istovremeno opažati tlakove na ušću i dnu bušotine, budući da je za mjerenje korišten tzv. instrument sa površinskim očitanjem tlakova (*SRO-surface read out*). Važno je istovremeno opažati tlakove na ušću i dnu bušotine kako bi se točnije utvrdila priroda i trajanje tzv. bušotinskih efekata, tj. efekata punjenja bušotine. U bušotinske efekte ubrajaju se i efekti čišćenja bušotine prilikom osvajanja bušotine. To je osobito bitno, jer je po otvaranju bušotine ponašanje tlaka kaotično i nepravilno. Bušotinski efekti ovise također i o ugrađenoj opremi.

Svi detaljni rezultati mjerenja i popratni dijagrami priloženi su kao tablice i slike, a ovdje su ukratko prikazani i opisani najvažniji rezultati analiza obaju porasta tlaka.

### Rezultati analize porasta tlaka DST-a:

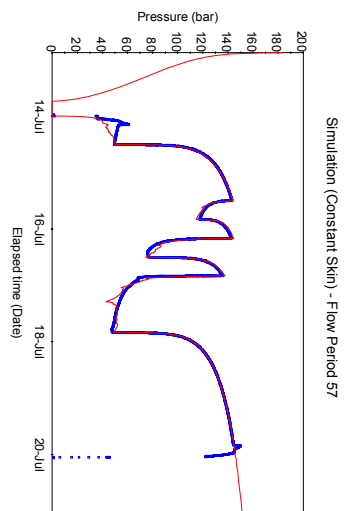
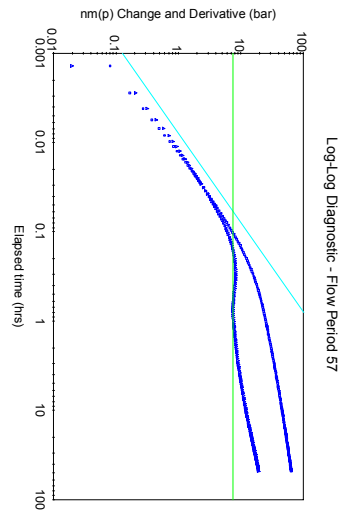
- početni ležišni tlak,  $p_{avi} = 168,918 \text{ bar}$
- završni dinamički tlak,  $p_{wf} = 38,553 \text{ bar}$
- ukupna razlika tlaka,  $\Delta p = 130,365 \text{ bar}$
- vodljivost vanjske zone ležišta,  $kh_{(2)} = 3,3 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$
- propusnost vanjske zone ležišta,  $k_{(2)} = 0,6 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$
- skladištivost u bušotini,  $C = 0,01908 \text{ m}^3/\text{bar}$
- bušotinski skin faktor,  $s_{(w)} = -3,34$
- ukupni efektivni skin faktor,  $s_{(v)} = 7,90$
- polumjer promjene kolektorskih svojstava,  $r_i = 14 \text{ m}$
- omjer pohranjivosti,  $(\phi ch)_{1/2} = 0,5$
- omjer pokretljivosti,  $(kh/\mu)_{1/2} = 0,12$
- približni polumjer istraživanja,  $r_i = 44 \text{ m}$



Slika 7. Detalj statičkog i dinamičkog gradijenta tlaka u području perforacija

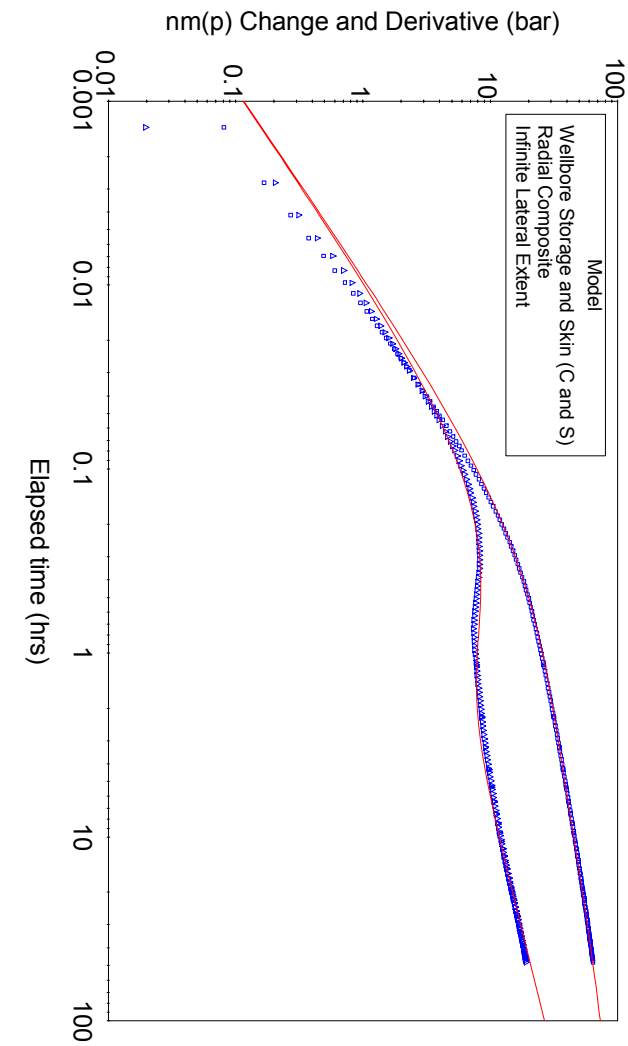
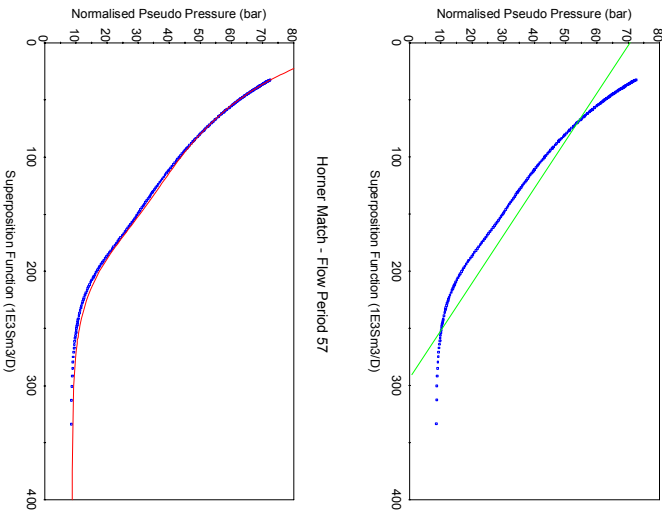
Figure 7 Flowing and static pressure gradient in detail

