

A finom kőzetszemcsék és a márgacsíkok által okozott hatások a szénhidrogéntároló neogén homokkövek karottázs-kiértékelésében Magyarországon*

BARLAI ZOLTÁN

Magyarországon a szénhidrogéntároló neogén homokkövekben nagy mennyiségben van képviselve a finomszemcséjű kőzetliszt és finomhomok frakció. Ezek fő ásványi összetevői a negatív elektromos töltéseket tartalmazó filloszilikátok (csillámok, kloritok), amelyek a kis sókoncentrációjú rétegvizekkel érintkezve erős elektromos kettősrétegeket, diffúz kationburkokat és adszorpciós vízburkokat hoznak létre a szemcsefelületeken.

Az agyagásványok jelentős mennyiségben koncentrálnak vékony csíkok formájában, így igen gyakoriak a „szendvics”-homokkövek, amelyekben a márgacsíkok elektromos vezetőképessége lényegesen nagyobb a homokcsíkok vezetőképességénél.

A tanulmány foglalkozik a finom kőzetszemcsék által a karottázs-paraméterekre gyakorolt hatásokkal. Bemutatja a mikrofizikai közetmodellt e hatások leírására és a karottázs-paraméterek matematikai formuláit. Bemutatja az izotrop homokkövek kiértékelési formuláit, amelyekkel meghatározhatók a következők tároló paraméterek:

- litológiai összetétel
- fajlagos szemcsefelület
- effektív porozitás
- abszolút permeabilitás
- víztelítettség
- tortuozitás
- redukálhatatlan víztelítettség.

A tanulmány foglalkozik a márgacsíkok hatásával és bemutatja a szendvics-homokkövek modelljét és kiértékelési formuláit. Foglalkozik a márgacsíkok mennyiségének és elektromos vezetőképességének, továbbá a szendvics-homokkövek effektív vastagságának meghatározásával. Bemutatja a mikro-normál ellenállás-szelvény, a természetes gamma- és a PS-szelvény dlapvető szerepét e feladatok megoldásában. Foglalkozik a szendvics-homokkövek speciális interpretációs problémáinak megoldásával, így a mozgóvíz víztelítettség meghatározásával az olaj-víz átmeneti zónákban, továbbá a gáztároló és olajtároló zónák megkülönböztetésével.

В неогеновых нефте-газоносных песчаниках Венгрии в большом количестве представлены тонкозернистая каменная мука и тонкопесчаная фракция. Их основными минеральными составляющими являются филлосиликаты с отрицательной электрической зарядкой (слюды, хлориты), при контактировании которых с слабоминерализованными пластовыми водами создаются диффузивные катионные оболочки и адсорпционные водяные оболочки на поверхности зерен.

Глинистые минералы концентрируются в значительном количестве в виде полос, в виде полос, в связи с чем очень часто встречаются „сэндвичные” песчаники, в которых полосы мергелей отличаются значительно повышенной электрической проводимостью по сравнению с песчаными полосами.

В работе рассматривается влияние тонких зерен горных пород на параметры каротажжа. Приводятся микрофизическая модель горных пород, описание этих эффектов и математические формулы каротажных параметров. Представляются формулы интерпретации для изотропных песчаников, позволяющие определить следующие коллекторские параметры:

- litológiai összetétel
- uduányos felület
- effektív porozitás
- abszolút permeabilitás
- víztelítettség
- tortuozitás
- redukálhatatlan víztelítettség.

* A tanulmány előadás formájában elhangzott (angol nyelven) az SPWLA London-i Szakosztálya által 1974. október 14–15-én rendezett 3. Európai Rétegiértékelő Szimpóziumon, továbbá 1974. október 31-én a MGE Mélyfúrási Geofizikai Szakosztályának előadóiülésén.

В работе рассматриваются вопросы, связанные с эффектом полос мергелей и приводятся модель „сэндвичных” песчаников и применяемые формулы интерпретации. Делаются попытки определить количество и электрическую проводимость полос мергелей, а также эффективную мощность сэндвичных песчаников. Обсуждается роль микронормального электрического каротажа, метода ГК и каротажа по мегоду СП в решении этих задач. Рассматриваются возможность решения специальных проблем интерпретации при наличии в разрезе сэндвичных песчаников, так напр. задачи по определению неустойчивой водонасыщенности в переходных нефтяно-водяных зонах, а также задачи по разделению газоносных и нефтеносных зон.

Fine silt and sand grains occur in the hydrocarbon-bearing Neogene sandstones of Hungary in large quantities. Main mineralogical constituents are the sheet-silicates (micas, chlorites etc.) with excess negative electric charges giving rise to electric layers, diffuse cationic shells and adsorption layers of hydrate water at the grain surfaces upon encountering pore waters of moderate or low concentration.

Clay minerals are concentrated in thin shale laminae, as a rule, thus creating sandwich-type sandstones in which electric conductivity of the shale streaks is much higher than that of the sand streaks.

The paper deals with the effects of fine grains exerted on well logging parameters. Microphysical and macrophysical sandstone models serving for description of these influences and mathematical formulae of well logging parameters are presented. Evaluating formulae of isotropic disperse sandstones are shown for the determination of reservoir parameters as follows:

- | | |
|--------------------------------|----------------------------------|
| – Lithological composition | – Specific surface of the grains |
| – Effective porosity | – Absolute permeability |
| – Water saturation | – Tortuosity |
| – Irreducible water saturation | |

The paper deals with the effects of shale laminae in well log evaluation. Physical model and interpretation formulae of the anisotropic sandwich-type sandstones are recommended. Determination of relative volume and electric conductivity of the shale interbeddings and evaluation of the effective pay thickness are presented. The basic role of micronormal resistivity log, gamma-ray and SP curves in the evaluation process is elucidated. Solution of some special evaluation problems in sandwich-type sandstones, e.g. determination of the movable water-saturation component in the oil – water transition zone and distinguishing of gas- and oil-bearing intervals are shown.

Bevezetés

A kőolaj-, földgáz- és víztároló homokkövek kvantitatív mélyfúrési geofizikai (karottázs-) értékeléséhez G. E. Archie közölte az első lényeges összefüggéseket 1942-ben [1]. Porozitás- és víztelítettség-formuláit azóta az egész világon használják az elektromos szelvények kiértékeléséhez. A gyakorlati alkalmazások azonban felfedték a formulák fogyatékoságait: a bennük szereplő a , m , n „függvény-konstansok” értékei rendszerint még egy telepen belül is széles határok között változnak és nagymértékben függenek a pórusvíz sőtartalmától. A tapasztalatok megmutatták, hogy például Magyarországon a neogén medencék homokköveiben az „ a ” formációfaktor-koefficiens $0,5 - 2,5$ között, az „ m ” cementáció-exponens $1,1 - 1,95$ között, az „ n ” szaturáció-exponens pedig $0,3 - 2,0$ között változik $3,3 - 70$ g/l koncentrációjú NaCl vizes telítődlatok alkalmazása mellett [9].

E változásokat csak a homokkövek litológiai összetételének és a pórusvíz sőtartalmának ismeretében lehetne elég pontosan figyelembe venni, és mivel e követelmények a karottázs gyakorlati munkáiban nehezen teljesíthetők, ezért az Archie-formulákból számított porozítások és víztelítettségek hibái sokszor túlságosan nagyok.

Az utolsó két évtizedben a „porozításkövető szelvények”: az ultraszónikus At hullámterjedési idő, a gamma-gamma effektus segítségével meghatározott ρ_b közetsűrűség és a neutronfolyamatok alapján nyert Φ_n „neutronporozitás” lehetővé tették a porozitás pontosabb értékelését, sőt a neutron folyamatok

hozzáségítették a karottázst — a folyadéktelítettségek mellett —, a gáztelítettség meghatározásához is. A gyakorlati tapasztalatok azonban megmutatták, hogy a homokkövek mátrixának összetétele az újabb karottázis-paraméterekre is lényeges hatást fejt ki, ezek figyelembevételével nélkül nem várható kielégítő pontosság a karottázis-mérésekből meghatározott rétegfizikai paraméterektől.

1950-től kezdve a karottázis-módszerek kutatói szerte a világon azzal igyekeztek megmagyarázni a homokkövek mátrixa által a karottázis-paraméterekre gyakorolt hatásokat, hogy a homokkövek kisebb-nagyobb mennyiségben agyagásványokat is tartalmaznak, és ezek, továbbá a homokkövek kompaktációjának és cementációjának változó mértéke torzítja a karottázis-paramétereket [2, 3, 4, 5]. Kidolgozták a legkülönbözőbb „agyagos homokkő”-interpretációs eljárásokat, és igyekeztek tisztázni a kompaktáció és a cementáció hatásának elméletét és figyelembevételét a karottázis-értékelésben.

A tapasztalati tények, az elméleti kutatások és a hatalmas mennyiségű gyakorlati szelvényértékelés tanulságai meggyőzték a mélyfúrási kutatókat arról, hogy a rétegfizikai paraméterek kielégítően pontos meghatározása érdekében a homokkövekről alkotott modellelképzéseket finomítani kell: a gondolkodással közelebb kell jutni az anyagi rendszer valóságához. Ezzel a pontosság növelése mellett újabb rétegfizikai paraméterek — így pl. a permeabilitás, a fajlagos szemcsefelület — meghatározása is lehetővé válik. Ugyanakkor az is világossá vált, hogy a karottázis-paramétereket és az azokból meghatározott rétegfizikai jellemzőket valószínűségi változókként kell kezelni, mivel azok a kőzetekben pontról pontra változnak, másrészt a másodrendű és harmadrendű változók hatásai következtében azok kvantitatív értékei nem szigorúan determináltak. A jelenlegi karottázis-kutatómunkákat gondolkodásunkban a kőzetek struktúrájába való mélyebb behatolás és ugyanakkor a kőzetparaméterek valószínűségi változókként történő kezelése jellemzi.

A magyar neogén homokkövek litológiai jellege

A magyar neogén medencék homokköveit a rétegződés anizotrop morfológiája jellemzi: permeábilis homokkőrétegek, a *mm*-től a *néhány méterig* terjedő, változatos vastagsággal, váltakoznak impermeábilis márgarétegekkel; utóbbiak vastagsága szintén széles határok között változik.

A permeábilis homokkőrétegek szilárd mátrixát főképpen kőzetliszt és finomhomok alkotja. Ezekben a frakciókban nagy mennyiségben vannak képviselve a rétegszilikátok, főképpen a csillámok (muszkovitok, biotitok, szericitek) továbbá a kloritok. A permeábilis homokkövekben viszonylag kisebb mennyiségben fordulnak elő az agyagásványok, továbbá ugyancsak kisebb mennyiségben vannak képviselve a közepes és durva szemcseméretű homokfrakciók.

Az impermeábilis márgarétegek szilárd vázának összetétele ugyancsak változatos: az agyagásványok, a kőzetliszt és a karbonátok különböző arányú keverékei alkotják az impermeábilis márgákat.

A permeábilis homokkövekben és az impermeábilis márgákban levő rétegvíz sókoncentrációja alacsony, vagy legfeljebb közepes. Ritkán találkozunk *30 g/l*-nél nagyobb sókoncentrációval és a koncentráció leggyakoribb értéke kb. *5 g/l*. A pórúsvizek fő kationfélesége a nátrium (Na^+), de kalcium (Ca^{++}) és magnézium (Mg^{++}) is előfordulnak. Az alapvető anionféleség a klorid

(Cl^-), de jelentős mennyiségben vannak képviselve a hidrokarbon (HCO_3^-) anionok is.

A homokkövek fentiekben vázolt litológiai kifejlődése mellett a karottázs-paramétereket igen nagy mértékben befolyásolják a permeábilis homokkövekben levő finom szemcseátmérőjű frakciók, így a kőzetliszt és finomhomok, továbbá a tároló kőzetekbe betelepült, kisebb-nagyobb vastagságú márgacsikok.

A finom szemcsefrakciók hatása a homokkövek karottázs-paramétereire

A magyar homokkőtárolók karottázs-szelvényein végzett analízisek, fúrt magok kőzetmintáinak laboratóriumi vizsgálatai és elméleti tanulmányok meggyőzték minket arról, hogy a karottázs-paramétereket a szilikátok egy bővebb családja, elsősorban a filloszilikátok ásványféleségei befolyásolják [6, 7, 8, 9, 10]. A filloszilikátok ionrácsaiban nagymértékű elektromos polarizáció jöhet létre Si^{4+} ionoknak Al^{3+} ionokkal, továbbá Al^{3+} ionoknak Mg^{2+} ionokkal történő helyettesítése által, ami negatív töltéstöbbletre vezet; ehhez hozzájárulnak még egyes külső oxigénatomok lekötetlen negatív vegyértékei.

