

## Экспериментальное изучение влияния минерализации раствора NaCl и других солей на удельное электрическое сопротивление раствора

О.М. Пономаренко<sup>1,2\*</sup>, К.А. Истомина<sup>1</sup>, Л.Д. Макашева<sup>1</sup>, М.Н. Большаков<sup>2</sup>

1 – РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва;

2 – Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва

E-mail: \*[ponomarenko.o@gubkin.ru](mailto:ponomarenko.o@gubkin.ru)

**Аннотация.** В работе исследуется изменение удельного электрического сопротивления моделей пластовых вод в зависимости от минерализации растворов NaCl при различных температурах. Рассматриваются как низко- и среднеминерализованные растворы, так и растворы высокой и сверхвысокой минерализации. Основная цель исследования – уточнение известных зависимостей  $\rho_v = f(C_v, t)$  в областях высоких и сверхвысоких минерализаций. В результате нескольких опытов получены зависимости, которые хорошо коррелируются с теоретическими значениями в областях низких и средних минерализаций растворов и несколько расходятся с последними в области высоких минерализаций.

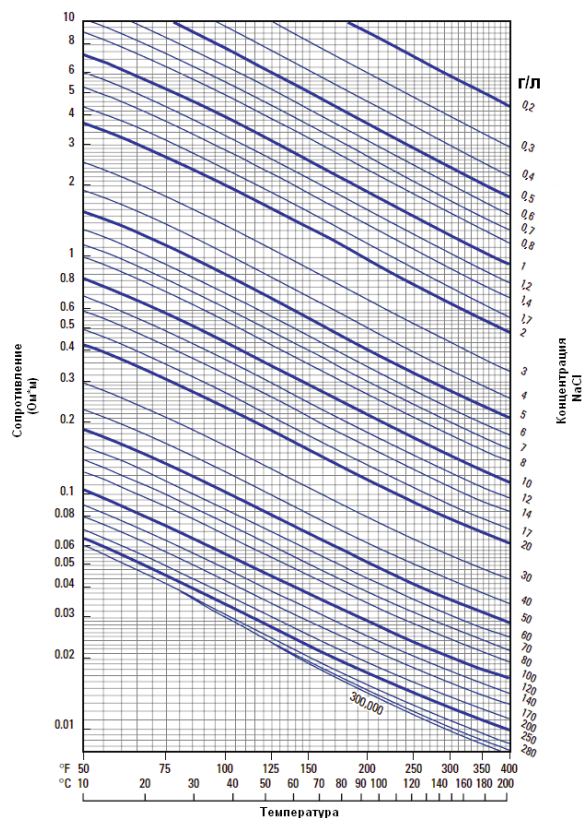
**Ключевые слова:** модели пластовых вод, минерализация раствора, удельное электрическое сопротивление, экспериментальная зависимость.

**Для цитирования:** Пономаренко О.М., Истомина К.А., Макашева Л.Д., Большаков М.Н. Экспериментальное изучение влияния минерализации раствора NaCl и других солей на удельное электрическое сопротивление раствора // Актуальные проблемы нефти и газа. 2019. Вып. 4(27). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-27.art7>

Осадочные горные породы можно представить в виде твердого скелета, состоящего из зерен породообразующих минералов и флюида, заполняющего пустотное пространство породы. Поскольку главные породообразующие минералы практически не проводят электрический ток, а сопротивления нефти и газа также велики, то удельное электрическое сопротивление ( $УЭС$ ) пород определяется наличием в пустотах породы пластовой воды и пропорционально сопротивлению  $\rho_v$  этой воды [1, 2].

Пластовые воды являются растворами электролитов, например, растворами солей NaCl, CaCl<sub>2</sub> и MgCl<sub>2</sub>. Сопротивление растворов электролитов напрямую зависит от минерализации и температуры. Данные параметры влияют на подвижность катионов и анионов солей и эквивалентную электропроводность раствора.

Существует семейство экспериментальных связей  $\rho_v = f(C_v)$ , характеризующих изменение сопротивления  $\rho_v$  воды в зависимости от концентрации  $C_v$  раствора NaCl и его температуры  $t$ ; однако, в области минерализаций выше 200 г/л указанные зависимости плохо изучены, а в области значений выше 300 г/л – и вовсе отсутствуют [3, 4] (рис. 1).