Važno je napomenuti da tijekom čitavog trajanja testa nije bilo stabilizacije niti tlaka niti proizvodnje. Pregledni proizvodni rezultati hidrodinamičkih mjerenja dobiveni metodom modificiranog izokronalnog testa sumarno su prikazani u Tablici 4. Po završetku posljednjeg porasta tlaka izvršeno je mjerenje statičkog gradijenta tlaka i temperature (Slika 5., 6., 7.). Navedenim mjerenjima iz statičke temperature vidi se da nema anomalija temperature u intervalu 1954-1959 m, a prisutna je temperaturna



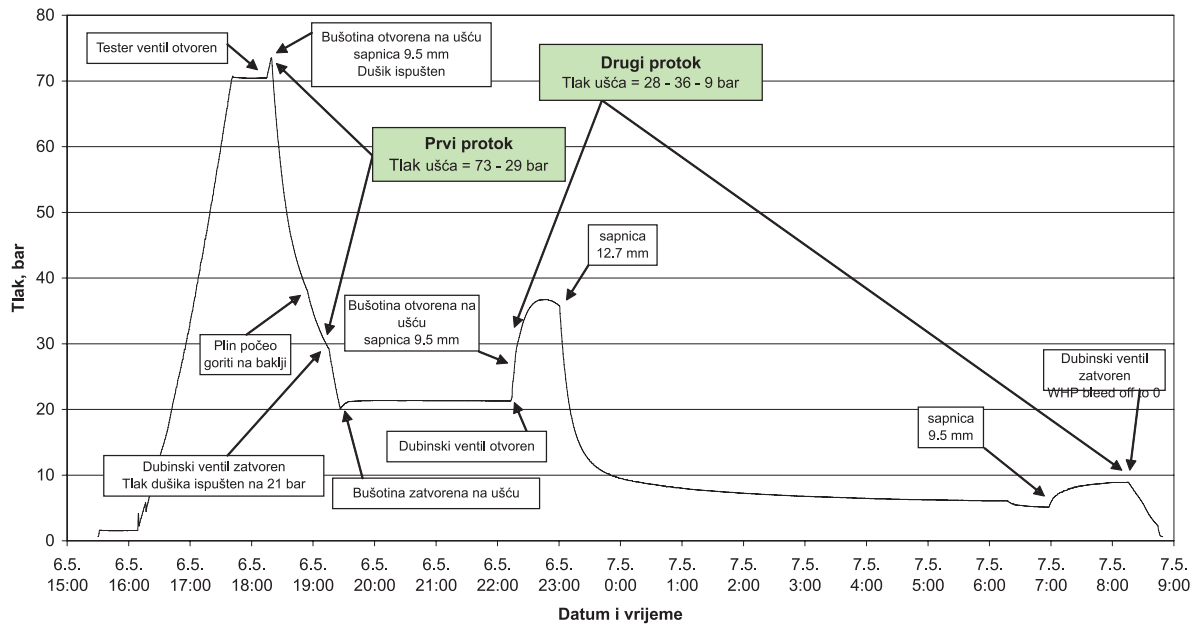
Results	
(pav) <sub>i</sub>	183.500 bar
pwf	47.478 bar
kh(1)	9.125 mD.m
k <sub>1</sub>	1.250
C	0.1226 m3/bar
S(w)	-3.16
S(t)	-4.75
r <sub>1</sub>	14 m
(poch) <sub>1/2</sub>	0.02683
(kh/u) <sub>1/2</sub>	14.68
h <sub>i</sub>	156 m
Dp(s)	-149.2 bar

Log-Log Match - Flow Period 57



SIhka 8. Rezultati analize porasta tlaka izmjenjenog tijekom HDM-a  
 Figure 8 Pressure Build-up Analysis Results of the cased-hole well test