A polározott szilikátszemcsék és a porózusvíz érintkezési határfelületein szelektív iondiffúzió és ionadszorpció megy végbe, elsősorban alkálifémek és földfémek kationjainak részvételével. Pozitív töltéstöbbletű ionburkok alakulnak ki a szilikátszemcsék környezetében. A szilikátszemcsék negatív felületi töltése és a pórusvíz pozitív diffúzió ionburkai elektromos kettős-rétegeket képeznek, amelyek megnövelik a homokkövek elektromos vezetését, és mivel a diffúzió ionburkok jelentős mennyiségű hidrátvizet tartanak kötött állapotban a szemcsefelületeken, ezért hatással vannak szinte valamennyi karottázs-paraméterre.

E tanulmányban a magyar olajipar karottázs-munkáinak jelenlegi gyakorlatában alapvető szerepet betöltő paraméterekre összpontosítjuk figyelmünket; ezek a következők:

- R_t a szénhidrogéntároló homokkő fajlagos elektromos ellenállása;
- R_0 ugyanaz, víztárolás esetén;
- α PS-csökkenési tényező;
- I_γ természetes gamma-aktivitás;
- Φ_n a neutronmérésekkel meghatározott „neutron-porozitás”;
- Δt a szónikus longitudinális hullámok terjedési ideje;
- ρ_b a gamma-fotonok Compton-szóródásából meghatározott kőzet-sűrűség.

A kőzetszemcsék ásványi minősége az elektromos polarizáció mértékét szabályozva befolyásolja a karottázs-paramétereket.

Az ásványi minőség mellett jelentős szerepe van a kőzetszemcsék geometriájának, mivel az szabja meg a diffúzió ionburkokat hordozó fajlagos szemcsefelület nagyságát. Gömbi szemcsegeometria esetén a szilárd anyag egységnyi térfogatára vonatkoztatott S_0 fajlagos szemcsefelület $3/r$ lesz, ha a szemcsék sugara r ; ugyanez lemezes szemcsegeometria esetén – ami nagyon jellemző a filloszilikátokra – $2/t + 2/r$ lesz, ha a szemcsékét r sugarú és t vastagságú koronggal közelítjük. Mivel $t \ll r$, ezért uralkodóan lemezes geometria esetén S_0 nagyobb, mint gömbi szemcse-alak mellett. A szemcseméret csökkenésével –

bármilyen szemcsealak mellett — a felületi hatások növekednek; a mátrix hatása a karottázs-paraméterekre $1/r$ függvény szerint nő.

A szemcseméret csökkenése egy másik hatás révén is befolyásolja a karottázs-paraméterek egy részét, elsősorban a szónikus hullámterjedési időt és a fajlagos ellenállást.

A szemcseméret csökkenésével növekszik a térfogategységnyi kőzetben levő szemcseérintkezési pontok száma, ezzel növekszik az akusztikus energia-átcsatolási helyek koncentrációja, ezzel együtt az akusztikus energia-veszteség. A szemcseérintkezési pontok számának növekedése a kőzet elektromos ellenállását is befolyásolja, mivel növeli a póruster tortuozitását.

A Δt és az R paramétereket jelentősen befolyásolja a kőzet mechanikai feszültségi állapota is, tehát a kompakciós nyomás, amit a geosztatikus nyomás és a póruster nyomása közötti különbség definiál. Ennek a hatásnak különös jelentősége van a túlnyomásos szénhidrogéntároló zónákban és ez ad lehetőséget a túlnyomásos zónák kimutatására karottázs-mérések alapján.

A szemcsék közötti cementáció mértéke, a konszolidáció foka szintén befolyásolja a karottázs-paramétereket, elsősorban a Δt és az R jellemzőket. A konszolidáció fokának növekedésével növekszik a szónikus hullámok terjedési sebessége a mátrixban, továbbá növekszik a tortuozitás, ezzel együtt az elektromos ellenállás.

Mindazok a mátrixhatások, amelyek a diffúz kationburkok jelenlétével kapcsolatosak, alapvetően függenek a pórusvíz iontartalmától. E mátrixhatások növekednek a pórusvíz sókoncentrációjának csökkenésével, így különösen jelentősek édesvízes és kis sókoncentrációjú neogén homokköveinkben.

A pórusfolyadék nedvesítési tulajdonságai befolyásolják a szénhidrogéntároló homokkövek fajlagos elektromos ellenállását, azonban meg kell jegyezni, hogy a magyar neogén homokkövek alapvetően vízre-nedvesedők.

A karottázs-paraméterek eddiginél pontosabb leírásakor nagy figyelmet kell fordítani a hőmökkő-mátrix szemcséinek ásványi minőségére és a szemcsék méretére. Az ásványi minőség és szemcseméret jól tükröződik a PS - és a természetes gamma-szelvényeken, ezért ezek a szelvények alapvető szerepet töltenek be a „*litológiai hatások*” figyelembevételénél.

Az α PS -csökkenési tényezőt az agyagásványok relatív (effektív pórusterhez viszonyított) mennyisége szabályozza. A természetes gamma-aktivitás növekszik a káliumot (^{40}K izotópot) tartalmazó szilikátféleségek mennyiségének növekedésével, továbbá a fajlagos szemcsefelület növekedésével, mivel azzal együtt nő az urán, a rádium és a tórium adszorpciója a kőzetszemcsék felületén.

A homokkövek karottázs-paraméterei és litológiai összetétele, valamint rétegfizikai jellemzői közötti összefüggések feltárásakor arra törekedtünk, hogy mindezeket a hatásokat (és az itt nem érintett triviális hatások — pl. az effektív porozitás, a rétegvíz fajlagos elektromos ellenállása, a víztelítettség — szerepét is) figyelembe vegyük [6, 7, 8, 9, 10, 11].

A permeábilis izotrop homokkövek fizikai — matematikai modelljei és karottázs-paraméterei

Az izotrop homokkővet n különféle szilárd ásványból összetettnek tekintjük; ezek többsége a kőzetszemcséket, kisebb részük a cementáló anyagot képezi. Az egyes ásványi komponenseket a szemcséátmérő (d) tényleges eloszlása

szerint vesszük figyelembe [8]. Ezt a szemléletet alkalmaztuk a permeábilis izotrop homokkövek *mikrofizikai* – matematikai modelljének megalkotásakor és a karottázis-paraméterek leírásakor. A mikrofizikai modellben minden ásványfélésegre és minden szemcseméretre tekintettel voltunk. Az egyes ásványfélések szemcseméret-eloszlását a szemcsék relatív térfogatának – a (d) szemcseátmérőhöz tartozó – $v_i(d)$ valószínűség-sűrűség függvényével írtuk le. Ezt a módszert alkalmaztuk a mikrofizikai modell létrehozásakor és kezelésekor minden figyelembe vett mennyiségre vonatkozóan, mivel az egyes mennyiségeket – tekintettel a homokkő összetételének statisztikus jellegére – csak valószínűség-sűrűség függvényekkel lehet kezelni. Így például az $\varepsilon_i(d)$ valószínűség-sűrűség függvénnyel írtuk le az i -edik ásványfélésegszóró adszorpciós térfogatát a d szemcseátmérő függvényében.

A víztároló homokkő fajlagos elektromos ellenállása az I. Archie-egyenlet és az elektrolit oldatok keverési törvénye alapján modellünkben így adódik:

$$R_0 = R_w \frac{1}{\Phi^m} \frac{1}{1+C}, \quad (1)$$

amelyben

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n \int_{d_{i,\min}}^{d_{i,\max}} \frac{v_i(d) \cdot \varepsilon_i(d)}{r_i(d)} dd}{\frac{\Phi}{R_w}}, \quad (2)$$

ahol: $r_i(d)$ = az i -edik szilárd komponens adszorpciós hidrátvizének fajlagos elektromos ellenállása, mint valószínűség-sűrűség függvény;
 R_w = a pórúsvíz fajlagos elektromos ellenállása.

Mivel a (2) képletben definiált C mennyiség a szilárd szemcsék adszorpciós hidrátvizének elektromos vezetését írja le a teljesen vízzel töltött pórúster Φ/R_w elektromos vezetéséhez képest, és így nagysága a homokkő ásványi összetételétől, szemcseméret-eloszlásától, porozitásától, valamint pórúsvizének iontartalmától függ, ezért a C mennyiséget „*litológiai hatónak*” nevezzük.

A szénhidrogéntároló homokkő fajlagos elektromos ellenállása modellünkben így adódik:

$$R_t = R_w \frac{1}{\Phi^m} \frac{1}{1+C} \left(\frac{1+C}{S_w+C} \right)^n \quad (3)$$

Az (1) és (3) képletekkel leírt R_0 és R_t formulák az Archie-egyenletek – litológiai hatással bővített – általánosított alakjainak tekinthetők. Az (1) és (3) egyenletek határértékei – a pórúsvíz sótartalmának növekedésekor – éppen az Archie-egyenletek lesznek, ami könnyen belátható (2) alapján; ugyanis növekvő sókoncentrációk mellett $r_i(d) \rightarrow R_w$, így $C \rightarrow C_{\lim} < 0,05$, tehát a legkedvezőtlenebb litológiai kifejlődés esetén is $C_{\lim} \cong 0$. Következésképpen (1) és (3) egyenleteinkben m és n az Archie-konstansok gyakorlatilag végtelen nagy sókoncentrációk ($c \geq 100\,000$ ppm) mellett mért értékei (m_∞ és n_∞). Laboratóriumi méréseink szerint a magyar neogén medencék homokköveiben

$$\left. \begin{aligned} m &= 1,8 - 1,9 \\ n &= 1,8 - 2,0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

tehát m és n az (1) és (3) egyenletekben valóban konstansokká váltak.

A PS -potenciálok α csökkenési tényezőjét modellünk és M. R. J. Wyllie 3-komponensű homokkőmodellje [2] alapján vezettük le, így;

$$\alpha = \frac{1}{\left(1 + \frac{C_{SP}}{S_{X_0}}\right)^2}, \quad (5)$$

ahol: S_{X_0} = az infiltrációs zóna víztelítettsége;

C_{SP} = a „litológiai ható” a PS -elektromos erők kialakulása szempontjából; elméleti vizsgálataink szerint a PS -elektromos erőket csak az agyag-ásványok befolyásolják, ezért C_{SP} így írható le:

$$C_{SP} = \frac{\sum_{j=1}^l \int_{d_{j,\min}}^{d_{j,\max}} \frac{v_j(d) \varepsilon_j(d)}{r_j(d)} dd}{\frac{\Phi}{R}}, \quad (6)$$

ahol: j = a j -edik agyagásvány indexe;

R = az infiltrációs zónában levő keverékvíz (iszapfiltrátum és rétegvíz) fajlagos elektromos ellenállása.

Az I_γ természetes gamma-aktivitás, a Φ_n neutron-porozitás, a Δt szónikus longitudinális terjedési idő és a ρ_b (gamma-gamma) kőzetsűrűség modellünkben egységesen írhatók le a kőzetkomponensek hatásainak lineáris szuperponálásával. Mikrofizikai modellünk lehetővé teszi, hogy a homokkővet elegendően sok komponensre bontsuk ahhoz, hogy ezek fajlagos (térfogategységre vonatkoztatott) hatásai már függetlenek legyenek a komponensek relatív térfogatának nagyságától.

A felsorolt karottázis-paraméterek (I_γ , Φ_n , Δt , ρ_b) – azokat közös A szimbólummal jelölve – az alábbi mikrofizikai formulával írhatók le:

$$A = \sum_{i=1}^n \int_{d_{i,\min}}^{d_{i,\max}} [v_i(d) (1 - \varepsilon_i(d)) A_{S,i}(d) + v_i(d) \varepsilon_i(d) A_{L,i}(d)] dd + \Phi A_f \quad (7)$$

ahol: $A_{S,i}(d)$ = a szilárd anyag fajlagos geofizikai hatásának valószínűség-sűrűség függvénye a d szemcséátmérő függvényében, az i -edik szilárd ásványi komponensre vonatkozóan;

$A_{L,i}(d)$ = ugyanaz, i -edik komponens adszorpciós hidrátvizére vonatkozóan;

A_f = az effektív pórusterben levő folyadékok és gázok átlagos fajlagos geofizikai hatása.

A (7) képlet módot ad valamennyi ásványféleiség szilárd szemcséinek és adszorpciós hidrátburkainak megkülönböztetett figyelembevételére.

A (2), (6), (7) formulákat mikrofizikai modell alapján vezettük le. E modell előnye, hogy lehetővé teszi a kőzetet felépítő valamennyi anyagi komponens elméleti figyelembevételét, azonban hátránya is van: fizikailag nem mérhető mennyiségeket is tartalmaz. Így pl. nem mérhetőek meg közvetlenül az adszorpciós hidrátburkok fizikai jellemzői $r_i(d)$, $r_j(d)$, $A_{ii}(d)$, mivel a hidrátburkok csak a szilárd szemcsék és a pórsvíz együttes rendszerében alakulnak ki, azoktól elvonatkoztatva nem léteznek.

