

Наил Заляев, Tadeusz Rokosz

О ПРИРОДЕ СВЯЗЕЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
С ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ГОРНЫХ ПОРОД
И О МЕТОДИКЕ ИХ ИЗУЧЕНИЯ

(7 Фиг.)

*The relation of geophysical data to the physical properties
of the rocks*

7 Figs.

*Związek parametrów geofizycznych z własnościami
fizycznymi skał*

7 fig.

Abstract: The relation of acoustic velocity and electric resistivity to the porosity determined by laboratory methods has been found to be very poor; very poor is also the relation, determined by laboratory methods, of the velocity to the resistivity ratio. In many logs from Rotliegendes it has been observed that the acoustic velocities increase with the increase of natural gamma intensity, it means with increasing amount of clay material, convertly as commonly published in literature. The nature of this phenomenon is the dispersion of the clay material in the intergranular space, improving the acoustic conductivity of the bed. On the other hand the correlation of the velocities determined by acoustic logs to the resistivities taken from electric logs has been found to be very good.

It has been observed that on the well logs data it is possible to establish the relations which are very difficult or impossible to be detected with laboratory data. In the conclusion there is a proposal to study the direct relations of the data from different logging methods, because these relations should create the basis for log analysis concepts.

ВВЕДЕНИЕ

Применение геофизических методов основывается на использовании зависимостей геофизических параметров горных пород от их физических и коллекторских свойств. Эти зависимости однако различны для разных литологических условий и поэтому необходимо их изучать для отдельных поисковых объектов и определять пределы их применения.

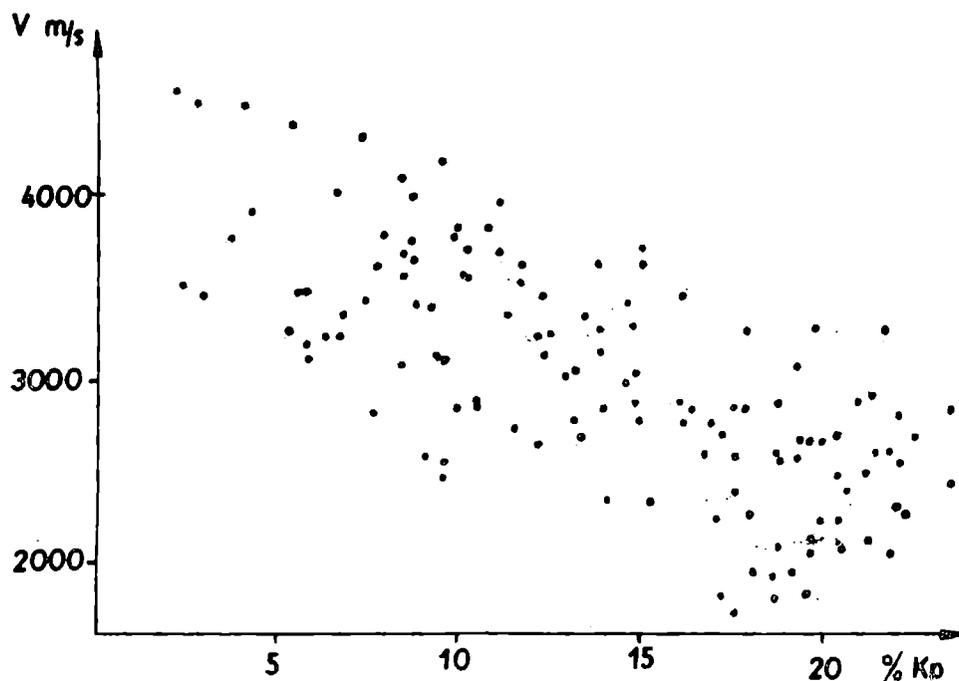
В связи с этим, в разных учреждениях были проведены очень широкие исследования различных геофизических параметров горных пород. Результаты этих исследований требуют основательного комплексного изучения, тем более, что количество собранного материала и результаты проведенных до сих пор исследований создают возможность синтетического определения связей между отдельными параметрами и даже — в некоторых случаях — выяснения природы этих связей.

В настоящей работе рассматривается природа связей между геофизическими параметрами на конкретном материале, относящемся к красному лежню на Предсудетской моноклинали, и на этой основе в ней предлагается усовершенствовать методику использования этих связей для целей промышленной геосфизики.