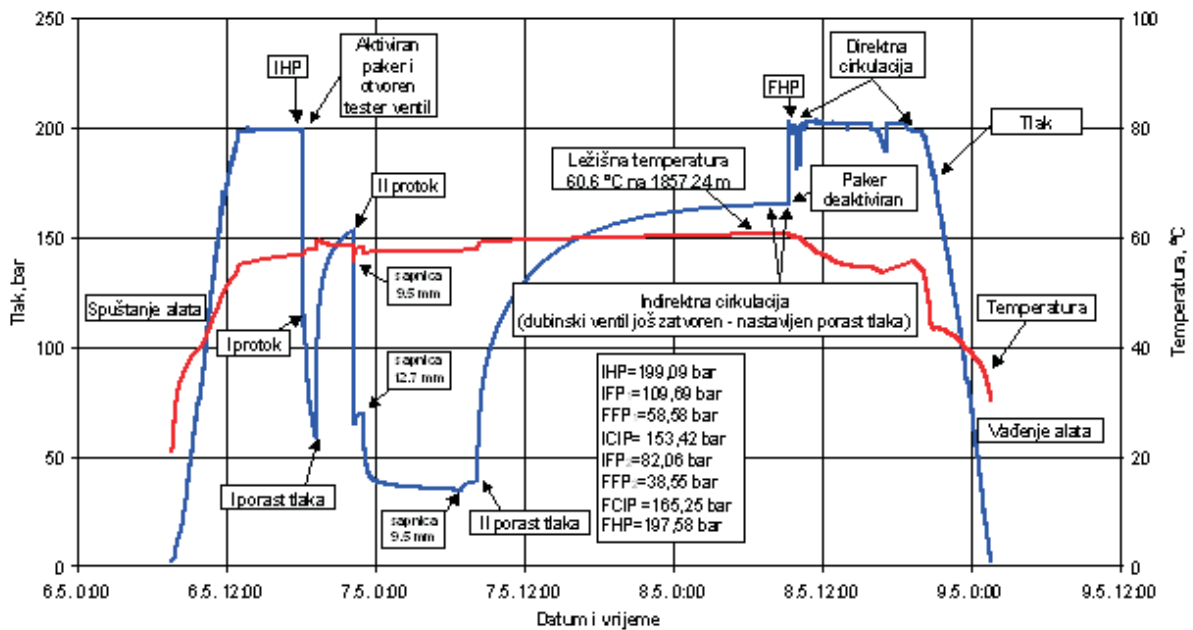
DST-2 Tlak na ušću 06-07.05.2008.  
 Otvoreni kanal (OH) 1883-1915 m



Slika 9. Tlak na ušću za vrijeme DST-a

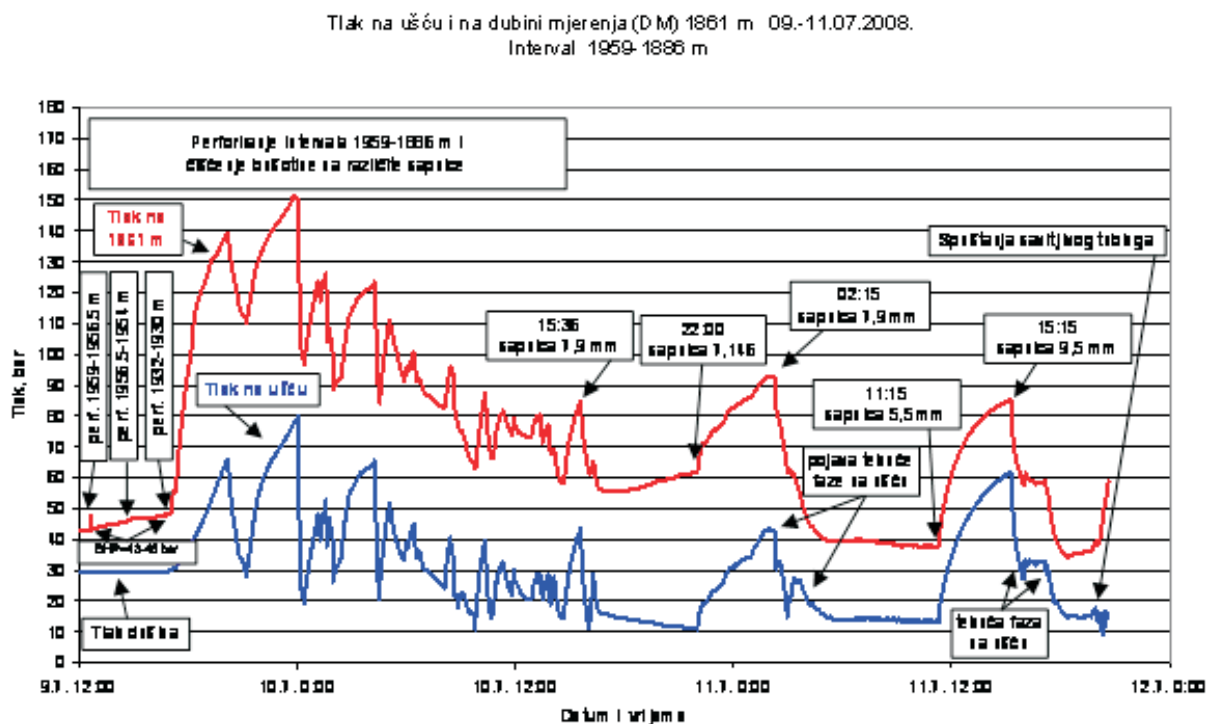
Figure 9 Surface pressure behavior during DST

DST-2 06.-09.05.2008. Dubina mjerenja DM=1857,24 m  
 Otvoreni kanal (OH) 1883-1915 m