A karottázs-szelvények gyakorlati értékeléséhez létrehoztuk az ismeretett mikrofizikai modell makrofizikai megfelelőjét is; itt most ennek egy olyan egyszerűsített változatát mutatjuk be, amelyben valamennyi kőzetkomponens és azok jellemzői közvetlenül mérhetőek.

Az egyszerűsített makrofizikai homokkő-modellben a szilárd mátrixot három komponensre: agyagra, kőzetlisztre és homokra bontottuk.

1. *Agyag.* 5 μ -nál kisebb átmérőjű szemcsékből áll; főként agyagásványokat tartalmaz. Relatív térfogata formuláinkban sh . Fajlagos geofizikai hatásai igen nagyok.

2. *Kőzetliszt.* 5 μ és 150 μ közötti átmérőjű szemcsék képezik; elsősorban filloszilikátokat tartalmaz, azonban agyagásvány-tartalma már elhanyagolható. Relatív térfogata formuláinkban $si(1 - \Phi_{si})$. E frakció tartalmazza a szedimentpetrográfiában kőzetlisztnak és finomhomoknak nevezett komponenseket. Fajlagos geofizikai hatásai közepesek.

3. *Homok.* 150 μ -nál nagyobb átmérőjű szemcsékből áll; elsősorban kvarcot és földpátokat, továbbá karbonátokat tartalmaz. Relatív térfogata képleteinkben sd . Fajlagos geofizikai hatásai kicsik.

Az 1. ábrán bemutatjuk a homokkő térfogati anyagmérlegét az egyszerűsített makrofizikai modellben.

A Φ effektív porozitás a nagyobb hidraulikai sugarú pórscsatornák Φ_{sd} porozitásából és a kisebb hidraulikai sugarú pórscsatornák $si \cdot \Phi_{si}$ porozitásából tevődik össze:

$$\Phi = \Phi_{sd} + si \cdot \Phi_{si}. \quad (8)$$

A homokkő térfogati anyagmérleg-egyenlete:

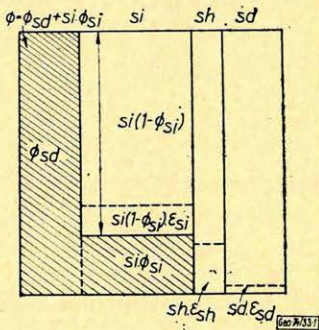
$$\Phi + sd + si(1 - \Phi_{si}) + sh \equiv 1. \quad (9)$$

Az 1. ábrán $sd \cdot \epsilon_{sd}$, $si(1 - \Phi_{si})\epsilon_{si}$ és $sh \cdot \epsilon_{sh}$ a homok, a kőzetliszt és az agyag adszorpciós hidrátvizét képviseli. A modellben a Φ_z „teljes” porozitás így írható le:

$$\Phi_z = \Phi + sd \cdot \epsilon_{sd} + si(1 - \Phi_{si})\epsilon_{si} + sh \cdot \epsilon_{sh}. \quad (10)$$

A víztároló homokkő R_0 fajlagos elektromos ellenállását, továbbá a szénhidrogéntároló homokkő R_t ellenállását most is az (1) és a (3) formulák írják le, azonban a C litológiai ható (2) helyett most így írandó:

$$C = \frac{sh}{\Phi} \left/ \frac{R_{sh}}{R_w} \right. + \frac{si(1 - \Phi_{si})}{\Phi} \left/ \frac{R_{si}}{R_w} \right. + \frac{sd}{\Phi} \left/ \frac{R_{sd}}{R_w} \right., \quad (11)$$



1. ábra — Puc. 1 — Fig. 1

ahol:

$$\left. \begin{aligned} \frac{R_{sh}}{R_w} &\cong 2 \\ \frac{R_{si}}{R_w} &\cong 5 \\ \frac{R_{sd}}{R_w} &\cong 50 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

a magyar neogén medencék homokköveiben.

Az α PS -csökkenési tényezőt az (5) képlet segítségével úgy írjuk le, hogy abban C_{SP} -t (6) helyett az alábbi egyszerű kifejezés szolgáljon:

$$C_{SP} = \frac{sh}{\Phi} \frac{R_{sh}}{R}, \quad (13)$$

ahol:

$$\frac{R_{sh}}{R} \cong 1$$

a magyar neogén homokkövekben, a szokásos fúróiszaptechnika ($R_{mf} \cong 3R_w$) mellett.

Az I_v , Φ_n , Δt és q_b mennyiségeket – továbbra is közös A szimbólummal jelölve azokat – az alábbi formulával írjuk le:

$$A = sd \cdot A_{sd} + si (1 - \Phi_{si}) A_{si} + sh \cdot A_{sh} + \Phi \cdot A_f, \quad (14)$$

ahol: A_{sd} , A_{si} , A_{sh} = a homok, a kőzetliszt és az agyag fajlagos geofizikai hatásai.

A permeábilis izotrop homokkövek gyakorlati karottázsszelvény-értékelését az előzőekben bemutatott (1), (3), (5), (8), (9), (11), (13), (14) formulák felhasználásával végezzük. Ezek alkalmasak arra, hogy figyelembe vegyük mindazokat a hatásokat, amelyek a homokkövek karottázis-paramétereit számottevően befolyásolják.

A permeábilis, izotrop homokkövek karottázis-paramétereinek interpretációs eljárásai

A homokkőtárolók karottázis-értékelésének gyakorlatában az 1. ábrán bemutatott térfogati modell használatakor a következő mennyiségek meghatározása szükséges:

sd	a homokfrakció térfogata;
$si(1 - \Phi_{si})$	a kőzetliszt térfogata;
sh	az agyag térfogata;
Φ	effektív porozitás;
S_w	víztelítettség (az effektív pórustérben);
S_o	olajtelítettség;
S_g	gázelítettség.

A felsorolt mennyiségek meghatározása nyolcismeretlenes egyenletrendszer megoldását jelenti. Az ismeretlenek száma azonban csökken, mivel a kő-

zetliszt Φ_{si} átlagos porozitása egy adott földtani szerkezetben állandónak tekinthető, és kőzetminták laboratóriumi vizsgálata alapján meghatározható; továbbá rendelkezésre áll két anyagmérleg-egyenlet:

$$\left. \begin{aligned} \Phi + sd + si(1 - \Phi_{si}) + sh &\equiv 1 \\ S_w + S_o + S_g &\equiv 1 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

A mondottak értelmében általános három fázisú homokkötő esetében öt ismeretlenes egyenletrendszer kell megoldani; az ismeretlenek a következők:

$$si(1 - \Phi_{si}), sh, \Phi, S_w, S_g.$$

Az öt ismeretlen meghatározásához a magyar karottázás-szolgálat jelenlegi gyakorlatában legfeljebb 7 karottázás-paraméter áll rendelkezésre: $R_t, R_{x_0}, \alpha, I, \Phi_n, \Delta t, \rho_b$; ezeket a (3), (5), (13) és (14) formulák alapján a következőképpen írjuk le:

A homokkő ellenállása:

$$R_t = R_w \cdot \frac{1}{\Phi^m} \cdot \frac{1}{1+C} \left[\frac{1+C}{S_u+C} \right]^n \quad (16)$$

A kiöblített zóna ellenállása:

$$R_{x_0} = \bar{R} \cdot \frac{1}{\Phi^m} \cdot \frac{1}{1+C} \left[\frac{1+C}{S_{x_0}+C} \right]^n, \quad (17)$$

ahol: \bar{R} = az iszapfiltrátum által kiöblített zóna keverékvizének fajlagos elektromos ellenállása;

S_{x_0} = a kiöblített zóna víztelítettsége.

A PS-csökkenési tényező:

$$\alpha = \frac{1}{\left[1 + \frac{sh}{\Phi} \cdot \frac{\bar{R}}{R_{sh}} \cdot \frac{1}{S_{x_0}} \right]^2} \quad (18)$$

A természetes gamma-aktivitás:

$$J_\gamma = si(1 - \Phi_{si}) J_{\gamma, si} + sh \cdot J_{\gamma, sh} + sd \cdot J_{\gamma, sd} \quad (19)$$

A neutron-porozitás:

$$\begin{aligned} \Phi_n = si(1 - \Phi_{si}) HI_{si} + sh \cdot HI_{sh} + sd \cdot HI_{sd} + \\ + \Phi(S_w \cdot HI_w + S_o \cdot HI_o + S_g \cdot HI_g), \end{aligned} \quad (20)$$

ahol: HI = az indexszel jelölt anyagok – édesvízre vonatkoztatott – hidrogénatom-koncentrációja.

A longitudinális szónikus hullámok terjedési ideje

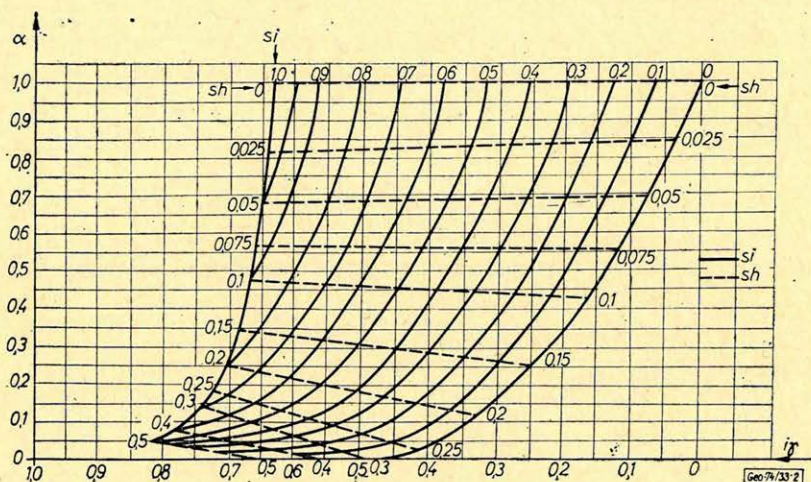
$$\Delta t = si(1 - \Phi_{si}) \Delta t_{si} + sh \cdot \Delta t_{sh} + sd \Delta t_{sd} + \Phi \cdot \Delta t_f \quad (21)$$

A kőzet térfogatsűrűsége:

$$\rho_b = si(1 - \Phi_{si}) \rho_{si} + sh \cdot \rho_{sh} + sd \cdot \rho_{sd} + \Phi \cdot \rho_f \quad (22)$$

Ha a (16)–(22) alatt leírt karottázs-paramétereket a kútszelvényezés során megmérték, akkor az 5 ismeretlen meghatározható a (16)–(22) egyenletrendszer megoldása útján.

A magyar olajbányászat jelenlegi karottázs-gyakorlatában a (22) kőzet-sűrűséget ritkán mérik (gamma-gamma szelvényezéssel), továbbá a termelő mezőket feltáró fúrásokban rendszerint nem mérik a (21) szónikus Δt hullámterjedési időt, valamint a (17) R_{x0} meghatározására szolgáló mikrolaterolog görbét, ezért a gyakorlati esetek egy részében, különösen a termelőmezők feltáró fúrásaiban csak 4 karottázs-paraméter (R_t , α , $I\gamma$ és Φ_n) áll rendelkezésre az 5 ismeretlen meghatározásához; ilyenkor a feladat csak bizonyos segédfeltevés bevonásával végezhető el, például feltételezzük azt, hogy a Φ effektív porozitás lineáris kapcsolatban van a szilárd mátrix homok-, kőzetliszt- és agyagtartalmával. Ilyen feltevésrel élve a karottázs-értékelések pontossága természetesen romlik.



2. ábra – Puc. 2 – Fig. 2

A szilárd mátrix litológiai összetételét a természetes gamma- és a PS-szelvények kombinatív értékelése alapján határozzuk meg a 2. ábrán bemutatott diagram segítségével. Az abszcisszán az $I\gamma$ radioaktivitást ábrázoljuk relatív (i_γ) egységekben, az ordinátán pedig az α PS-csökkenési tényezőt visszük fel. Az ábrán kétparaméteres görbesereg látható; folyamatos vonallal a si kőzetliszt-tartalom, szaggatott vonallal az sh agyagtartalom konstans értékű görbéit ábrázoltuk. Az ábrán a jobb felső sarokpont a tiszta kifejlődésű homokkővet reprezentálja. Az ábrán jobbról balra haladva növekszik a kőzetliszt-tartalom, felülről lefelé haladva pedig nő az agyag mennyisége, tehát az ábrán az abszcissza-tengely felé közeledve (és hasonlóan haladva az ordináta tengely felé) egyre rosszabb tárolókőzetek helyezkednek el.