ИЗУЧЕНИЕ СВЯЗИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ С ПОРИСТОСТЬЮ В КРАСНОМ ЛЕЖНЕ

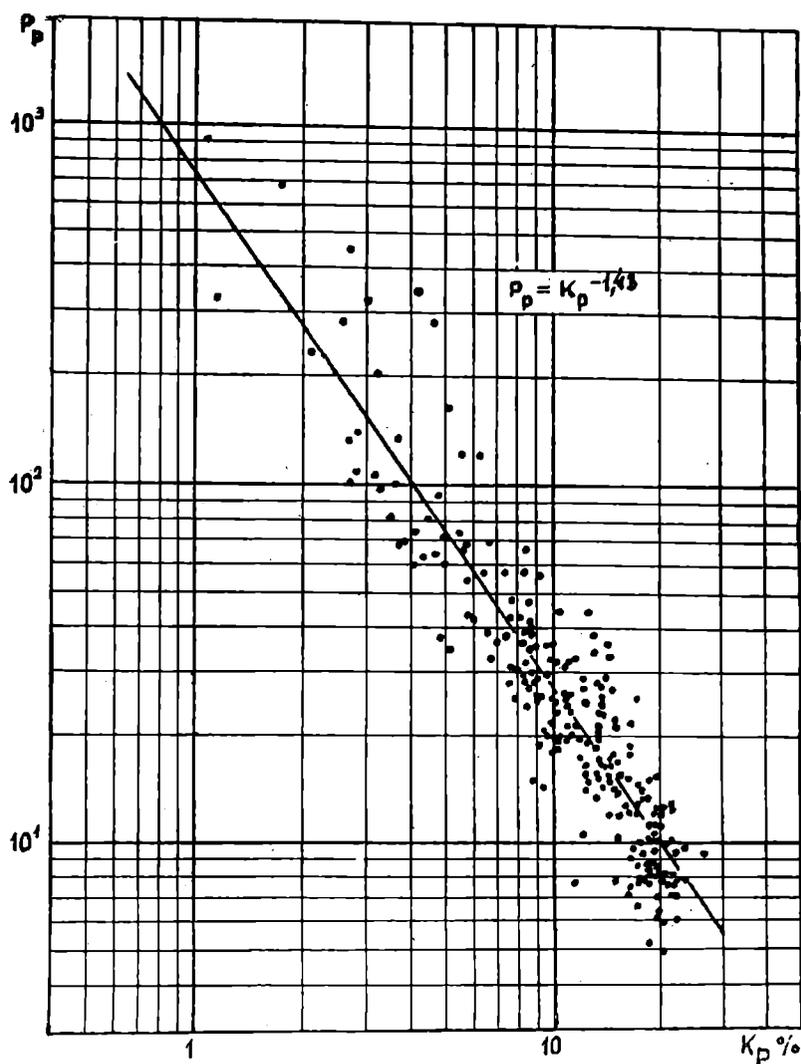
Обнаружение нефте- и газоносных пластов в промышленной геофизике опирается на зависимости электрического сопротивления этих пластов от насыщения их пор нефтью или газом, которые не проводят электрического тока.

Основным препятствием при использовании этой зависимости является тот факт, что электрическое сопротивление горной породы зависит не только



Фиг. 1. Сопоставление лабораторных данных о скорости упругих волн и пористости на основании кернового материала из красного лежня (по Э. Крах и С. Плева, НИ Кракова)
Fig. 1. Zestawienie laboratoryjnych danych o prędkości fal sprężystych i porowatości na podstawie rdzeni z czerwonego spagowca (wg E. Krach i S. Plewa, I. N.)

от насыщенности этой породы нефтью и газом, но также от многих других факторов, которые следует иметь ввиду. Среди них основным фактором, имеющим наибольшее влияние на величину сопротивления, является пористость.



Фиг. 2. Зависимость $P_p = f(K_p)$ для песчаников красного лежня (З. Баль, С. Плева — 1971 г., З. Баль — 1971 г.)

Fig. 2. Zależność $P_p = f(K_p)$ dla piaskowców czerwonego spągowca (Z. Bał, S. Plewa, 1971; Z. Bał. 1971)

Классический метод интерпретации сводится к определению пористости и подсчёту её влияния на сопротивление. Однако применение этого способа для отложений красного лежня не приводило к положительным результатам. Это послужило поводом для исследования причин такого обстоятельства и привело к необходимости замены классического метода интерпретации другим, более надёжным способом.

Главными причинами погрешностей интерпретации по методу сопротивлений являются, во-первых — ошибки в определении пористости по данным

каротажа, а во-вторых тот факт, что на сопротивление красного лежня — кроме пористости — сильно влияет специфический характер литологического строения его отложений, в особенности их глинистость. В процессе исследований рассмотрена надёжность определения пористости отдельными геофизическими методами.