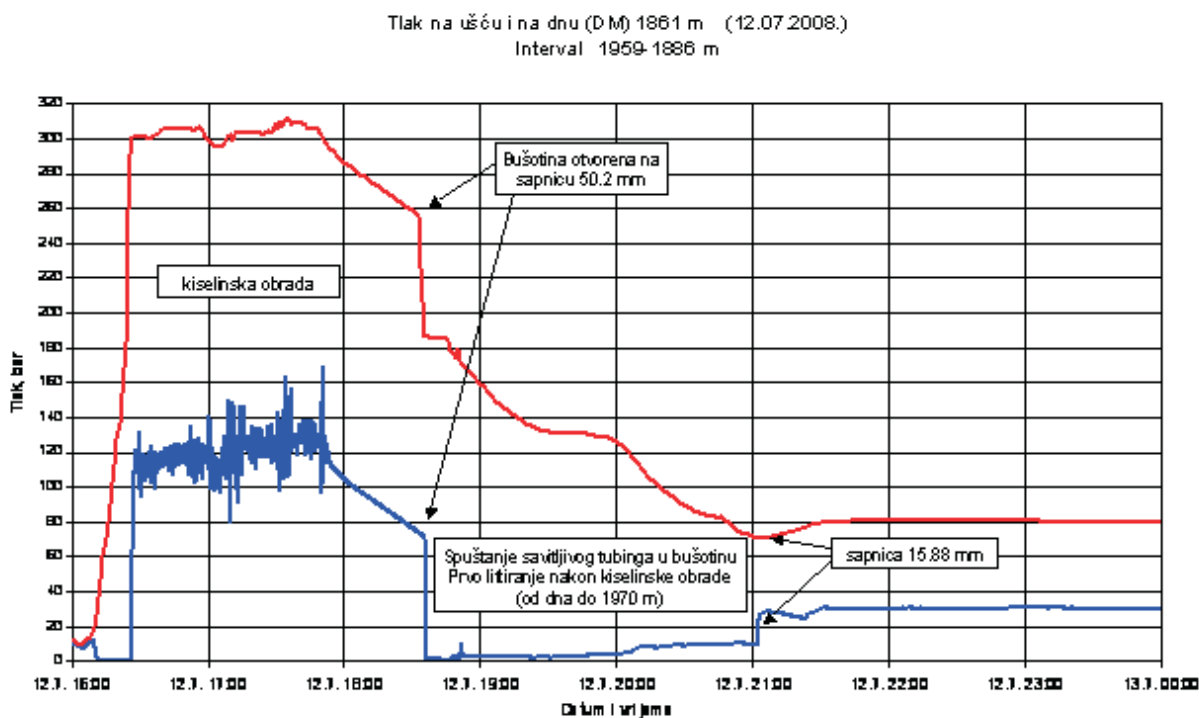


Slika 10. Tlak i temperatura na dubini mjerenja za vrijeme DST-a

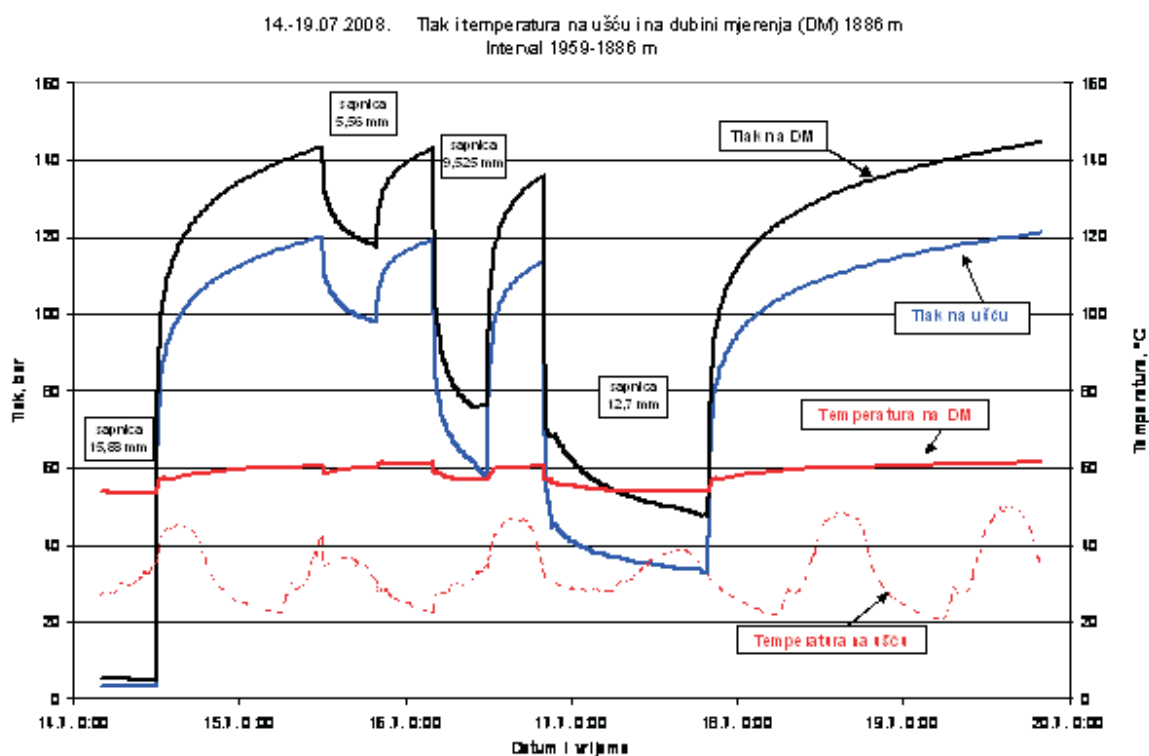
Figure 10 Pressure and temperature behavior at 1857,24 m during DST