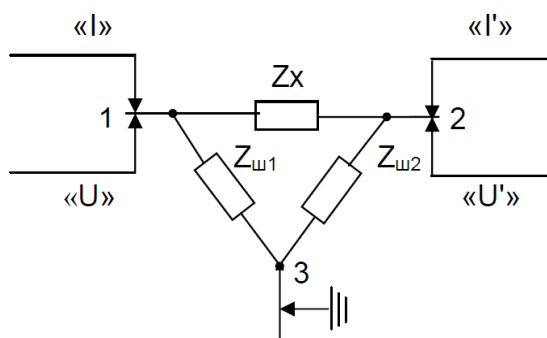


**Рис. 1.** Экспериментальные кривые  $\rho_v = f(C_v, t)$ , характеризующие изменение сопротивления  $\rho_v$  воды в зависимости от концентрации  $C_v$  раствора NaCl и его температуры  $t$  [4]

В Восточной Сибири, а также других регионах существуют месторождения, минерализация пластовых вод которых достигает значения 400 г/л. Экспериментальных палеток для исследования таких растворов пока не существует, поэтому проведенное в работе авторов уточнение известных данных в области низкой и средней минерализации, а также исследование сопротивления моделей пластовых вод в области сверхвысоких минерализаций являются актуальными.

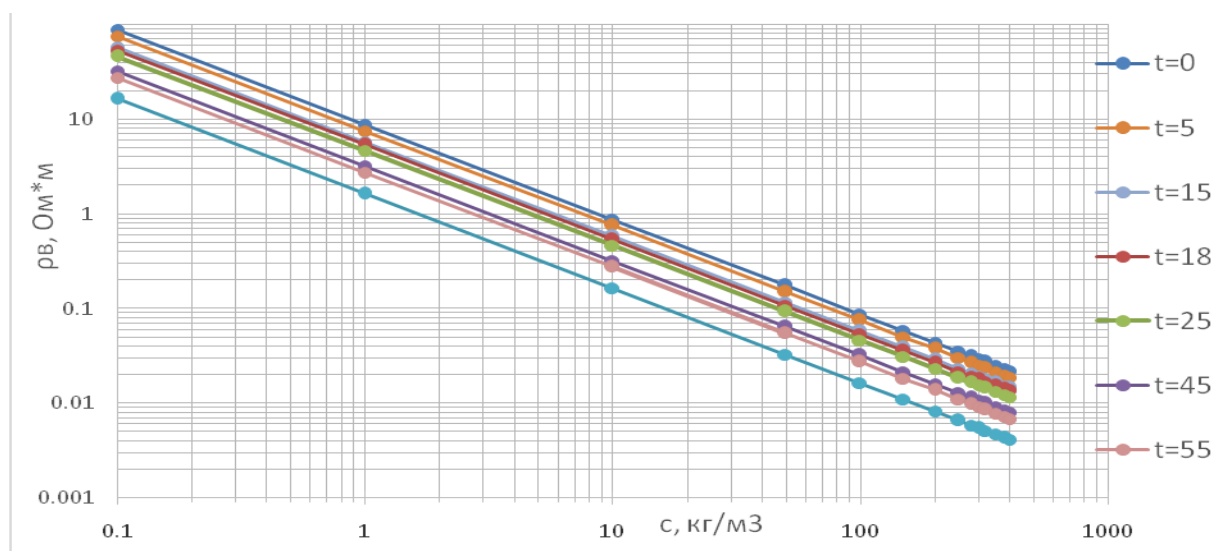
В ходе исследований были измерены сопротивления моделей пластовых вод в области различных минерализаций (1–360 г/л). В лабораторных условиях, в измерительной ячейке длиной 50 см (расстояние между электродами), с помощью находящегося в ней раствора и двух медных электродов была создана среда, благоприятная для протекания электрического тока. Раствор электролита предварительно был нагрет до высоких температур ( $\sim 90^\circ\text{C}$ ), и в процессе остывания раствора, при помощи измерителя иммитанса, были произведены замеры сопротивлений высокой точности. Данные о значениях сопротивлений передавались непосредственно на персональный компьютер. Все измерения были проведены для солей NaCl,  $\text{MgCl}_2$  и  $\text{CaCl}_2$ .