В настоящее время наиболее широко применяемым в Польше методом оценки пористости является нейтрон — гамма каротаж. Однако результаты нейтрон — гамма каротажа в отложениях красного лежня зависят не только и не столько от эффективной пористости, сколько от степени глинистости, а также количества и состава цемента. Учёт влияния глинистости с помощью известного метода при использовании гамма каротажа оказывается в данном случае малопригодным.

Кроме глинистого материала красный лежень содержит карбонатный и железистый цемент, особенно в своей кровельной части. Этот цемент содержит также связанную воду (аналогично, как глинистый цемент) и не оказывает влияния на ГК, но искажает НГК так же, как глинистость. Кроме того, результаты измерений, полученные этим методом, могут быть искаженными из-за влияния насыщенности горных пород газом. В связи с этим при применении нейтрон — гамма каротажа возможны значительные ошибки, как в сторону преувеличения, так и занижения пористости. Искажающее влияние перечисленных выше факторов слишком велико и соизмеримо с влиянием изменений пористости; поэтому определение пористости на основании нейтрон — гамма каротажа чаще всего заканчивается неудачей.

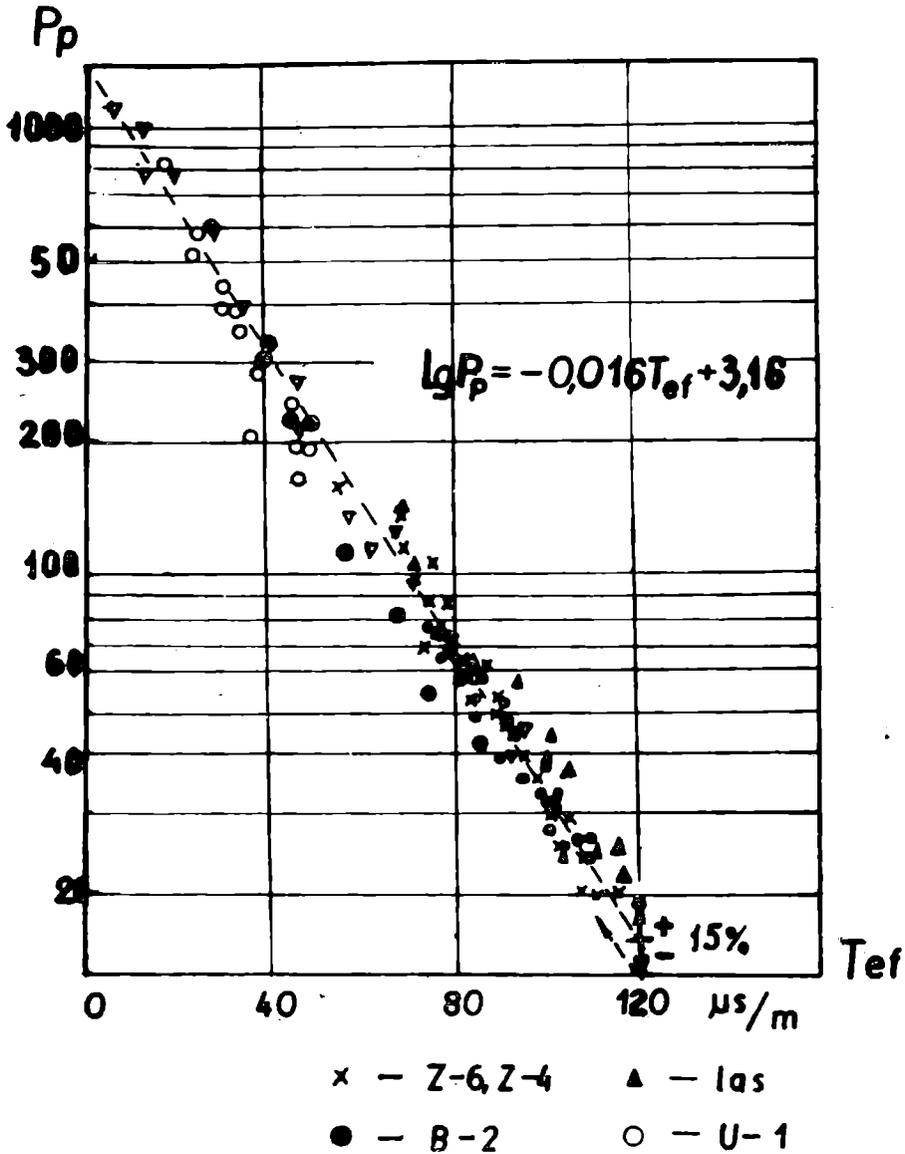
Другим методом, используемым для оценки пористости, является акустический каротаж. Результаты измерений в скважинах и лабораторные исследования показывают, что на основании акустического каротажа невозможно получить надёжные данные о пористости отложений красного лежня. На рис. 1 представлены результаты лабораторного исследования керна, взятые из работы, выполненной в Нефтяном институте (З. Баль, С. Плева, 1971). Эти результаты показывают, что в красном лежне зависимость скорости упругих волн от пористости практически отсутствует и, по крайней мере, не является функцией двух переменных, что объясняется разнородностью минералогического состава и типа его цемента, а также интенсивностью степени уплотнения.