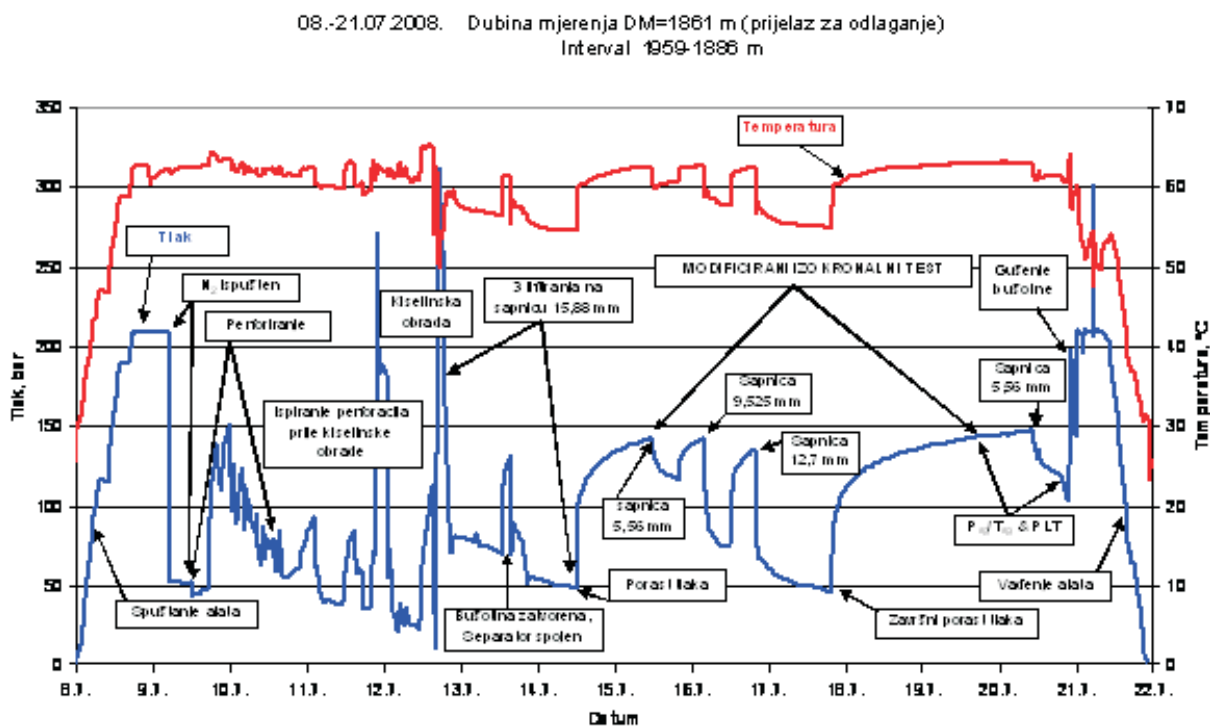
Slika 11. Tlak na ušću i dnu za vrijeme perforiranja, čišćenja i ispitivanja bušotine  
Figure 11 Surface and bottomhole pressure behavior during perforating, cleaning up and testing the well



Slika 12. Tlak na ušću i dnu bušotine za vrijeme kiselinske obrade  
Figure 12 Surface and bottomhole treating pressure during acid job



Slika 13. Tlak i temperatura na ušću i dnu bušotine tijekom modificiranog izokronalnog testa  
 Figure 13 Pressure and temperature at surface and bottomhole during modified isochronal test



Slika 14. Tlak i temperatura na dubini 1861 m za vrijeme opremanja i ispitivanja bušotine  
 Figure 14 Pressure and temperature at 1861 m during completion and testing the well

Dobivena vrijednost slojnog tlaka odnosi se na dubinu mjerenja 1857 m, uz napomenu da se sve vrijednosti parametara dobivene ovom interpretacijom moraju smatrati procjenom zbog dužine trajanja DST-a i nepostignute stabilizacije tlaka. Eventualne pogreške proizlaze iz neodgovarajućih uvjeta koji su vladali u bušotini tijekom mjerenja. Također, u slabo propusnim ležištima nedovoljno dugo mjerenje ne daje dovoljno podataka za pravilnu ekstrapolaciju prilikom upotrebe Hornerove metode prikazivanja promjene tlaka s vremenom. Početni tlak u novom ležištu je ekstrapolirani tlak. Što se tiče ležišne temperature, važno je napomenuti da mjerenja temperature pokazuju katkad manje vrijednosti od očekivanih. Razlog je u hlađenju zone mjerenja zbog ekspanzije plina kroz perforacije (Joule-Thomsonov efekt).

Precizniji podaci dobiveni su hidrodinamičkim mjerenjima (dubina mjerenja 1886 m).

Rezultati analize porasta tlaka HDM-a:

- početni ležišni tlak,  $p_{avi} = 183,5$  bar
- završni dinamički tlak,  $p_{wf} = 47,478$  bar
- ukupna razlika tlaka,  $\Delta p = 136,022$  bar
- vodljivost vanjske zone ležišta,  $kh_{(2)} = 9,125 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2 \times \text{m}$
- propusnost vanjske zone ležišta,  $k_{(2)} = 1,25 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$
- skladištivost u bušotini,  $C = 0,1226 \text{ m}^3/\text{bar}$
- bušotinski skin faktor,  $s_{(w)} = -3,16$
- ukupni efektivni skin faktor,  $s_{(t)} = -4,75$
- polumjer promjene kolektorskih svojstava,  $r_1 = 14$  m
- omjer pohranjivosti,  $(\phi ch)_{1/2} = 0,02683$
- omjer pokretljivosti,  $(kh/\mu)_{1/2} = 14,68$
- približni polumjer istraživanja,  $r_i = 156$  m

### Diskusija rezultata analize

Mjerenje porasta tlaka je sigurno najčešće korištena metoda za utvrđivanje svojstava ležišta, te za utvrđivanje oštećenja pribušotinske zone.