Измерения в приборе «Измеритель иммитанса Е7-23» реализованы по схеме подключения трехзажимного объекта (рис. 2). Прибором измеряются комплексное сопротивление  $Z_x$ , шунтирующие комплексные сопротивления  $Z_{ш1}$  и  $Z_{ш2}$ , точки 1 и 2 подключались к зажимам измерительной ячейки с раствором, точка 3 – к корпусному выводу. Так как измерительная ячейка изготовлена из непроводящего электрический ток материала, утечкой по материалу конструкции можно пренебречь.



**Рис.2.** Схема подключения трехзажимного объекта

Теоретическая зависимость удельного электрического сопротивления растворов NaCl от концентрации и температуры представляет собой прямую линию в двойном логарифмическом масштабе [5] (рис. 3).

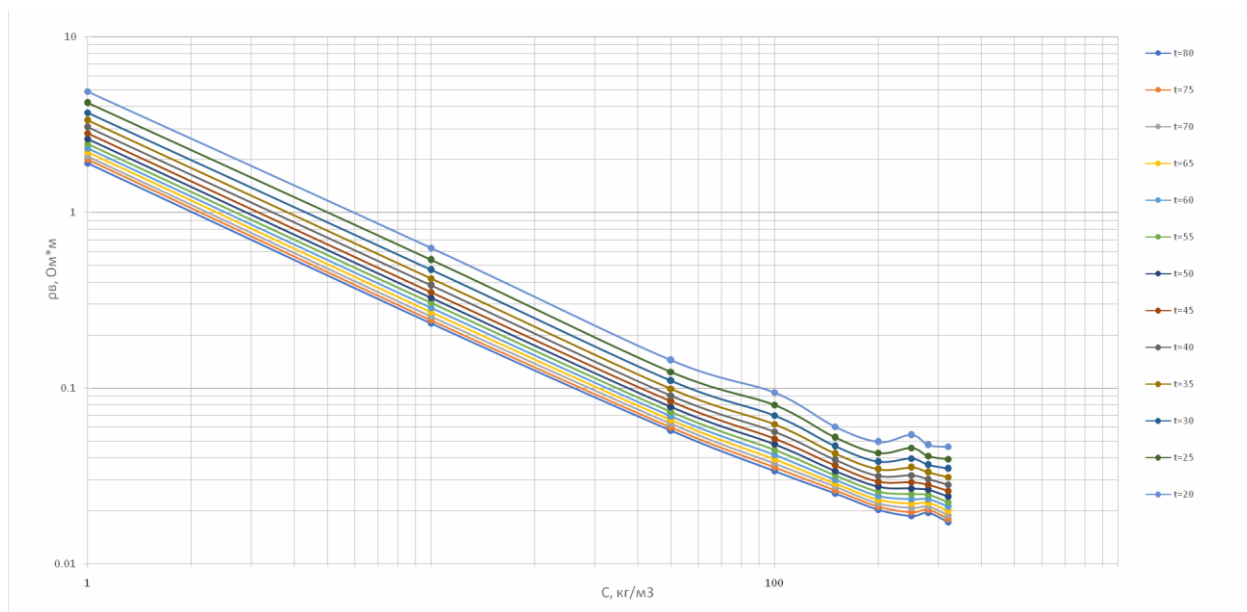


**Рис. 3.** Теоретическая зависимость удельного электрического сопротивления растворов NaCl от концентрации и температуры