В работе не рассматривалась возможность определения пористости другими геофизическими методами (ГГК и другими) — ибо пока они не применяются в промышленном масштабе.

В дальнейшем рассмотрен характер связи сопротивления с пористостью. По материалам (З. Баль, С. Плева, 1971; З. Баль, 1971) видно, что он недостаточно строгий (рис. 2). Это можно объяснить именно влиянием сложной литологии и структуры пор красного лежня на его сопротивление. Поэтому переход от пористости к сопротивлению пластов при их 100-процентном обводнении вызывает недопустимые погрешности даже в тех случаях, когда удается определять пористость правильно.

СВЯЗЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СО СКОРОСТЬЮ
УПРУГИХ ВОЛН В КРАСНОМ ЛЕЖНЕ И ЕЁ ПРИРОДА

Из-за отсутствия достаточно строгих связей пористости с геофизическими параметрами (НГК, АК и ρ) рассмотрена возможность непосредственного использования одного из геофизических параметров либо их комплекса для учёта влияния разных факторов на сопротивление красного лежня, минуя



Фиг. 3. Зависимость относительного сопротивления от времени распространения упругих волн в красном лежне, определённая по каротажным данным

Fig. 3. Zależność względnej oporności od czasu rozprzestrzeniania się fal sprężystych dla czerwonego spągowca, wyznaczona z profilowań geofizycznych

при этом промежуточные операции, с которыми связаны ошибки (Н. Заляев, 1973). С той целью проанализирована зависимость электрического сопротивления от скорости упругих волн и от радиометрических параметров, полученных из каротажа скважин. В результате проведённого анализа установлено, что для отложений красного лежня наиболее строгой и однознач-

ной зависимостью является связь скорости упругих волн и электрического сопротивления обводнённых пород (рис. 3).

Она определяется формулой:

$$\lg P_n = -0,016 T_{эф} + 3,16 \quad (1)$$

где параметр пористости $P_n = \frac{\rho_{гг}}{\rho_{нг}}$

$\rho_{гг}$ — сопротивление водоносного горизонта,

$\rho_{нг}$ — сопротивление пластовой воды,

$T_{эф}$ — эффективное время упругой волны в исследуемом пласте, отсчитанное от времени ангидритов (близкого к времени в скелете песчаника).

Эта зависимость позволяет определять сопротивление обводнённых горных пород, необходимое для сравнения с измеряемым при оценке продуктивности горизонтов сопротивлением, обходя операцию определения и использования пористости, вместе со всеми возникающими при этом ошибками. Точность определения сопротивления в общем не выходит за пределы $\pm 15\%$, что вполне обеспечивает обнаруживание влияния на сопротивление нефти или газа, которые присутствуют в горных породах, ибо известно, что промышленные содержания углеводородов в горной породе вызывают увеличение сопротивления более чем на 200—300% по отношению к сопротивлению обводнённого пласта.

Представленная зависимость принципиально отличается от зависимостей, известных по литературе. В литературе (М. Булатова и др., 1970; С. Дж. Пирсон, 1963), в которой дан мировой обзор использования акустического каротажа для промысловой геофизики, принимается гиперболическая зависимость, выраженная уравнением:

$$\Delta T - \Delta T_k = K \sqrt[m]{\frac{T}{P_n}} \quad (2)$$

где

ΔT — измеряемое время,

ΔT_k — время в скелете,

K — коэффициент пропорциональности,

m — показатель уплотнения.