**Tablica 4.** Rezultati analize porasta tlaka DST-a

**Table 4.** DST pressure build-up analysis results

$p_{avi}$	-	početni srednji slojni tlak	168,918 bar
$p_{wf}$	-	završni dinamički tlak	38,553 bar
$\Delta p$	-	ukupna razlika tlaka	130,365 bar
$kh_{(2)}$	-	provodljivost vanjske zone	3,3 $10^{-3} \mu\text{m}^2 \times \text{m}$
$k_{(2)}$	-	propusnost vanjske zone	0,6 $10^{-3} \mu\text{m}^2$
$C$	-	skladištivost u bušotini	0,01908 $\text{m}^3/\text{bar}$
$s_{(w)}$	-	bušotinsko oštećenje	-3,34
$s_{(t)}$	-	ukupno efektivno oštećenje	7,90
$r_1$	-	polumjer promjene kolektorskih svojstava	14 m
$(\phi ch)_{1/2}$	-	složeni odnos pohranjivosti	0,5
$(kh/\mu)_{1/2}$	-	odnos pokretljivosti	0,12
$r_i$	-	približni polumjer istraživanja	44 m

Točnost podataka koji se mogu dobiti interpretacijom porasta tlaka, ovisna je uglavnom o točnosti i trajanju mjerenja protoka koji prethodi porastu, točnosti opreme za mjerenje tlaka korištene u testu, te metodici korištenoj u interpretaciji, heterogenosti kolektora i dr.

Svi matematički izrazi pomoću kojih se opisuje protok plina u poroznoj sredini i izvodi analiza ispitivanja u većoj ili manjoj mjeri su pojednostavljena analitička rješenja jednadžbe difuzije, tj. jednadžbe koja opisuje tok mase u poroznoj sredini. Rješenja su, među ostalim, ovisna o geometriji ležišta i rubnim uvjetima; izvedena su tako da se mogu primjeniti za izračunavanje određenih parametara porozne sredine i fluida u njoj.

Da bi se formulirao i najjednostavniji matematički model, polazi se od pretpostavke koja se koristi u teoriji protoka fluida u poroznoj sredini (homogena izotropna sredina u kojoj se protok odvija prema Darcyjevom zakonu). Tako, na primjer, sustav ima kružnu geometriju, a sastoji se od porozne sredine s homogenim i izotropnim svojstvima, fluid je plin, a protok horizontalan i jednofazan, gradijenti tlaka su mali, a protjecanje se, uvjetno rečeno, odvija po Darcyjevom zakonu.

Rezultati interpretacije porasta tlaka obavljenog DST-om ukazuju da se radi o ležištu slabe propusnosti, te da postoji oštećenje pribušotinske zone. Prema log-log dijagramu može se zaključiti da se radi o složenom ležištu koje karakteriziraju dvije radijalne zone unutar radijusa istraživanja. Stabilizacija unutrašnje zone je određena prema maksimumu derivacijske krivulje. Stabilizacija vanjske zone nije dosegnuta za vrijeme testiranja, te je pretpostavljena prema obliku derivacijske krivulje. Polumjer promjene kolektorskih svojstava između vanjske i unutarnje zone je vidljiv na udaljenosti 14 m od kanala bušotine. To ukazuje na vjerojatnost da je unutarnja zona osim plinom i vezanom vodom zasićena i filtratom bušačeg fluida koji smanjuje efektivnu propusnost stijene za plin. Granice ležišta ovim testiranjem nisu dosegnute. Podaci dobiveni interpretacijom prikazani su u Tablici 4.

Unatoč činjenici da je kromatografska analiza plina pokazala da je ispitivanjem dobiven naftni plin na površini, ne postoje indikacije o dotoku nafte iz sloja. Uvažavajući sve navedeno rezultati DST-a ukazuju da je testirani interval zasićen plinom.

HD mjerenjima je prošireno saznanje o fluidima kojima je zasićeno ležište jer su uz plin, dobiveni i kondenzat, te tragovi nafte i vode (Tablica 5. 6. i 7.). Rezultati interpretacije porasta tlaka obavljenog u sklopu HD mjerenja prikazani su u Tablici 8., a dobiveni su gotovo identični rezultati kao pri interpretaciji porasta tlaka obavljenog u sklopu DST-a. Značajnije razlike se mogu vidjeti u vrijednosti početnog slojnog tlaka i skina (otklonjeno oštećenje kao posljedica obavljene kiselinske obrade). Razlika u dobivenim vrijednostima slojnog tlaka pri DST-u i HDM-u posljedica je uvjeta koji su vladali u bušotini tijekom mjerenja (izostanak stabilizacije tlaka i proizvodnje). Također, u slabo propusnim ležištima nedovoljno dugo mjerenje ne daje dovoljno podataka za pravilnu ekstrapolaciju prilikom upotrebe Hornerove metode prikazivanja promjene tlaka s vremenom. Početni tlak u novom ležištu je ekstrapolirani tlak. Budući da na osnovu ekstrapolacije nije bilo moguće precizno definirati slojni tlak on je koreliran na temelju podataka okolnih bušotina. Zatim je izvršeno podešavanje koreliranog tlaka na krivulji simulacije tlaka izvršenog modificiranog izokronalnog testa, te je tako dobiveni tlak usvojen kao točan podatak. Vrlo je upitno koliko bi trebalo trajati mjerenje porasta tlaka da bi se dosegla vrijednost slojnog tlaka u konkretnom slučaju. Taj vremenski period teoretski bi mogao trajati do čak nekoliko mjeseci, a nije isključena i nemogućnost da se izvede u razumnom vremenu.