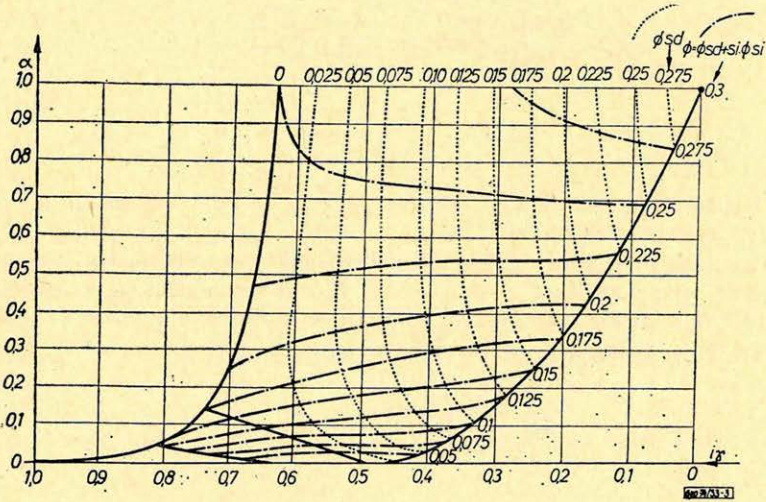
Az effektív porozitást a litológiai összetétel és a magokon mért porozitádatok korrelációs analízise alapján határozzuk meg abban az esetben, ha nem mértek Δt -, R_{x0} - vagy ρ_b - „porozitáskövető” szelvényeket. Erre az ad fizikai alapot, hogy az 1. ábrán bemutatott modellben a Φ effektív porozitás a (8)

egyenlet értelmében a $si \cdot \Phi_{si}$ mikroeffektív és a Φ_{sd} makroeffektív komponensekből tevődik össze. Mivel a tapasztalatok szerint egy geológiai képződményben Φ_{si} állandó, ezért a mikroeffektív-porozitás-komponens a si kőzetlisztartalommal arányos. Ugyanakkor kőzetmintákon végzett laboratóriumi vizsgálataink szerint a Φ_{sd} makroeffektív-porozitás-komponens az sd homokfrakcióval együtt nő, az alábbi egyenletnek megfelelően:

$$\Phi_{sd} = \frac{\Phi_{sd, \max} - sh}{1 - \Phi_{sd, \max}} \cdot sd, \quad (23)$$

ahol: $\Phi_{sd, \max}$ = a tiszta homokkövek (amelyre nézve $si = 0$ és $sh = 0$) effektív porozitásának reprezentatív értéke az adott geológiai képződményben.

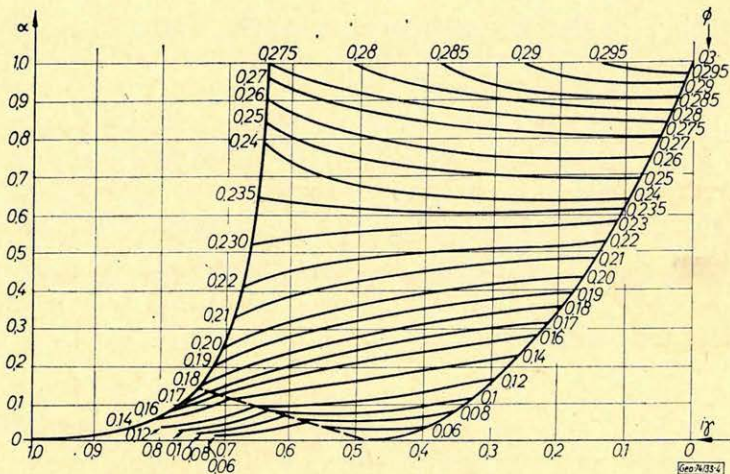
A fentiek értelmében a Φ effektív-porozitás elméleti görbéi megszerkeszthetők a (8) és a (23) egyenletek segítségével a homokkő litológiai összetételének függvényében. A litológiai összetételt – szokás szerint – ismét az $I\gamma$ és az α karottázs-paraméterekkel írva le, a Φ effektív-porozitás elméleti görbéit a 3. ábrán mutatjuk be egy olyan geológiai képződményben, amelyben $\Phi_{sd \max} = 30\%$ és $\Phi_{si} = 25\%$. A 3. ábrán a konstans Φ értékkel jellemzett görbék mellett feltüntettük a Φ_{sd} konstans értékeihez tartozó vonalakat is (az utóbbiakat szaggatott vonallal jelölve).



3. ábra – Puc. 3 – Fig. 3

A 3. ábrán bemutatott Φ görbéket elméleti alapon szerkesztettük. A gyakorlati interpretációs munkához ezt az elméleti görbesereget pontosabbá kell tenni. Ennek érdekében korreláció-analízist végzünk fúrt magokon mért laboratóriumi porozitásértékek (Φ_{lab}) és a természetes gamma-szelvények és a PS -szelvények indikációi között. A korreláció-analízist a matematikai-statisztika megfelelő módszereivel végezzük el. Egy ilyen korrelációs analízis eredményét láthatjuk a 4. ábrán, az algyői Maros-gáztelepek homokköveire vonatkozóan. Látható, hogy a diagramban felülről lefelé haladva az effektív porozitás roha-

mosan csökken. Az ábra alján a szaggatott vonal alatti sávban a homokkő Φ_{sd} makroeffektív pórusteret már teljesen kitöltötte a diszperz agyag, és effektív pórusteret csak a kőzetlisztszemcsék között találunk ($\Phi_{sd} = 0, \Phi = si \Phi_{si}$). A porozitásnak a litológiai összetételből történő becslése természetesen csak viszonylag nagyobb szórással teszi lehetővé a porozitás-értékelést, mivel másodrendű és harmadrendű változók (például a cementáció mértéke, a szemcse-egyenletlenségi tényező nagysága) is befolyásolják az effektív porozitás nagyságát.



4. ábra - Puc. 4 - Fig. 4

A porozitás pontosabb értékeléséhez előnyben kell részesíteni a „porozitáskövető” karottázs-szelvényeket.

A porozitást meg lehet határozni porozitáskövető ellenállás-szelvényekből, így a teljesen vízzel telített homokkővek R_0 ellenállásából és – produktív rétegek esetén – a kiöblített zóna R_{x_0} ellenállásából; így eljárva az értékelés eredményeként $\Phi_{R,C}$ korrigált „elektromos porozitást” kapunk:

$$\Phi_{R,C} = \left(\frac{R_w}{R_0} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot \frac{1}{(1+C)^{1/m}} \quad (24)$$

$$\Phi_{R,C} = \left(\frac{\bar{R}}{R_{x_0}} \right)^{\frac{1}{m}} \frac{1}{(1+C)^{1/m}} \left[\frac{1+C}{S_{x_0}+C} \right]^{\frac{n}{m}} \quad (25)$$

A szónikus Δt paraméterből a $\Phi_{S,C}$ korrigált szónikus porozitást kapjuk:

$$\Phi_{S,C} = \frac{\Delta t - \Delta t_{sd}}{\Delta t_f - \Delta t_{sd}} - sh \frac{\Delta t_{sh} - \Delta t_{sd}}{\Delta t_f - \Delta t_{sd}} - si (1 - \Phi_{si}) \frac{\Delta t_{si} - \Delta t_{sd}}{\Delta t_f - \Delta t_{sd}}, \quad (26)$$

vagy röviden írva

$$\Phi_{S,C} = \Phi_S - sh \cdot C_{sh} - si (1 - \Phi_{si}) C_{si}. \quad (27)$$

A (24) és a (25) képletekből látható, hogy az elektromos porozitás meghatározásakor a C litológiai ható segítségével korrekciót végzünk a kőzetliszt és az agyag hatására; C értéke a tároló kőzetekben $0,05$ és $1,0$ között változik.

A szónikus porozitás (26) és (27) képleteiben szintén korrekciót alkalmazunk a litológiai hatások kiküszöbölésére.

A (27) egyenletben szereplő specifikus korrekciós koeficiensnek a következő értékeket vesszük fel a magyar neogén homokkövekben:

$$\left. \begin{aligned} C_{sh} &= 0,3 - 0,4 \\ C_{si} &= 0,075 - 0,1 \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

Fontos feladat a $\Phi_{s,c}$ szónikus porozitás értékelésekor az sd homokfrakció specifikus Δt_{sd} hullámterjedési idejének meghatározása. Ehhez a Φ_R elektromos porozítások és a Δt szónikus hullámterjedési időértékek korrelációját használjuk fel, grafikus szerkesztés segítségével. A vizsgált fúrólyukban kiválasztunk olyan víztároló homokközönákat, amelyek agyag- és kőzetliszttartalma viszonylag kicsi, tehát amelyeknél a C litológiai ható elhanyagolható $1,0$ mellett a (24) képletben; e zónákban $(R_w/R_0)^{1/m}$ adja meg az elektromos porozitást, és ezt vesszük fel a korrelációs diagram ordinátájára, az abszcisszán feltüntetett Δt hullámterjedési idő függvényében. A vizsgált zónák pontjain és a P_f folyadékponton át regressziós egyenest szerkesztünk, amely a Φ_R elektromos porozitás 0 értékű helyén az abszcisszatengelyből kimetszi a homok specifikus Δt_{sd} hullámterjedési idejét. Megjegyezzük, hogy a P_l folyadékpont koordinátái:

$$\begin{aligned} \Delta t &= \Delta t_f \\ \Phi_R &= 1,0. \end{aligned}$$

A kőzetek mikrostruktúrájába való mélyebb behatolás, a bonyolultabb fizikai-matematikai modellek alapján történő gondolkodás lehetővé teszi azt, hogy olyan újabb rétegfizikai jellemzőket is meghatározzunk a karottázs-paraméterekből, amelyekkel a korábbi, egyszerűbb modellek felhasználásával nem lehetett foglalkozni.

Új elméletünkben a C litológiai ható a fajlagos szemcsefelülettel áll kapcsolatban, mivel a szilárd szemcséket burkoló diffúz ionburkok hatását írja le. Így elméletünk segítségével vállalkozni lehet olyan rétegfizikai jellemzők meghatározására, amik a fajlagos szemcsefelülettel állnak belső kapcsolatban. Ilyen mennyiségek az abszolút permeabilitás, a redukálhatatlan víztelítettség és természetesen maga a fajlagos szemcsefelület.

A fajlagos szemcsefelület és a C litológiai ható közötti kapcsolat – a (2) és a (11) kifejezések fizikai tartalmának elemzése alapján – az alábbi egyenlettel írható le:

$$\begin{aligned} & \frac{sh \cdot \varepsilon_{sh} \cdot \frac{1}{r_{sh}} + si (1 - \Phi_{si}) \varepsilon_{si} \frac{1}{r_{si}} + sd \cdot \varepsilon_{sd} \cdot \frac{1}{r_{sd}}}{\Phi \cdot \frac{1}{R_w}} = \\ & = S_{p,sh} \cdot \overline{\Delta r_{c,sh}} \Big/ \frac{r_{sh}}{R_w} + S_{p,si} \cdot \overline{\Delta r_{c,si}} \Big/ \frac{r_{si}}{R_w} + S_{p,sd} \cdot \overline{\Delta r_{c,sd}} \Big/ \frac{r_{sd}}{R_w} = \\ & = S_p \cdot \overline{\Delta r_c} \Big/ \frac{r_s}{R_w} = C, \end{aligned} \quad (29)$$

ahol:

$\varepsilon_{sh}, \varepsilon_{si}, \varepsilon_{sd}$ = az agyag-, a kőzetliszt- és a homokszemcsék adszorpciós hidrátburkainak relatív térfogatai;

$\frac{1}{r_{sh}}, \frac{1}{r_{si}}, \frac{1}{r_{sd}}$ = az agyag-, a kőzetliszt- és a homokszemcsék hidrátburkainak fajlagos elektromos vezetőképességei;

$S_{p, sh}, S_{p, si}, S_{p, sd}$ = az agyag-, a kőzetliszt és a homok fajlagos szemcsefelületei, a Φ effektív pórustérre vonatkoztatva;

$\overline{\Delta r_{c, sh}}, \overline{\Delta r_{c, si}}, \overline{\Delta r_{c, sd}}$ = az agyag-, a kőzetliszt- és a homokszemcsék adszorpciós hidrátburkainak átlagos vastagságai;

S_p = a homokkő fajlagos szemcsefelülete a Φ effektív pórustérre vonatkoztatva;

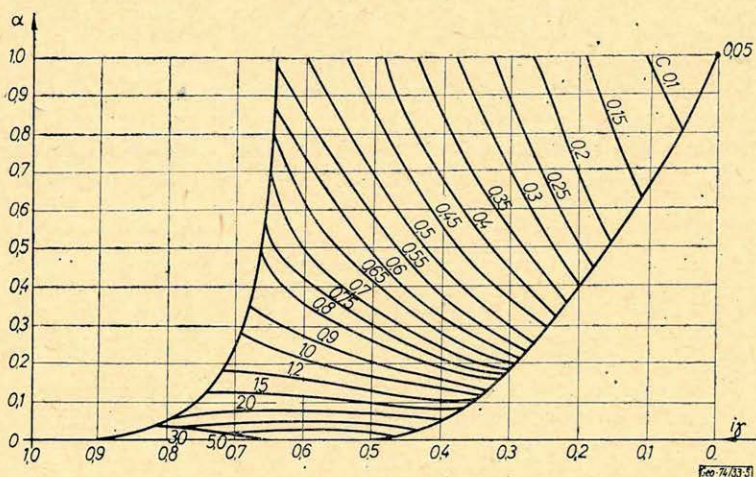
$\overline{\Delta r_c}$ = a kőzetszemcsék hidrátburkainak átlagos vastagsága;

$\frac{1}{r_s}$ = a kőzetszemcsék hidrátburkainak átlagos fajlagos elektromos vezetőképessége.