Принимая $(\Delta T - \Delta T_k)$ за $T_{эф}$ и решая уравнение относительно $\lg P_n$ получаем выражение:

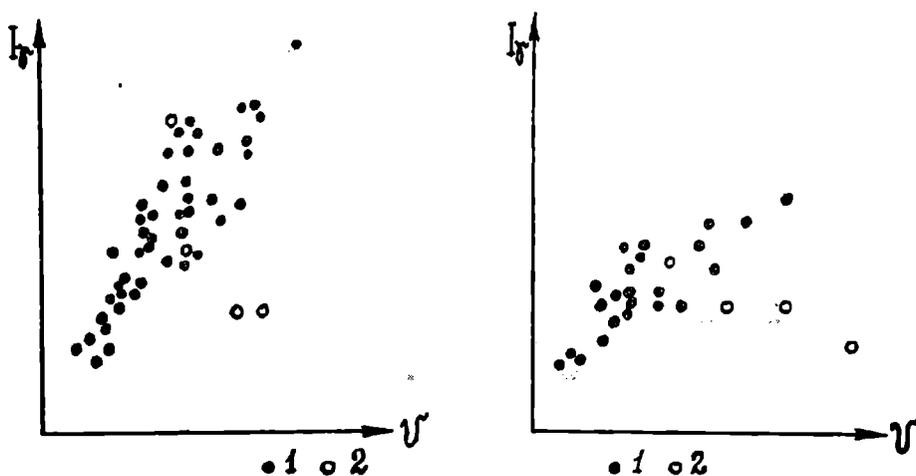
$$m \lg P_n = - \lg T_{эф} + \lg K \quad (3)$$

из которого следует, что $\lg P_n$ зависит от $\lg T_{эф}$. Из уравнения (1) видно, что в случае красного лежня $\lg P_n$ зависит не от $\lg T_{эф}$, как в уравнении (3), а просто от $T_{эф}$.

Такая разница является результатом описанного ниже специфического характера размещения глинистого материала в горной породе. Уравнение (2)

является общим решением известных уравнений, а именно уравнения среднего времени и уравнения Арши. Уравнение среднего времени предполагает простую последовательность двух фаз (твёрдой и жидкой, соответствующей пористости), а в красном лежне выступает более сложная система.

Из анализа геофизических материалов по многим скважинам замечается, что в разрезах красного лежня скорости упругих волн возрастают вместе с увеличением активности гамма, то есть с увеличением степени глинистости горных пород. Типичные примеры, составленные по данным из каротажных диаграмм, показаны на рис. 4. В то же время литература сообщает, что глинистость горных пород занижает скорость. Однако следует помнить, что в литературе рассматриваются случаи плотных либо не очень плотных

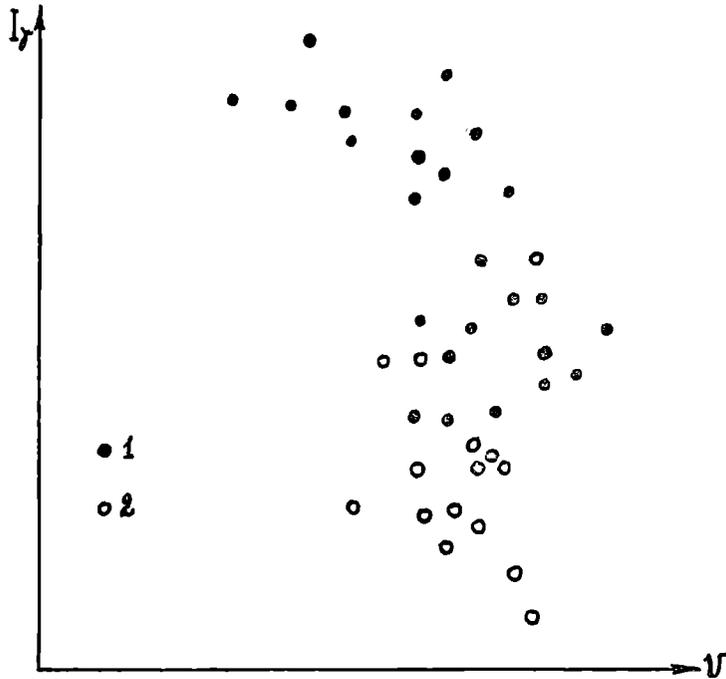


Фиг. 4. Типичные примеры характера влияния глинистости на скорость упругих волн в красном лежне: 1 — песчаники с глинистым цементом, 2 — песчаники с карбонатным цементом (кровельная часть красного лежня)

Fig. 4. Typowe przykłady charakteru wpływu zasilenia na prędkość fal sprężystych w czerwonym spągowcu: 1 — piaskowca ze spoiwem ilastym; 2 — piaskowca ze spoiwem węglanowym (stropowa część czerwonego spągowca)