**Tablica 5.** Kromatografska analiza uzorka plina uzetog za vrijeme DST-a

*Table 5 Gas chromatograph analysis of sample taken during DST*

Komponenta	Maseni udio, %	Molarni udio, %
N <sub>2</sub>	3.90	2.68
CO <sub>2</sub>	6.98	3.05
C <sub>1</sub>	71.97	86.42
C <sub>2</sub>	5.89	3.77
C <sub>3</sub>	4.86	2.12
i-C <sub>4</sub>	1.38	0.46
n-C <sub>4</sub>	2.59	0.86
i-C <sub>5</sub>	1.12	0.30
n-C <sub>5</sub>	0.90	0.24
C <sub>6+</sub>	0.41	0.09

Relativna gustoća (zrak=1) 0.672

**Tablica 6.** Kromatografska analiza uzorka plina uzetog za vrijeme HDM-a

*Table 6 Gas chromatograph analysis of sample taken during cased-hole well test*

Komponenta	Maseni udio, %	Molarni udio, %
N <sub>2</sub>	4.11	2.84
CO <sub>2</sub>	8.15	3.58
C <sub>1</sub>	71.25	85.92
C <sub>2</sub>	5.70	3.66
C <sub>3</sub>	5.17	2.27
i-C <sub>4</sub>	1.22	0.41
n-C <sub>4</sub>	2.38	0.79
i-C <sub>5</sub>	1.01	0.27
n-C <sub>5</sub>	0.75	0.20
C <sub>6+</sub>	0.26	0.06

Relativna gustoća (zrak=1) 0.672

**Tablica 7.** Analiza uzorka vode uzete za vrijeme HDM-a

*Table 7 Water analysis of sample taken during cased-hole well test*

Gustoća, kg/m <sup>3</sup>	1130
Salinitet, g NaCl/l	185,46
pH	5,29

Parametri dobiveni mjerenjem porasta tlaka mogu se u potpunosti precizno definirati ako se u prethodnom periodu crpljenja u ležištu uspostavilo poluustaljeno stanje protoka (stabilizacija). Da je taj period završio znati ćemo po stabiliziranim parametrima, prvenstveno tlaka i proizvedenih količina ugljikovodika. Nažalost, u slučaju ovog ispitivanja, stabilizacija nije postignuta ni za vrijeme DST-a ni za vrijeme HD mjerenja. Što je ležište slabije propusno, taj period, traje dulje i na takve bušotine treba obratiti posebnu pažnju. Problem dosezanja poluustaljenog režima protjecanja je vremenski period koji može varirati od par dana do čak nekoliko mjeseci. Njemu prethodi neustaljeni protočni režim karakteriziran linearnom ovišnošću tlaka o logaritmu vremena. U tom periodu se još ne osjećaju efekti granice ležišta. Trajanje perioda ovisi o svojstvima i geometriji porozne sredine i fluida u njemu, te položaju bušotine u tom poroznom mediju. Taj dio krivulje uzima se za izračunavane propusne sposobnosti kolektora (kh), dakle provodljivosti ležišta. Također se može utvrditi oštećenje bušotine (skin-efekt) i gubitak tlaka uslijed skina (oštećenja). Važno je reći da je u skinu sadržan i gubitak tlaka uslijed turbulencije ili ne-darcyjeva protoka. Prema teoriji, turbulencija se uspostavlja trenutno te nije funkcija vremena i manifestira se kao dodatni pad tlaka, koji se odvija gotovo isključivo na ulazu u kanal bušotine. Efekti turbulencije mogu se osjetiti samo kod protoka s velikom proizvodnjom ugljikovodika (Lee, 1982; Lee et al. 1996; Agarwal, 1979; Bourdet et al. 1984.).

**Tablica 8.** Rezultati analize porasta tlaka HD mjerenja  
*Table 8 Pressure build-up analysis results of the cased-hole well test*

$p_{avi}$	-početni srednji slojni tlak	183,5	bar
$p_{wf}$	-završni dinamički tlak	47,478	bar
$\Delta p$	-ukupna razlika tlaka	136,022	bar
$kh_{(2)}$	-provodljivost vanjske zone	9,125	$10^{-3}\mu m^2 \times m$
$k_{(2)}$	-propusnost vanjske zone	1,25	$10^{-3}\mu m^2$
$C$	-skladištivost u bušotini	0,01226	$m^3/\text{bar}$
$s_{(w)}$	-bušotinsko oštećenje	-3,16	
$s_{(t)}$	-ukupno efektivno oštećenje	-4,75	
$r_1$	-polumjer promjene kolektorskih svojstava	14	m
$(\phi ch)_{1/2}$	-složeni odnos pohranjivosti	0,02683	
$(kh/\mu)_{1/2}$	-odnos pokretljivosti	14,68	
$r_i$	-približni polumjer istraživanja	156	m

## Zaključak

Izvođenje DST-a na istražnoj bušotini bitno je kako bi utvrdili zasićenje ležišta ugljikovodicima i potvrdili ili barem ukazali na moguće komercijalno otkriće koje se naknadno može dokazati HDM-om. U slučaju konkretno ispitivane istražne bušotine to je i učinjeno tako da je DST ukazao na zasićenje ležišta plinom, a u sklopu HDM-a izvedenog u zacijevljenoj bušotini dobivena su dodatna saznanja potrebna za potvrdu komercijalnog otkrića. Obavljenim modificiranim izokronalnim testom dobivena je točna vrijednost ležišnog tlaka i precizni podatci o parametrima potrebnim za prognoziranje proizvodnih mogućnosti bušotine. Utrošena sredstva za izvođenje testa opravdana su dobivenim saznanjima koja će poslužiti za optimalni izbor dubinske opreme i dugoročno projektiranje proizvodnih instalacija.

HDM ima vrlo važnu ulogu pri upoznavanju svojstava ležišta raskrivenog nekom bušotinom, te proizvodnih osobina same bušotine. Hidrodinamika daje vrlo precizne odgovore na pitanja o propusnim svojstvima ležišta i oštećenjima pribušotinske zone.