A fenti egyenletből S_p így fejezhető ki C függvényében:

$$S_p = C \cdot \frac{\overline{r_s}}{\overline{R_w} \overline{\Delta r_c}} = C \cdot u. \quad (30)$$

A (30) összefüggés alapján megállapítható, hogy az S_p fajlagos szemcsefelület együtt növekszik a C litológiai hatóval, így S_p meghatározható a C karottázis-paraméterből. Ehhez mindössze a (30) egyenlet jobb oldalán a C litológiai ható (ω) koefficiensét kell meghatározni empirikus úton, pl. fúrt magokon mért S_p fajlagos szemcsefelület-értékek és az ugyancsak a magokon mért C litológiai ható-értékek közötti korreláció-analízis alapján.



5. ábra – Puc. 5 – Fig. 5

Az 5. ábrán bemutatjuk a C litológiai ható változását a litológiai összetétel függvényében, a Maros gáztároló homokkőre vonatkozóan. A litológiai összetélt ismét az i , és α karottázs-paraméterek kombinációja alapján vesszük figyelembe. A (30) képlet alapján arra a következtetésre lehet jutni, hogy a Maros homokkővek S_p fajlagos szemcsefelülete az 5. ábrán látható trendnek megfelelően növekszik a litológiai összetétel romlásával, vagyis a kőzetliszt- és az agyag-komponensek növekedésével.

A homokkővek abszolút permeabilitása (k) a Kozeny – Carman egyenleten keresztül kapcsolatban van a fajlagos szemcsefelülettel:

$$k = \frac{\Phi}{t_K \cdot S_p^2}, \quad (31)$$

ahol: t_K a Kozeny-tényező; értéke

$$t_K = t_0 \cdot T, \quad (32)$$

t_0 az ún. alaktényező, amelynek értéke a homokkővekben Carman mérései szerint átlagosan

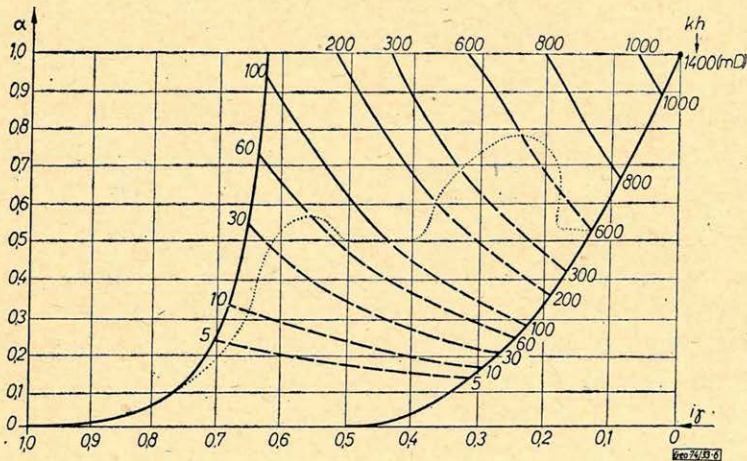
$$t_0 \cong 2,5, \quad (33)$$

T pedig a porüstér tortuozitása:

$$T = \left(\frac{l_e}{l} \right)^2. \quad (34)$$

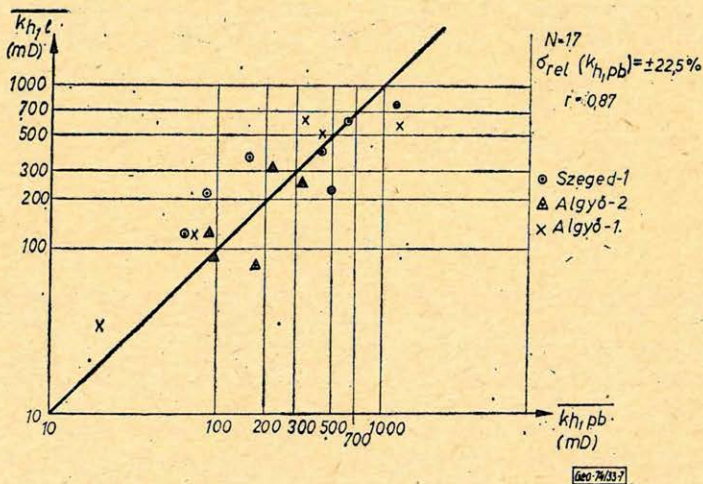
A (30) alapján bevezetve a C litológiai hatót S_p helyére a (31) egyenletben, az abszolút permeabilitás és a litológiai ható közötti kapcsolatra az alábbi kifejezést kapjuk:

$$K = \frac{\Phi}{t_0 \cdot T \frac{\left(\frac{r_s}{R_w} \right)^2}{\Delta r_c^2} \cdot C^2}. \quad (35)$$



6. ábra – Puc. 6 – Fig. 6

A (35) egyenlet lehetőséget ad arra, hogy meghatározzuk a k abszolút permeabilitást a karottázs-értékelésből kapott Φ effektív porozitásból és C litológiai hatóból. Mivel e két utóbbi mennyiség alapvetően függ a homokkövek litológiai összetételétől, ezért a (35) egyenleten keresztül a k korrelációs kapcsolatba hozható a litológiai kifejlődést tükröző természetes gamma-aktivitással és az α PS-csökkenési tényezővel. A kapcsolat elméleti trendjét meghatározza a (35) egyenlet, konkrét numerikus formáját pedig például magokon mért abszolút permeabilitások és az i , és α karottázs-paraméterek közötti korrelációs vizsgálat segítségével határozhatjuk meg; erre látunk példát a 6. ábrán az algyői Maros-gáztelepek homokköveire vonatkozóan. Látható, hogy míg a tiszta homokkövek permeabilitása 1000 mD nagyságrendű, addig a kőzetliszt-tartalom és az agyagtartalom növekedésével a permeabilitás rohamosan csökken. Az ábrán pontozással jelölt görbe alatti területsávban nem álltak rendelkezésünkre kőzetmintákon mért permeabilitásadatok, ezért a korrelációs kapcsolatot e területsávban a (35) elméleti függvény alapján extrapolálással határoztuk meg. Az ismertetett eljárással a karottázs-szelvényekből meghatározott $\overline{k_{h,l}}$ átlagos horizontális permeabilitások igen jó összhangban vannak a kutakban hidraulikai vizsgálatok segítségével, a nyomásemelkedés görbéiből mért meghatározott $\overline{k_{h,pb}}$ átlagos hidraulikai permeabilitásokkal. Erre látunk gyakorlati példát a 7. ábrán 3 algyői olajtermelő telep 17 hidraulikai vizsgálatát alapján. Az ábrából látható, hogy a karottázs-kiértékelés segítségével meghatározott permeabilitások csak a gyakorlati követelmények szempontjából megengedett mértéken belül térnek el a hidraulikai vizsgálatok segítségével nyert permeabilitásoktól.



7. ábra - Puc. 7 - Fig. 7

A T tortuozitás fontos szerepet tölt be a hidraulikai egyenletekben, ezért ezt a mennyiséget is meghatároztuk új elméletünkben, és az alábbi kifejezéseket kaptuk:

$$T = \left(\frac{l_e}{l}\right)^2 = F_{\text{mért}} \cdot \Phi (1 + C), \quad (36)$$

ahol: $F_{\text{mért}}$ = a mérés útján meghatározott formációfaktor.

T -re olyan kifejezést is kaptunk, amelyben csak a Φ porozitás szerepel:

$$T = \frac{1}{\Phi^{(m-1)}}. \quad (37)$$

A vízzel telített homokkő R_0 fajlagos elektromos ellenállását leírtuk a T tortuozitás segítségével:

$$R_0 = R_w \cdot \frac{1}{\Phi} \cdot T \cdot \frac{1}{1+C}. \quad (38)$$

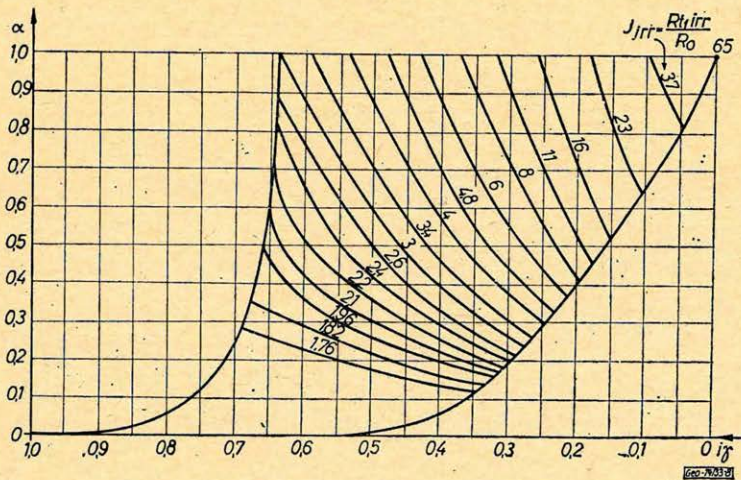
Fel kell hívni a figyelmet arra, hogy az elektromos ellenállásméréssel meghatározott tortuozitás a homokkövekben rendszerint nagyobb, mint a hidraulikai méréssel kapott érték, mivel az elektromos töltéstranszportban részt vevő ionok olyan – általában tekervényesebb – utakon is tudnak közlekedni, amelyek mentén folyadékmolekulák áramlása nem valósulhat meg, vagyis

$$T_{\text{elektromos}} \geq T_{\text{hidraulikai}}. \quad (39)$$

A fenti összefüggésről nem szabad megfeledkezni a hidraulikai egyenletek alkalmazásakor, ha a bennük szereplő tortuozitást elektromos méréssel határoztuk meg.

A vízszaturáció meghatározásakor a szénhidrogének jelenlétét a homokkő fajlagos elektromos ellenállásának megnövekedése jelzi. Új elméletünkben a produktív homokkövek I ellenállás-növekedési indexét a (16) egyenlet jobb oldalának utolsó tényezője írja le:

$$I = \left(\frac{1+C}{S_w+C} \right)^n. \quad (40)$$



8. ábra – Puc. 8 – Fig. 8

A képlet alapján látható, hogy a C litológiai ható értékének növekedésével az I csökkenése várható. Ezt igazolja a 8. ábra, amelyen az algyői Maros-gáztelepek produktív zónáira vonatkozóan láthatjuk az ellenállás-növekedési index és a

litológiai összetétel közötti kapcsolatot. A diagramból kitűnik, hogy míg a tiszta homokkövekben I értéke átlagosan 65, addig ez az érték rohamosan csökken a kőzetliszt- és az agyagtartalom növekedésével olyan mértékben, hogy a rossz kifejlődésű tárolókőzetekben I értéke 2-nél kisebb. Látható, hogy milyen nehéz kimutatni a produktív szénhidrogének jelenlétét a nagy kőzetliszt (és agyag-) tartalmú homokkövekben.

Új elméletünkben a víztelítettséget a következő képlet segítségével határozzuk meg:

$$S_w = \left(\frac{R_0}{R_t} \right)^{1/n} - C \left[1 - \left(\frac{R_0}{R_t} \right)^{1/n} \right], \quad (41)$$

ami röviden így írható:

$$S_w = S_{wa} - C(1 - S_{wa}), \quad (42)$$

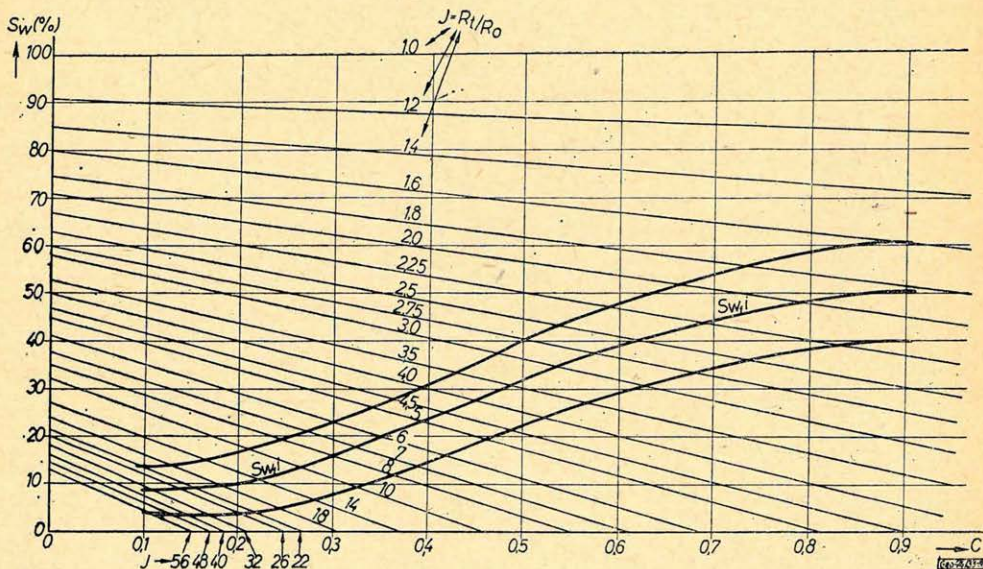
ahol:

S_{wa} = a „látszólagos” vízsaturáció; az eredeti Archie-képlet alapján

$$S_{wa} = \left(\frac{R_0}{R_t} \right)^{1/n}. \quad (43)$$

Látható a fenti képletből, hogy a (41) egyenlet jobb oldalán a második tag korrekciót végez a vízsaturáció „látszólagos” értékén a homokkő kőzetliszt- és agyagtartalmának hatása ellen.