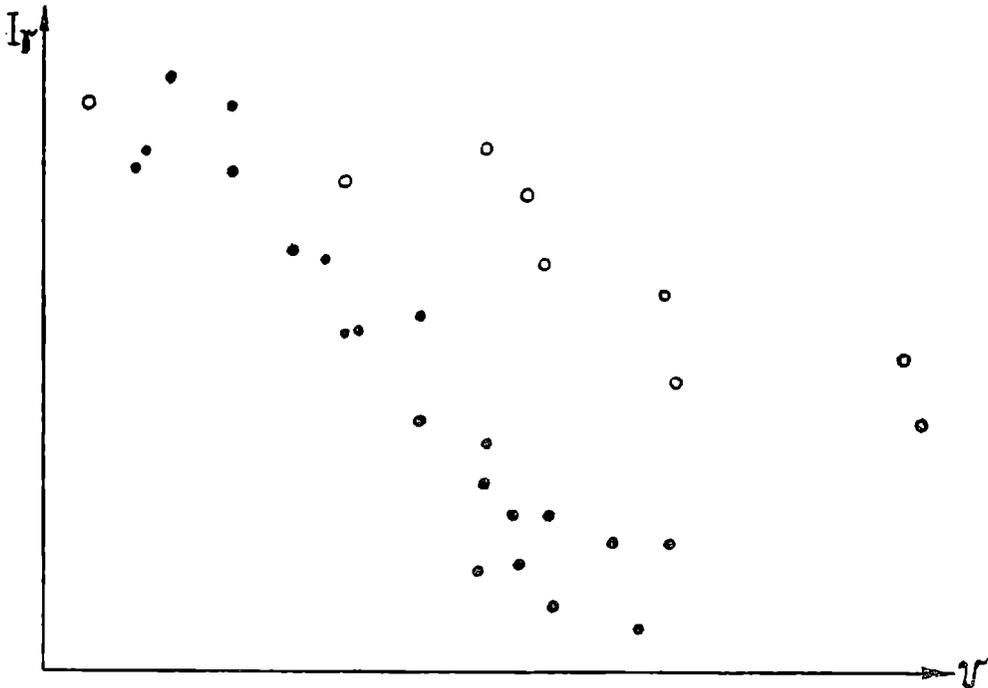
песчаников, которые чаще всего встречаются при геолого-разведочных работах на нефть и газ. Глинистость таких горных пород имеет характер частичного замещения песчанистого скелета глинистым материалом, т. е. характер глинистых прослоев, в связи с чем она ухудшает акустический контакт между зёрнами песчаника и действительно занижает каркасную скорость и скорость горной породы в целом. Такие случаи наиболее часто встречаются в практике нефтяной геологии. Примеры такого влияния приведены на рис. 5 (карбоновые песчаники) и на рис. 6 (чарножецкие песчаники), которые составлены по каротажным материалам.

Однако отложений красного лежня нельзя отнести к такого рода случаям. Природа обратного влияния глинистости на скорость в песчаниках красного лежня следующая: песчаники красного лежня представлены не очень плотными и хрупкими песчаниками, а их зёрна слабо контактируют между собой. Содержащийся в них глинистый материал имеет распыленный характер и преимущественно заполняет пространство между зёрнами и поры,



Фиг. 5. Характер влияния глинистости на скорость упругих волн в песчаниках карбона Люблинской впадины: 1 — слабо проницаемые песчаники; 2 — песчаники с хорошими коллекторскими свойствами

Fig. 5. Charakter wpływu zailenia na prędkość fal sprężystych w piaskowcach karbonu niecki lubelskiej: 1 — piaskowce słabo przepuszczalne; 2 — piaskowce o dobrych własnościach zbiornikowych



Фиг. 6. Характер влияния глинистости на скорость упругих волн в черножецких песчаниках: 1 — пористые песчаники; 2 — песчаники, не обладающие коллекторскими свойствами

Fig. 6. Charakter wpływu zailenia na prędkość fal sprężystych w piaskowcach czarnorzeckich (istebniańskich): 1 — piaskowce porowate; 2 — piaskowce nie wykazujące własności zbiornikowych

которые в случае отсутствия глины заполнены пластовой водой. Повышение содержания этого глинистого материала, имеющего характер цемента, увеличивает поверхность соприкосновения зёрен, что улучшает акустическую проводимость горной породы и вызывает увеличение скорости упругих волн в породе.

Известно, что глинистость влияет также на электрическое сопротивление. В случае красного лежня глинистость увеличивает жесткость каналов и плотность песчаника, что впоследствии вызывает увеличение его электрического сопротивления. Повышение глинистости вызывает увеличение электрического сопротивления и увеличение скорости упругих волн.

Имеется полное обоснование для предположения, что природа влияния цемента с другим литологическим составом (железистый, карбонатный и др.) аналогична, а приведённые зависимости еще лучше характеризуют его влияние.