## Nomenklatura:

$B_g$	- obujamski koeficijent plina, $m^3/m^3$
$B_o$	- obujamski koeficijent nafte, $m^3/m^3$
$B_w$	- obujamski koeficijent vode, $m^3/m^3$
$C$	- skladištivost u bušotini, $m^3/\text{bar}$
$CGR$	- omjer proizvodnje kondenzata i plina, $cm^3/m^3$
$c_f$	- stlačivost ležišne stijene, $\text{bar}^{-1}$
$c_g$	- stlačivost plina, $\text{bar}^{-1}$
$c_o$	- stlačivost nafte, $\text{bar}^{-1}$
$c_t$	- ukupna stlačivost ležišta, $\text{bar}^{-1}$
$c_w$	- stlačivost vode, $\text{bar}^{-1}$
$FCIP$	- završni statički tlak, bar

$FCIT$	- završna statička temperatura, $^{\circ}\text{C}$
$FFP_1$	- završni tlak prvog protoka, bar
$FFP_2$	- završni tlak drugog protoka, bar
$FFT_1$	- završna temperatura prvog protoka, $^{\circ}\text{C}$
$FFT_2$	- završna temperatura drugog protoka, $^{\circ}\text{C}$
$FHP$	- završni hidrostatički tlak isplake (tlak isplake nakon testiranja), bar
$FHT$	- završna hidrostatička temperatura, $^{\circ}\text{C}$
$h_e$	- efektivna debljina sloja, m
$ICIP$	- prvi statički tlak, bar
$ICIT$	- prva statička temperatura, $^{\circ}\text{C}$
$IFP_1$	- početni tlak prvog protoka, bar
$IFP_2$	- početni tlak drugog protoka, bar
$IFT_1$	- početna temperatura prvog protoka, $^{\circ}\text{C}$
$IFT_2$	- početna temperatura drugog protoka, $^{\circ}\text{C}$
$IHP$	- početni hidrostatički tlak isplake, bar
$IHT$	- početna hidrostatička temperatura isplake, $^{\circ}\text{C}$
$k_{(2)}$	- propusnost vanjske zone ležišta, $\mu m^2$
$kh_{(2)}$	- provodljivost (propusna sposobnost) vanjske zone ležišta, $\mu m^2 \times m$
$(kh/\mu)_{1/2}$	- omjer pokretljivosti
$p_{avi}$	- početni srednji ležišni tlak, bar
$p_{sr}$	- srednji ležišni tlak, bar
$p_{wf}$	- završni dinamički tlak, bar
$r_1$	- polumjer promjene kolektorskih svojstava, m
$r_i$	- približni polumjer istraživanja, m
$r_w$	- polumjer kanala bušotine, cm
$s_{(t)}$	- ukupni efektivni skin faktor
$s_{(w)}$	- bušotinski skin faktor
$s_w$	- zasićenje ležišta vodom, %
$T$	- ležišna temperatura, $^{\circ}\text{C}$
$q_c$	- protok kondenzata, $m^3/\text{dan}$
$q_g$	- protok plina, $m^3/\text{dan}$
$q_w$	- protok vode, $m^3/\text{dan}$
$\Delta p$	- ukupna razlika tlaka, bar
$\phi$	- šupljikavost ležišne stijene



$(\phi ch)_{1/2}$  - omjer pohranjivosti  
 $\gamma_g$  - relativna gustoća plina  
 $\mu_g$  - dinamička viskoznost plina, mPa×s  
 $\mu_o$  - dinamička viskoznost nafte, mPa×s  
 $\mu_w$  - dinamička viskoznost vode, mPa×s  
 $\rho_o$  - gustoća nafte, kg/m<sup>3</sup>

Accepted: 29.10.2009.

Received: 11.05.2009.

## Literatura:

- Agarwal, R.G. (1979): Real Gas Pseudo-Time: A New Function for Pressure Buildup Analysis of MHF Gas Wells, paper SPE 8279 presented at the 54<sup>th</sup> SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 23–26 September, Las Vegas, Nevada.
- Alexander, L.G. (1976): Theory and Practice of the Closed-Chamber Drillstem Test Method, paper SPE 6024 presented at the 51<sup>st</sup> SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 3–6 October, New Orleans, Louisiana.
- Al-Hussainy, R., Ramey, H.J.Jr., Crawford, P.B. (1966): The Flow of Real Gases Through Porous Media, *Journal of Petroleum Technology* 18, 624–636, Dallas, Texas.
- Bourdet, D., Ayoub, J.A., Pirard, Y.M. (1984): Use of Pressure Derivative in Well Test Interpretation, paper SPE 12777 presented at the SPE California Regional Meeting, 11–13 April, Long Beach, California.
- Ehlig-Economides, C.A., Joseph, J.A., Ambrose, R.W.Jr., Norwood, C. (1990): A Modern Approach to Reservoir Testing, *Journal of Petroleum Technology* 42, 1554–1563, Richardson, Texas.
- Erdle, J.C., Upchurch, J.M., Warren, D.A. (1977): Early-Fluid Entry Determination; Key to Safe, Optimum Drill Stem Testing, paper SPE 6884 presented at the 52<sup>nd</sup> SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 9–12 October, Denver, Colorado.
- Lee, J. (1982): Well Testing, SPE Textbook series vol.1, Richardson, Texas.
- Lee, J., Wattenbarger, R.A. (1996): Gas Reservoir Engineering, SPE Textbook series vol.5, New York, Dallas.



## Razvoj, održavanje i upravljanje plinskim transportnim sustavom

Plinacro stvara čvrstu energetska infrastrukturu koja jamči dugoročnu stabilnost plinskoga transportnog sustava za dobavu prirodnog plina, ekološki i ekonomski najpogodnijeg energenta današnjice.

Savska cesta 88a\_10000 Zagreb\_tel.: +385 1 6301 777\_fax\_ +385 6301 787\_web: [www.plinacro.hr](http://www.plinacro.hr)\_e-mail: [plinacro@plinacro.hr](mailto:plinacro@plinacro.hr)