Az S_w víztelíttség önmagában még nem árulja el azt, hogy a homokkő tartalmaz-e mozgékony vizet, mivel a redukálhatatlan víztelíttség nagysága jelentősen függ a homokkő litológiai kifejlődésétől: a kőzetliszt- és az agyagtartalom növekedésével az S_{wi} redukálhatatlan víztelíttség növekszik. Ezt



9. ábra - Puc. 9 - Fig. 9

az összefüggést láthatjuk a 9. ábrán az algyői Maros-gáztelepek produktív zónáira vonatkozóan. Az ábra ordinátáján a karottázs-értékelés alapján kapott S_{wi} értéket ábrázoltuk a C litológiai ható függvényében. A tiszta homokkövekben S_{wi} átlagosan 8%, és ez az érték monoton növekszik kb. 50%-ig a C litológiai ható növekedésével. A 9. ábrán egyenes vonalakkól álló görbeseregeket is látunk, amelyeknek paramétere az I ellenállás-növekedési index. Ez az ábra tulajdonképpen grafikus megoldást nyújt a (41) egyenlet alapján az S_w vízszaturáció meghatározására: az abszcisszán belépve a C litológiai ható értékével és az ordináta vonal mentén felmenve az I aktuális értékének megfelelő ferde egyenes vonalig, majd a kapott metszéspontból vízszintes abszcissza vonal mentén elmenve az S_w tengelyig leolvashatjuk a vizsgált zóna jellemző víztelítettségi értékét.

A homokkövek redukálhatatlan víztelítettsége kapcsolatba hozható a C litológiai hatóval, mivel utóbbi – (30) szerint – együtt növekszik az S_p fajlagos szemcsefelülettel, ami viszont közismerten elsőrendűen determinálja a redukálhatatlan víztelítettséget:

$$S_{wi} = B_1 \cdot S_p + B_2, \quad (44)$$

ahol: B_1 és $B_2 =$ függvénykonstansok.

Behelyettesítve a (30) összefüggést a (44) egyenletbe, a redukálhatatlan víztelítettség és a litológiai ható között a következő összefüggést kapjuk:

$$S_{wi} = B_1 \frac{\frac{\bar{r}_s}{R_w}}{\Delta r_c} \cdot C + B_2. \quad (45)$$

(45) szerint S_{wi} együtt nő C -vel, és ez jut kifejezésre a 9. ábrán bemutatott empirikus korrelációs kapcsolatban.

A redukálhatatlan víztelítettséget a (44) egyenleten keresztül kapcsolatba hozhatjuk a porozitással és az abszolút permeabilitással. Ehhez a (31) Kozeny–Carman-egyenletből kifejezzük a fajlagos szemcsefelületet, és a tortuozitást (37) szerint vesszük figyelembe:

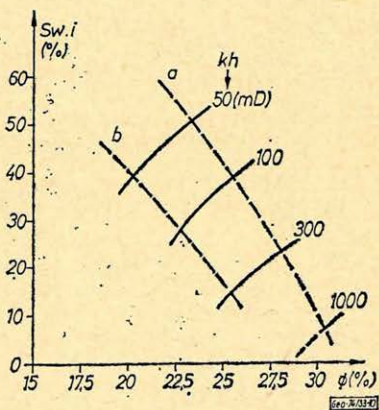
$$S_p = \left(\frac{\Phi^m}{t_0 \cdot k} \right)^{1/2}. \quad (46)$$

A (46) összefüggést bevezetve a (44) képletbe:

$$S_{wi} = B_1 \cdot \left(\frac{\Phi^m}{t_0 \cdot k} \right)^{1/2} + B_2. \quad (47)$$

A (47) összefüggés kapcsolatot teremt S_{wi} , Φ és k között.

E kapcsolat azt mutatja, hogy adott porozitás mellett S_{wi} értéke k növekedésével $1/\sqrt{k}$ szerint csökken, továbbá, hogy adott permeabilitás mellett S_{wi} értéke Φ növekedésével $\Phi^{m/2}$ szerint növekszik. Ezt az összefüggést alátámasztja a 10. ábrán bemutatott empirikus korrelációs anyag, amit az algyői Maros-

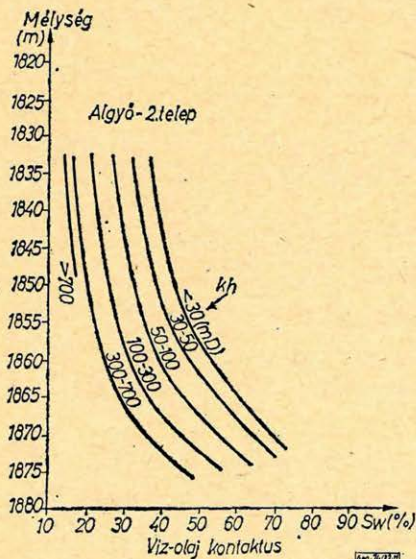


10. ábra – Рис. 10 – Fig. 10

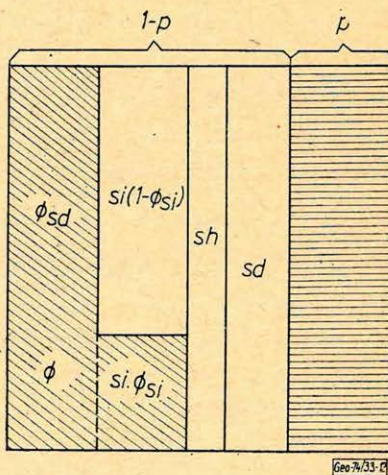
gáztelepek homokköveinek karottázs-értékelése alapján állítottunk össze. Az ábrán az a és b jelű görbék annak a területsávnak a határait jelölik, amelyen belül elhelyezkedett az interpretált zónák 90%-a. A grafikon szerint S_{wi} értéke 4% és 60% között változik a homokkövek litológiai kifejlődésétől függően.

Az S_{wi} redukálható víztelítettség, a Φ effektív porozitás és a k abszolút permeabilitás közötti függvénykapcsolatot leíró (47) egyenletünkre vonatkozóan hangsúlyozzuk azt, hogy az egyenlet szerint konstans k permeabilitás mellett Φ növekedésével S_{wi} növekedése $\Phi^{m/2}$ hatványa szerint történik. Mivel $m/2$ általában kisebb 1-nél, ezért a 10. ábra grafikonján a konstans k értékhez tartozó görbék a lineáris menetnél lassabban növekednek, vagyis Φ növekedésével lefelé hajlanak; ez teljesen megegyezik azokkal a görbékkel, amiket legutóbb a Schlumberger Well Services, Houston kutatói, J. L. Dumanoir és G. R. Coates közöltek [12]. Ez jelentős eltérést képvisel elméleti szempontból a Schlumberger Well Services korábbi publikációihoz [4] és Timur [13] görbéihez képest. Örömmel állapítjuk meg, hogy két különböző kutatóhely képviselői, Dumanoir úr és munkatársai, továbbá a magyar olajbányászat karottázslaboratóriuma elméleti szempontból ugyanarra az eredményre jutottak az $S_{wi} - \Phi - k$ mennyiségek közötti korrelációs kapcsolatra vonatkozóan.

Miként ismeretes, az olaj-víz érintkezési határ, valamint a gáz-víz érintkezési határ feletti rétegszakaszokban átmeneti zóna alakul ki a víz kapilláris felszívódása következtében. Az átmeneti zóna vastagsága különösen nagy lehet az olaj-víz érintkezési határ feletti teleprészekben. A karottázs-szelvények alapján végzett víztelítettség-számítások pontosságát meg lehet ítélni annak alapján, hogy mennyire helyesen mutatják meg a karottázs-értékelésből kapott víztelítettségek a kapilláris erők által felszívódott többlet víztelítettséget. Ismeretes, hogy a többlet-víztelítettség annál nagyobb, minél kisebb a homokkövek permeabilitása. A 11. ábrán bemutatjuk azt, hogy az algyői mező *Algyő-2* nevű olajtároló rétegében – általunk a karottázs-értékeléssel – meg-



11. ábra – Puc. 11 – Fig. 11



12. ábra – Puc. 12 – Fig. 12

határozott víztelítettségek hogyan változnak az olaj – víz határról felfelé haladva, és hogy a víztelítettség változása miként függ a homokkővek permeabilitásától. A 11. ábra görbéin látható, hogy az olaj – víz kontaktus-felülettől felfelé haladva az S_w víztelítettség folyamatosan csökken és egy aszimptotikus érték felé tart, ami az S_{wi} redukálható víztelítettségnek felel meg. Az ábrából is látható, hogy egy adott mélységi helyen a víztelítettség annál nagyobb, minél kisebb a homokkő permeabilitása. Úgy véljük, hogy a 11. ábra görbéi, amiket többszáz karottázs-kiértékelés alapján szerkesztettünk, víztelítettség-értékeink helyességét mutatják.

Az impermeábilis márgacsíkok hatása a karottázs-paraméterekre az anizotrop, „szendvics”-típusú homokkőekben

Magyarországon a szénhidrogéntároló neogén homokkőekben nagy mennyiségben jelen levő impermeábilis márgacsíkok sok problémát okoznak a karottázs-kiértékelési munkák során, különösen a víztelítettség értékelésekor. Ennek alapvető oka abban jelölhető meg, hogy a márgacsíkok elektromos vezetése jelentős nagyságú a permeábilis homokkővek elektromos vezetéséhez képest még akkor is, ha a márgacsíkok viszonylag kis relatív mennyiségben vannak jelen. A nagy elektromos vezetést az okozza, hogy a márgacsíkok R_{imp} fajlagos elektromos ellenállása $2-5\text{ ohmm}$, ami igen alacsony még a vizes homokkővek elektromos ellenállásához képest is; utóbbi ($R_{o,s}$) $6-12\text{ ohmm}$ között változik. Ez az arány még inkább eltolódik a szénhidrogéntároló homokkővek esetén. A márgacsíkok nagy fajlagos elektromos vezetőképessége általánosan jellemző Magyarországon és a környező országokban a fiatal korú neogén homokkő-márga képződményekre, mivel itt a kőzetek meglehetősen lazák, a konszolidáció szintje alacsony, és ugyanekkor a rétegvizek sótartalma szintén alacsony.

Az anizotrop, szendvics-típusú homokkővek karottázs-paramétereinek leírására a 12. ábrán látható kőzetmodellt alkalmazzuk. Ebben p jelenti az impermeábilis képződmény relatív térfogatát, $(1-p)$ pedig a permeábilis homokkővek térfogatát írja le. Az $(1-p)$ térfogatú homokkő-komponenst e modellben is felbontjuk sd homok, sh agyag és $si(1-\Phi_{si})$ kőzetliszt komponensekre. A szendvics-homokkő összetételét az alábbi térfogati anyagmérleg írja le:

$$p + (1-p) \cdot [sd + sh + si(1-\Phi_{si}) + \Phi] \equiv 1, \quad (48)$$

ahol a szögletes zárójelen belüli mennyiség most is $1,0$ -val egyenlő, miként azt korábban már láttuk a (15) egyenlettel kapcsolatban.

A szendvics-homokkővek ellenállásszelvényezése terén a fő problémát az okozza, hogy a jelenleg használatos ellenállásszelvényező módszerek a rétegzettséggel párhuzamos R_L longitudinális ellenállást mérik, amit igen nagy mértékben lecsökkentenek a jól vezető márgacsíkok akkor, ha a rétegződés síkja közel merőleges a fúróluk tengelyére.