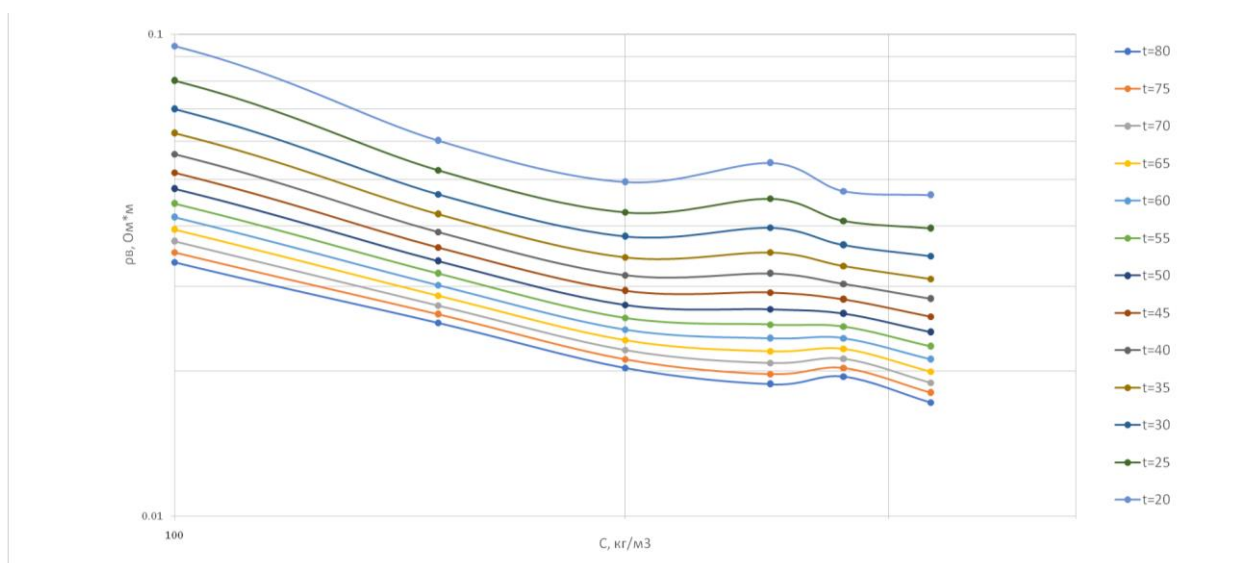
В ходе исследований, при увеличении минерализации растворов, наблюдалось уменьшение значений сопротивлений для различных температур, что согласуется с

приведенной выше теоретической зависимостью. При остывании раствора значение сопротивления увеличивалось, что также совпадает с теоретическими данными.

Однако свыше 280 г/л эмпирические и теоретические данные начинают различаться и зависимость УЭС от температуры и минерализации показывает иную картину, нежели в теории: ее вид в диапазоне минерализации от 280 г/л до 340 г/л имеет не прямую линию в двойном логарифмическом масштабе, а изогнутую кривую для всех температур (рис. 4, 5).



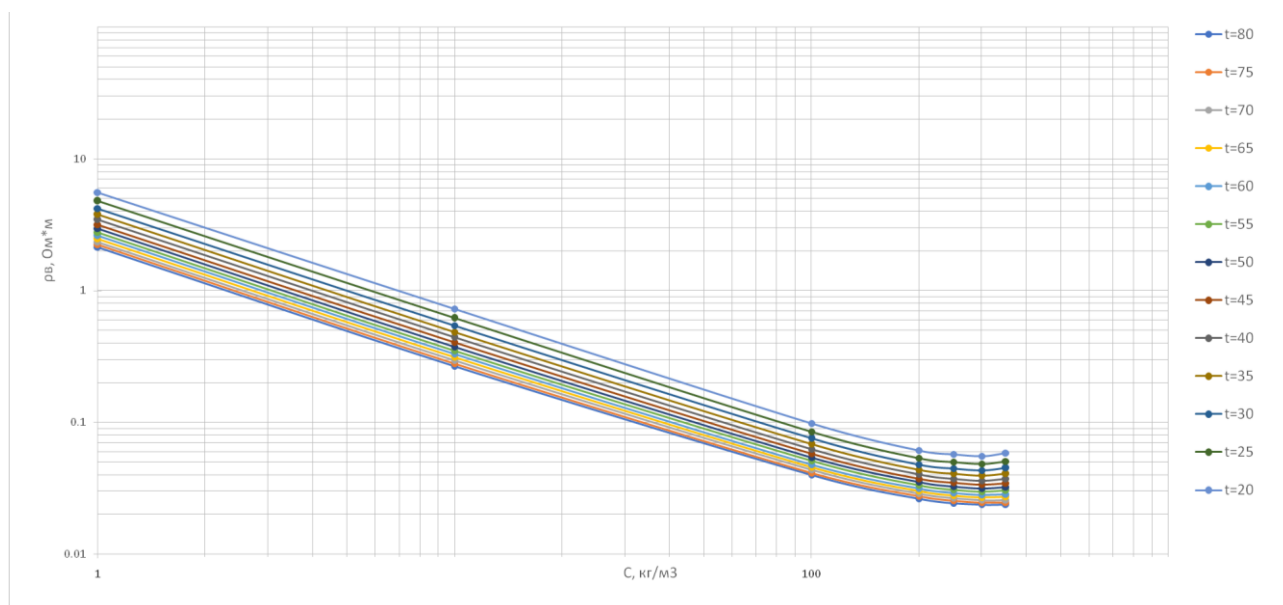
**Рис. 4.** Экспериментальная зависимость удельного электрического сопротивления растворов NaCl от концентрации и температуры