Таким образом описанные выше явления представляют природу связи сопротивления и скорости упругих волн в красном лежне. Вышесказанное имеет существенное значение не только теоретическое, но и практическое, ибо является основанием для правильного использования акустического каротажа в этих условиях.

О МЕТОДИКЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЯЗЕЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

На основании полученных результатов представляются выводы, касающиеся надёжности методики изучения связей геофизических параметров и физических свойств горных пород для интерпретации материалов промысловой геофизики.

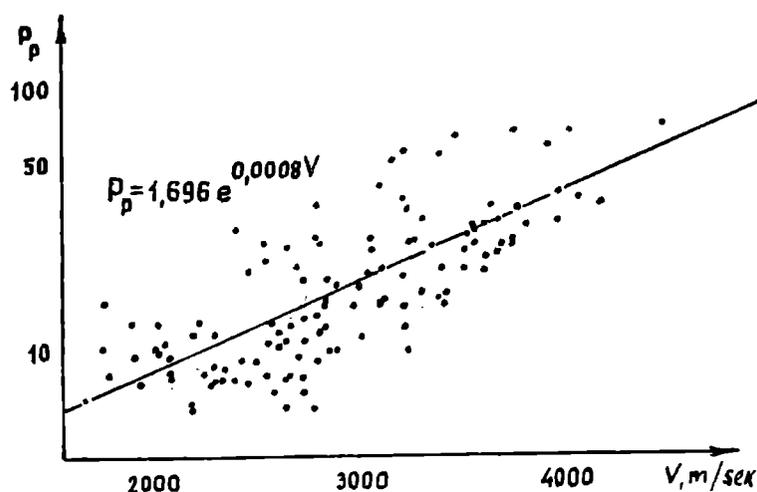
Интересно сопоставить описанную зависимость с аналогичной зависимостью, полученной в лабораторных условиях. Это возможно потому, что для красного лежня — кроме скважинных исследований — были также выполнены соответствующие лабораторные исследования (З. Баль, 1972), результаты которых показаны на рис. 7.

Сопоставляя рис. 7 с рис. 3 легко заметить, что они несравнимы как в отношении характера, так и тесноты представляемых связей. На рис. 3 видно, что P_n практически является функцией $T_{эф}$, в то время как из рис. 7 вытекает, что связь P_n с V слабая и следует предполагать наличие влияния других факторов (на рис. 7 представлена по форме зависимость $P_n = f(V)$, но это не изменяет положения вещей, ибо $V = \frac{1}{T}$). Причиной этих расхождений вероятно являются различия условий измерения геофизических параметров, использованных для составления сравниваемых рисунков.

Показанная на рис. 3 зависимость получена для естественных условий, характерных для данного пласта (высокое давление и температура, полное

насыщение и др.), а данные для составления на рис. 7 получены в лабораторных условиях давления и температуры, отличающихся от пластовых условий.

Одним из главных факторов, влияющих на характер связи, является давление, которое по разному сказывается на сопротивлении и на скорости (В. М. Добрынин, 1963). К тому же при разных давлениях существуют различные связи сопротивления со скоростью, а связи, установленные лабораторным методом, не соответствуют связям, выступающим в природных условиях.



Фиг. 7. Зависимость параметра пористости от скорости упругих волн в красном лежне — на основании лабораторных измерений (З. Баль, 1972)

Fig. 7. Zależność parametru porowatości od prędkości fal sprężystych w czerwonym spągowcu, na podstawie pomiarów laboratoryjnych (Z. Bal, 1972)

Из этого вытекает, что наиболее целесообразным является изучение связей геофизических параметров, измеряемых в скважинах, ибо оно создаёт возможность получения зависимостей, которые действительно выступают в природе; получение таких связей в лабораторных условиях очень сложно технически, а иногда практически невозможно (трещиноватые пласты и сыпучие песчаники).

Из анализа погрешностей лабораторного определения геофизических параметров и пористости вытекает, что ошибка, вызванная отступлением от пластовых условий, главным образом связана с определением геофизического параметра. Это можно объяснить тем, что под влиянием давления в большей мере уменьшаются размеры каналов между порами, чем объём пор. Электрическая и акустическая проводимости, обусловленные этим фактором, изменяются в большей мере чем пористость, которая в свою очередь обусловлена, главным образом, объёмом больших пор.

Это положение подтверждается материалами работы (В. М. Добрынин, 1963), в которой показано, что в песчаниках, при увеличении давления от 0 до 400 атм, пористость в большинстве случаев уменьшается только на 2—4% своей начальной величины. В то время скорость и сопротивление

увеличиваются в 1,5 раза (т. е. на 50% своего первоначального значения), причём пределы изменений сильно зависят от глинистости горной породы и её пористости.