A longitudinális ellenállás az alábbi képlettel írható le:

$$\frac{1}{R_L} = \frac{p}{R_{imp}} + \frac{(1-p)}{R_s}, \quad (49)$$

ahol: R_s = a permeábilis homokkő fajlagos elektromos ellenállása, amit a szendvics-homokkőekben is a (3) képlettel írunk le.

A szendvics-homokkövek α PS-csökkenési tényezőjére az alábbi képletet vezettük le:

$$\alpha = \alpha_s - (\alpha_s - \alpha_{imp}) \cdot p, \quad (50)$$

ahol: α_s = a permeábilis homokkő PS-csökkenési tényezője, amit korábban már leírtunk az (5) képlettel,
 α_{imp} = a szendvics-homokkőbe betelepült impermeábilis márgacsíkok PS-csökkenési tényezője; ennek értéke közel áll a θ -hoz, és mindig kisebb $\theta, 2$ -nél a tapasztalatok szerint; értékét a szomszédos márgarétegekből vesszük.

A (49) és (50) képletekkel kapcsolatban néhány szót kell szólni az impermeábilis márgacsíkok összetételéről és mélyfúrású geofizikai jellemzőiről. Egy korábbi fejezetben, a magyar neogén homokkövek kőzettani kifejlődésével kapcsolatban már említettük, hogy a szendvics-homokkövekbe betelepült impermeábilis csíkok tulajdonképpen agyagásványok, kőzetliszt és karbonátok különböző arányú keverékéből képződnek. A 2. ábrán bemutatott litológiai diagramon ezek az impermeábilis képződmények az $\alpha=0,2$ értékhez tartozó abszcissza vonal alatt helyezkednek el, rendszerint közel az $\alpha=0$ tengelyhez.

Az impermeábilis márgacsíkok geofizikai jellemzői természetesen függenek a kőzettani összetételtől és annak változásával a karottázs-paraméterek jelentős változásokat mutatnak. Így például az R_{imp} fajlagos ellenállás csökken az agyagásványok mennyiségének növekedésével, ugyanakkor R_{imp} növekszik a karbonátok mennyiségének növekedésével. Megjegyezzük, hogy 2. ábra litológiai diagramján az impermeábilis márgapont helye az I_s skálán a nagyobb értékek felé tolódik az agyagásványok mennyiségének növekedésével.

A szendvics-homokkövek I_s radioaktivitása, Φ_n neutron-porozitása, Δt szónikus hullámterjedési ideje és ρ_b közetsűrűsége az alábbi képlettel írható le, közös A szimbólumot használva e mennyiségekre:

$$A = p \cdot A_{imp} + (1 - p) \cdot A_s, \quad (51)$$

ahol: A_{imp} = impermeábilis márgacsíkok megfelelő geofizikai jellemzője ($I_{s, imp}$, $\Phi_{n, imp}$, Δt_{imp} és $\rho_{b, imp}$)
 A_s = a permeábilis homokkövek megfelelő geofizikai jellemzője, amit már korábban leírtunk a (14) képlettel.

Az anizotrop, szendvics-típusú homokkövek tárolóparamétereinek értékelése a kútszelvények segítségével

A szendvics-homokkövek értékelése természetesen még bonyolultabb feladatot jelent, mint az izotrop permeábilis homokkövek értékelése. E feladat kielégítően pontos megoldásához még sokat kell tenni, különösen a megfelelő kútszelvényezési módszerek kifejlesztése és alkalmazása terén. Magyarországon a neogén szénhidrogéntároló homokkövek karottázs-kiértékelési munkáiban a legutóbbi hónapokban sokat fáradoztunk e feladatok megoldásán. E tanulmány keretében most röviden bemutatom a szendvics-homokkövek karottázs-értékelésével kapcsolatos főbb elképzeléseinket és eredményeinket.

A (48), (49), (50) és (51) képletek alapján nyilvánvaló, hogy az első és legfontosabb feladat az impermeábilis márgacsíkok p relatív térfogatának a meghatározása. Ismeretes, hogy a karottázs-szelvényező szervíz-társaságok a nyugati országokban erre a célra bizonyos szelvénykombinációkat alkalmaznak, első-

sorban a porozitáskövető szelvények együttes alkalmazásával. A magyarországi neogén homokkövekben azt tapasztaltuk, hogy az impermeábilis márgákban a szónikus hullámok terjedési ideje, a kőzetsűrűség és a neutron-porozitás (vagy más szóval a hidrogénindex) nem képvisel állandó értéket még egy adott geológiai képződményben sem, ezért a porozitáskövető szelvények kombinatív alkalmazása az impermeábilis márgacsíkok p relatív térfogatának meghatározására nehézségekkel jár. Részben ezért mi más úton járunk jelenleg a p mennyiség meghatározásában: a mikrologot, pontosabban a *mikronormál görbét alkalmazzuk erre a célra*. A közelmúlt hónapokban végzett több száz gyakorlati alkalmazás azt mutatta, hogy ez az út járható, annak ellenére, hogy a mikrolog kvantitatív alkalmazásával szemben az elmúlt 20 év folyamán jogos kétségek merültek fel, azonban szeretnénk hangsúlyozni azt, hogy ezek a kétségek a porozitás kvantitatív meghatározása szempontjából merültek fel.

A másik ok, ami miatt p meghatározására előnyben részesítjük a fajlagos ellenállás-paramétert az, hogy a márgacsíkok jelenléte legnagyobb mértékben a víztelítettség értékelését sújtja, és a víztelítettség meghatározásához az alapvető paraméter a homokkövek R_i tényleges ellenállása. Ezért célszerű a p mennyiséget ugyancsak ellenállás típusú karottázs-szelvényből meghatározni, mivel mi elsősorban arra vagyunk kíváncsiak, hogy az impermeábilis márgacsíkok jelenléte milyen mértékben módosítja a szendvics-homokkő *fajlagos elektromos ellenállását*. Úgy gondoljuk, nem célszerű ezt a hatást egészen más típusú karottázs-paraméterek elemzése alapján meghatározni, mivel a hidrogénindex, a kőzetsűrűség, a szónikus hullámterjedési idő olyan mennyiségek, amelyek nem állanak közvetlen, szoros korrelációs kapcsolatban a fajlagos elektromos ellenállással.

A mikronormál ellenállás-görbe indikációja a szendvics-homokkövekben az alábbi egyenlettel közelíthető:

$$\frac{1}{R_{MN}} = \frac{1}{R_{MN, imp}} + \frac{1-p}{R_{MN, s}}, \quad (52)$$

ahol: R_{MN} = a vizsgált homokkőben a mikronormál görbe indikációinak harmonikus középértéke,

$R_{MN, imp}$ = a mikronormál görbe indikációinak harmonikus középértéke a szendvics-homokkővet ágyazó impermeábilis márgában,

$R_{MN, s}$ = a mikronormál görbe indikációinak reprezentatív értéke a szendvics-homokkővet tartalmazó homokkő-formáció egy olyan szakaszán, amelyben nincsenek márgacsíkok.

Az (52) egyenletből kifejezhető p és az így kapott alábbi egyenletet használjuk az impermeábilis márgacsíkok p relatív térfogatának a meghatározására:

$$p = \frac{\frac{1}{R_{MN}} - \frac{1}{R_{MN, s}}}{\frac{1}{R_{MN, imp}} - \frac{1}{R_{MN, s}}}. \quad (53)$$

A szendvics-homokkövek karottázs-értékelésének második fő lépése abban áll, hogy meg kell határozni a szendvics-homokkő permeábilis homokkő-komponensének litológiai összetételét, tehát a homokkő csíkok homok-, kőzetliszt- és disz-

perz agyagtartalmát. E feladatot ismét a természetes gamma és a *PS*-paraméterek kombinatív felhasználásával, a 2. ábra litológiai diagramjának segítségével végezzük el. Ehhez a szendvics-homokkövekben észlelt i_γ relatív gamma-intenzitásból és a p mennyiségből meg kell határozni a permeábilis homokkőcsíkokra jellemző $i_{\gamma, s}$ értéket, hasonlóan a szendvics-homokkő α *PS*-csökkenési tényezőjéből és p -ből meg kell határozni a permeábilis homokcsíkokra jellemző α_s értékét.

Az (51) képlet alapján a szendvics-homokkő I_γ gamma-intenzitása így írható

$$I_\gamma = p \cdot I_{\gamma, \text{imp}} + (1 - p) \cdot I_{\gamma, s}, \quad (54)$$

ahol: $I_{\gamma, \text{imp}}$ = az ágyazó márga gamma-intenzitása,
 $I_{\gamma, s}$ = a permeábilis homokkőcsíkok gamma-intenzitása.

Az i_γ relatív gamma-intenzitás – definíciószerűen – így írható le:

$$i_\gamma = \frac{I_\gamma - I_{\gamma, sd}}{I_{\gamma, sh} - I_{\gamma, sd}}, \quad (55)$$

ahol: $I_{\gamma, sd}$ = az impermeábilis agyag gamma-intenzitása, ami megfelel a legtisztább agyagképződmények maximális gamma-intenzitásának,

$I_{\gamma, sh}$ = a tiszta kifejlődésű agyag- és kőzetliszt-mentes homokkő gamma-intenzitása, ami megfelel a gamma-szelvény minimális amplitúdójú értékeinek.

Behelyettesítve (55)-be I_γ (54) alatti kifejezését, az alábbi egyenletet kapjuk:

$$i_\gamma = p \cdot \frac{I_{\gamma, \text{imp}} - I_{\gamma, sd}}{I_{\gamma, sh} - I_{\gamma, sd}} + (1 - p) \cdot \frac{I_{\gamma, s} - I_{\gamma, sd}}{I_{\gamma, sh} - I_{\gamma, sd}} = p \cdot i_{\gamma, \text{imp}} + (1 - p) \cdot i_{\gamma, s}, \quad (56)$$

ahol: $i_{\gamma, \text{imp}}$ = a szendvics-homokkőben levő márgacsíkok relatív gamma-intenzitása,

$i_{\gamma, s}$ = a szendvics-homokkőben levő permeábilis homokkőcsíkok relatív gamma-intenzitása.

Az (56) egyenletből kapjuk a szendvics-homokkőben levő permeábilis homokkőcsíkok relatív gamma-intenzitását:

$$i_{\gamma, s} = \frac{i_\gamma - p \cdot i_{\gamma, \text{imp}}}{1 - p}. \quad (57)$$

A szendvics-homokkő permeábilis-homokkő-csíkjainak α *PS*-csökkenési tényezőjét az (50) egyenletből kapjuk:

$$\alpha_s = \frac{\alpha - p \cdot \alpha_{\text{imp}}}{1 - p}. \quad (58)$$

Miután megkaptuk az (57) és (58) képletek segítségével a szendvics-homokkő permeábilis homokkőcsíkjainak $i_{\gamma, s}$ és α_s jellemzőit, ezekkel a koordinátákkal belépünk a 2. ábra litológiai diagramjának abszcisszájára és ordinátájára, majd az ábra görbéiről leolvassuk a permeábilis homokkő csíkok kőzet-

liszt- és diszperzagyag tartalmát. Így ismeretessé válik a permeábilis-homokkőcsíkok litológiai összetétele és mód nyílik arra, hogy meghatározzuk a permeábilis homokkőcsíkok tároló paramétereit, az effektív porozitást, a víztelítettséget stb.

A *permeábilis homokkőcsíkok* Φ effektív porozitásának meghatározása során elvégezzük a szükséges litológiai korrekciókat, amennyiben a porozitást valamely porozitáskövető karottázás-szelvény indikációjából értékeljük. Így például ha a szónikus Δt terjedési időt használjuk erre a célra, akkor a (26) képletet alkalmazzuk, azonban az abban szereplő Δt mennyiség helyére most a homokkőcsíkokra jellemző Δt_s értéket írjuk, amit az (51) képlet alapján határozzunk meg, a Δt paraméter esetében konkrétan az alábbi formulát alkalmazva:

$$\Delta t_s = \frac{\Delta t - p \cdot \Delta t_{imp}}{1 - p} \quad (59)$$

Ha nem áll rendelkezésre porozitáskövető szelvény, akkor a homokkőcsíkok effektív porozitását ismét a természetes gamma és a *PS*-szelvények kombinatív értékelése alapján, a 4. ábrán látható Φ -görbesereg segítségével határozzuk meg, belépve a diagramba az (57) és (58) képletekkel leírt $i_{v,s}$ és α_s koordinátákkal.

A *szendvics-homokkő permeábilis homokkőcsíkjainak víztelítettséget* a szendvics-homokkő R_L longitudinális ellenállásából kiindulva határozzuk meg. Ehhez a (49) képletből kifejezzük a permeábilis homokkőcsíkok R_s ellenállását:

$$R_s = \frac{1 - p}{\frac{1}{R_L} - \frac{p}{R_{imp}}} \quad (60)$$

A (60) képlet alkalmazásakor p helyére bevezetjük azt az értéket, amit a mikronormál ellenállás-szelvényből az (53) formula segítségével kaptunk. A (60) képlet alkalmazásával kapcsolatban meg kell jegyezni azt, hogy abban R_{imp} a szendvics-homokkővet ágyazó impermeábilis márgák reprezentatív ellenállását jelenti. R_{imp} -nek ezt az értékét *ugyanazzal az ellenállás-szelvényezési módszerrel* kell meghatározni, amellyel a szendvics-homokkő R_L longitudinális ellenállását nyertük.