Из выше сказанного можно сделать вывод, что для изучения связей пористости с сопротивлением и скоростью необходимо использовать также геофизические параметры, измеренные в скважинах, причём определение пористости допустимо применяемыми до сих пор лабораторными методами.

Известно, что не строгая связь геофизических параметров с физическими свойствами горных пород и между собой характерна не только для красного лежня, но также для многих других отложений в пределах Польши.

Приведённые рассуждения позволяют предполагать, что, опираясь на использование геофизических параметров, измеряемых в скважинах, и на предложенную методику исследований, существует возможность уточнения этих связей. Предпринять такие работы особенно важно потому, что исследование керн в лабораториях, имитирующих пластовые условия, в общем сложно, а часто невозможно.

ВЫВОДЫ

1. Для правильной интерпретации электрического сопротивления целесообразно определять его прямые связи с другими геофизическими параметрами, учет которых исключает ошибки, связанные с определением пористости и её использованием.

2. Учитывая сложное влияние пластовых условий (давление, температура) на физические свойства горных пород и трудности при лабораторном исследовании керн с сохранением таких же условий, целесообразно определять связи между физическими свойствами горных пород, используя для этого каротажные данные.

3. В связи с тем, что главным источником различия природных и лабораторных связей геофизических параметров с пористостью является не измерение пористости, а измерение геофизического параметра, целесообразно составление именно таких зависимостей на основании измерений геофизических параметров в скважинах и лабораторных измерений пористости.

Наил Заляев, Минск, Ул. Тая 36 кв. 31 СССР
Przedsiębiorstwo Geofizyki Górnictwa Naftowego
ul. Łukasiewicza 3. 31-429 Kraków

ЛИТЕРАТУРА WYKAZ LITERATURY

- Bal Z. Plewa S. (1971), Badanie wskaźnika cementacji i innych własności skał. *Inst. Naft.*, (opracowanie archiw.) Kraków.
Bal Z. (1971), Badanie wskaźnika struktury skał w warunkach laboratoryjnych

- dla wybranych serii stratygraficznych i rejonów Polski. *Nafta* nr 12, 1971, Kraków.
- Bal Z. (1972), Badanie związku między parametrem porowatości i prędkością rozchodzenia się fal sprężystych w skałach zbiornikowych. *Nafta* nr 6, 1972, Kraków.
- Булатова М. и др. (1970), Акустический каротаж. *Недра*, Ленинград.
- Добрынин В. М. (1963), Изменение физических свойств песчаников под действием всестороннего давления. *Промысловая геофизика*, выпуск 41, Гостоптехиздат, Москва.
- Pirson S. J. (1963), Handbook of Well Log Analysis for Oil and Gas Formation Evaluation. *Prentice-Hall*, JNG Englewood-Cliffs, N. J.
- Zaljajev N. (1973), Metodyka wykrywania i oceny horyzontów w utworach czerwonego spągowca na podstawie danych geofizyki wiertniczej. *Geofiz. Geol. naft.* nr 3—4, PGGN, Kraków.

STRESZCZENIE

Praca wyjaśnia istotę związków parametrów geofizycznych i własności fizycznych na materiałach dotyczących czerwonego spągowca i na tym tle proponuje udoskonalenie metodyki badań tych związków.

Wykazano, że związek prędkości i oporności z porowatością wyznaczony z badań laboratoryjnych jest bardzo słaby; słaby jest również wyznaczony na podstawie badań laboratoryjnych związek prędkości z opornością. W materiałach geofizyki wiertniczej z wielu otworów, które przewierciły utwory czerwonego spągowca, zauważono, że prędkości fal sprężystych w czerwonym spągowcu rosną ze wzrostem jego aktywności gamma, to jest ze wzrostem zailenia — wręcz odwrotnie, jak powszechnie podaje się w literaturze. Istotą tego zjawiska jest występowanie materiału ilastego w formie rozproszonej w przestrzeni międzyziarnowej skały, co poprawia jej przewodność akustyczną. Ścisłym związkiem jest natomiast związek prędkości z opornością, wyznaczony na podstawie profilowań akustycznych i elektrycznych otworów wiertniczych.

Zauważono, że w oparciu o dane z profilowań daje się wykrywać związki trudne lub niemożliwe do wykrycia metodami laboratoryjnymi.

W konkluzji proponuje się poszukiwanie bezpośrednich związków między parametrami geofizycznymi wyznaczonymi z odpowiednich profilowań geofizycznych, gdyż właśnie takie związki winny stanowić podstawę koncepcji interpretacyjnych.