Miután R_s értékét meghatároztuk a (60) képlet segítségével, az S_w víztelítettség értékeléséhez bevezetjük azt a (41) képletbe, R_t helyére. A (41) képlet alkalmazásához a permeábilis homokkőcsíkok R_0 ellenállását — teljes víztelítettség mellett — az (1) képlet segítségével számítjuk, a homokkőcsíkok Φ effektív porozitásának és litológiai összetételének figyelembevételével.

Az értékelés során nyert S_w víztelítettséget összehasonlítva az $S_{w,i}$ redukálhatatlan víztelítettséggel, meghatározzuk azt a *többlet víztelítettséget, ami kapilláris felemelkedés útján szívódott fel a pórustérbe* azokban az esetekben, amikor a talpi víz elég közel helyezkedik el a vizsgált homokkő-intervallumhoz.

Szeretnénk hangsúlyozni, hogy azokban az esetekben, amikor a szendvics-homokkőekben az impermeábilis képződmények elektromos vezetése túlságosan nagy a permeábilis homokkő-komponensek elektromos vezetésehez képest, a szendvics-homokkő R_L longitudinális ellenállása nem alkalmazható kielégítő eredménnyel a tároló-paraméterek, elsősorban a víztelítettség meg-

határozásához. Ezt a problémát már 1967-ben felvettem a 7. Kőolajipari Világkongresszuson, Mexikó Cityben [14]. Akkor rámutattam arra, hogy azokban az esetekben, amikor

$$\frac{p}{1-p} \cdot \frac{R_{0,s}}{R_{\text{imp}}} > 1, \quad (61)$$

a szendvics-homokkő longitudinális ellenállása már nem alkalmas kvantitatív értékelésnek céljára. A magyar neogén homokkövekben ez a helyzet áll elő akkor, ha $p > 0,25$, tehát már viszonylag alacsony relatív márgacsík-tartalom mellett. Ezekben az esetekben a víztelítettség és más tároló-paraméterek meghatározásához a szendvics-homokkövek rétegzettségére merőleges R_T transzverzális ellenállását kellene felhasználni. Nagyon kívánatos volna ilyen ellenállásmérő rendszer létrehozása és alkalmazása azokban a szendvics-homokkövekben, amelyek lazák, vagy gyengén konszolidáltak és amelyekben a rétegvíz sókoncentrációja alacsony.

Fontos és nehéz probléma a szendvics-homokkövekben a gáztároló és az olajtároló intervallumok szétválasztása, a gáz-olaj kontaktus helyének kijelölése. Ezt a feladatot az impermeábilis márgacsíkok jelenléte nagyon megnehezíti. A feladat megoldására egy grafikus korrelációs módszert találtunk a leghatékonyabbnak. Korrelációs diagramban ábrázoljuk a szendvics-homokkövek longitudinális fajlagos elektromos ellenállásának függvényében a neutron-szelvény indikációit. Ezekhez a longitudinális fajlagos elektromos ellenállás számára logaritmikus léptéket, a neutron-indikációk számára pedig lineáris (aritmetikus) léptéket alkalmazunk. A korrelációs diagramon a gáztároló zónák pontjainak sávja eltolódik az olajtároló zónák pontjainak sávjához képest a nagyobb neutron-indikációk irányába. Az eltolódás mértéke azonban egyre kisebbé válik az impermeábilis márgacsíkok p térfogatának növekedésével. Az elmélet és a tapasztalatok azt mutatják, hogy ha $p > 0,25$, akkor az eltolódás mértéke annyira lecsökken, hogy már nem lehet megbízhatóan megkülönböztetni a gáztároló zónákat az olajtároló zónáktól. E probléma megoldásán várhatóan sokat segíthet a neutron élettartam-szelvényezés és az ellenállás-szelvényezés kombinatív alkalmazása.

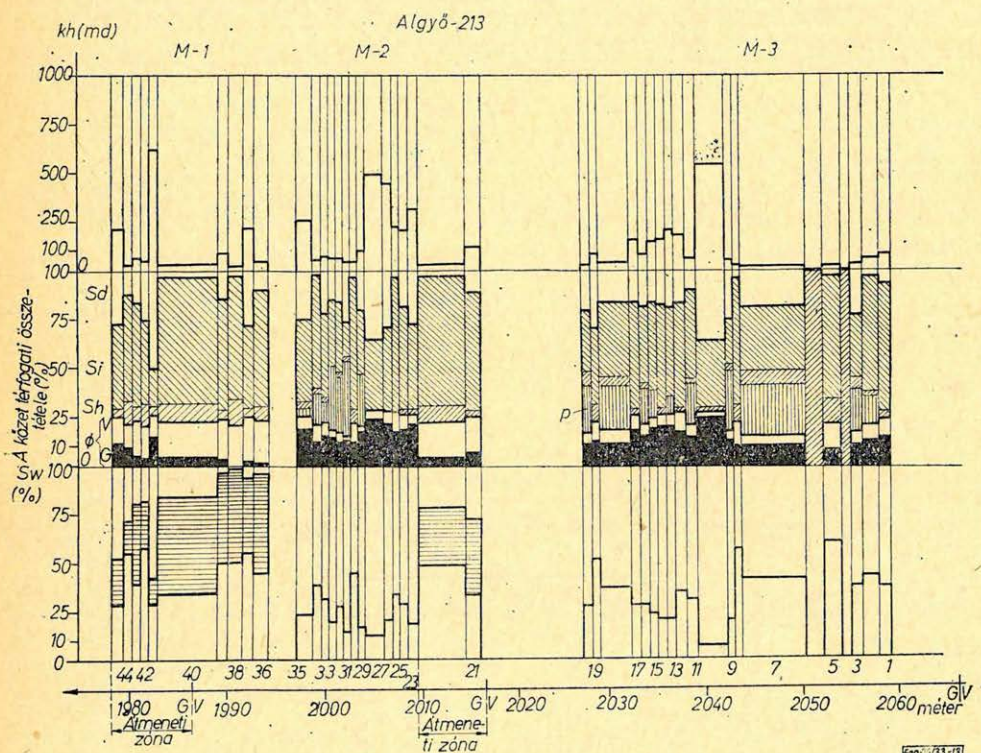
A bemutatott elmélet és módszer gyakorlati alkalmazása Magyarországon a neogén szénhidrogéntároló homokkövek értékelésére.

A bemutatott elméletet és interpretációs módszert széles körben alkalmazzuk Magyarországon a neogén szénhidrogéntároló homokkövek karottázis-szelvényeinek értékelésére. 1970-től kezdődően kb. 200 fúrásban alkalmaztuk a módszert, és a kvantitatív értékelési munkák kb. 6000 homokkő-intervallumra terjedtek ki.

Az egyes homokkő-zónák output értékelési adatai tartalmazzák a zóna mélységi határait, vastagságát, effektív termelőképes vastagságát, az impermeábilis márgacsíkok relatív térfogatát, a diszperz agyagtartalom- és kőzetliszt-tartalom- és homoktartalom relatív térfogatait, az effektív porozitást, a horizontális abszolút permeabilitást, a teljes víztelítettséget, a redukálhatatlan víztelítettséget, a kapilláris úton felszívódott többletvíztelítettséget az átmeneti zónákban, a szénhidrogének minőségének megnevezését, a zóna effektív pórustereinek teljes nagyságát, a zóna szénhidrogén-készletének teljes nagyságát és a zóna teljes hidraulikai vezetőképességét. A szolgáltatott output értékelési adatok száma tehát zónánként 17. Ez azt jelenti, hogy a módszer gyakorlati

alkalmazásai során Magyarországon eddig mintegy 100 000 output interpretációs adatot szolgáltatunk a tárolókkal foglalkozó geológusok és olajmérnökök számára.

Az értékelés output adatait analóg formában ábrázoljuk. Az eredményeknek egy ilyen output analóg szelvényét láthatjuk a 13. ábrán, 3 gáztároló rétegre vonatkozóan, az *Algyő-213* jelű fúrásban. Itt 3 telepet 45 zónára bontottunk; ezek vastagsága 0,4 m-től 6 m-ig változik. Az értékelés output diagramja 3 sávot tartalmaz. Az alsó sávban a víztelítettséget ábrázoljuk és azt két részre osztottuk: vízszintes vonalkázással tüntettük fel a mozgékony víztartalmat, ami igen nagy a gáz – víz határ alatti teleprezésekben, de jelentős az átmeneti zónákban is. A középső diagramsávban a kőzet térfogati anyagmérlegét ábrázoltuk. Itt feltüntettük a Φ effektív porozitást, az *sh* diszperz agyagtartalmat, az agyagesíkok *p* térfogatát, az *si* kőzetliszt tartalmat, és az *sd* homoktartalmat. A Φ effektív porozitást felbontottuk *G* gáztartalomra és *W* víztartalomra. A felső diagramsávban a horizontális abszolút permeabilitást ábrázoltuk.



13. ábra – Puc. 13 – Fig. 13

Az értékelési folyamatot gépesítettük, ez azonban egyelőre nem terjed ki digitalizált kútszelvények bevitelére. Egyelőre az analóg karottázs-szelvényeket a szelvényelemző bontja interpretációs zónákra és határozza meg egyes zónák reprezentatív szelvényindikációit. Miután az interpretációs zónák kijelölése és az egyes zónák szelvény-indikációinak meghatározása a szelvényelemző részé-

ről kézi úton megtörtént, utána az értékelési folyamat összes többi lépése komputert segítettével történik. A számítógépes értékelés output eredményeit sornyomtató segítségével táblázatos formában megadjuk, továbbá a legfontosabb jellemzőket, így az effektív porozitást, a szénhidrogénkészletet és a horizontális abszolút permeabilitást plotter segítségével analóg szelvény formájában közöljük.

IRODALOM

- [1] *Archie, G. E.*: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Trans. AIME 1942. 146. 54–62.
- [2] *Wyllie, M. R. J.*: Log interpretation in sandstone reservoirs. Geophysics 4.748–78 (1960).
- [3] *Komarov S. G.*: Szpravocsnik geofiziki, Tom. 2. Geofiziceszkie metodü isszedovanija szkvazsin. Moszkva, Gosztoptehizdat, 1961.
- [4] *Schlumberger*: Log interpretation principles. Schlumberger Limited, 1969.
- [5] *Itenberg, S. S.*: Interpretácija rezul'tatov geofiziceszkih isszedovanij razrezov szkvazsin, Moszkva, Nedra, 1972.
- [6] *Barlai Zoltán*: Well logging parameters of hydrocarbon-bearing sandstones composed of sand, silt and shale; evaluation of water saturation, porosity and grain size distribution. The Log Analyst 2.3–22 (1970).
- [7] *Barlai Zoltán*: Some principal questions of well logging evaluation of hydrocarbon-bearing sandstones with a high silt and clay content: experience acquired by the field application of a new method. The Log Analyst 3.7–30 (1971).
- [8] *Barlai Zoltán*: A new theory of the well logging characteristics of hydrocarbon-bearing sandstones. SPWLA Thirteenth Annual Logging Symposium, Paper J. 1–61. Tulsa, Oklahoma, 1972.
- [9] *Barlai Zoltán – Czeglédi István – Müller Pál*: A review of the status of the basic well logging and interpretation methods applied in Hungary, SPWLA 14th Annual Logging Symposium, Paper, H 1–29. Lafayette, Louisiana (1973).
- [10] *Barlai Zoltán*: A nagy kőzetliszttartalmú neogén homokkővek mélyfúrású geofizikai paramétereit. Magyar Tudományos Akadémia X. Osztályának Közl. 2–4. 243–60 (1971).
- [11] *Itenberg, S. S. – Zlotnik, M. A.*: Ocenka frakcionnogo szosztava, porisztosztii i neftegazonaszucsennosztii peszesano-alevrito-glinisztüh porod po dannüm geofiziceszkih isszedovanij szkvazsin, Neftegaz. Geol. i Geofiz. 2 43–6 (1973).
- [12] *Dumanoir, J. L. – Coates, G. R.*: A new approach to improved log-derived permeability. The Log Analyst, 1, 17–31, (1974).
- [13] *Timur, A.*: An investigation of permeability, porosity, and residual water saturation relationships for sandstone reservoirs. The Log Analyst, 4, 8–17, (1968).
- [14] *Barlai Zoltán*: New methods for the evaluation of quantitative well logging of sandstone and shaly-sandstone layers, taking reference layers into consideration. VII. World Petroleum Congress, Proceedings, Vol. 2, p. 765, (1967).