**Рис. 5.** Экспериментальная зависимость удельного электрического сопротивления растворов NaCl от концентрации и температуры при  $C_{в} > 100$  г/л

Одной из основных причин такого отклонения экспериментальных кривых от теоретических предположительно можно считать материал электродов и чрезвычайно быстрое окисление электродов в высокоминерализованных растворах (краевые эффекты). Было замечено, что при использовании оцинкованных пластин и раствора с повышенной концентрацией соли, эта соль обильно выпадает на пластинах и вызывает скоротечные процессы коррозии. Буквально в ходе одного эксперимента пластины приходили в негодность. При использовании медных электродов данные процессы были менее интенсивны, но, как показано на графиках, солеотложения все равно приводили к завышению сопротивления. Аналогичные процессы происходят в скважинных условиях, когда из-за пресыщенности пластовых вод и снижения давления, соли в большом количестве отлагаются на стенках скважины и измерительных приборах. Полученные данные позволяют внести коррективы в интерпретацию материалов ГИС с использованием палетки  $\rho_B = f(C_B)$ .

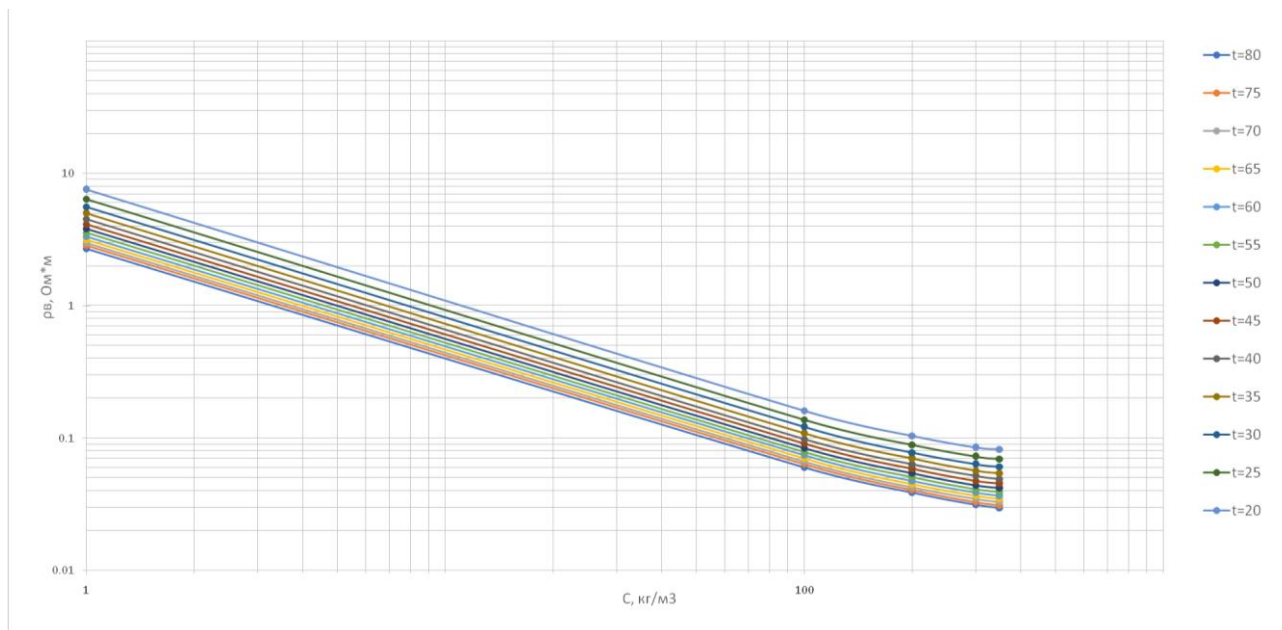
Аналогичный эксперимент был проведен для солей  $\text{CaCl}_2$  (рис. 6) и  $\text{MgCl}_2$  (рис. 7).



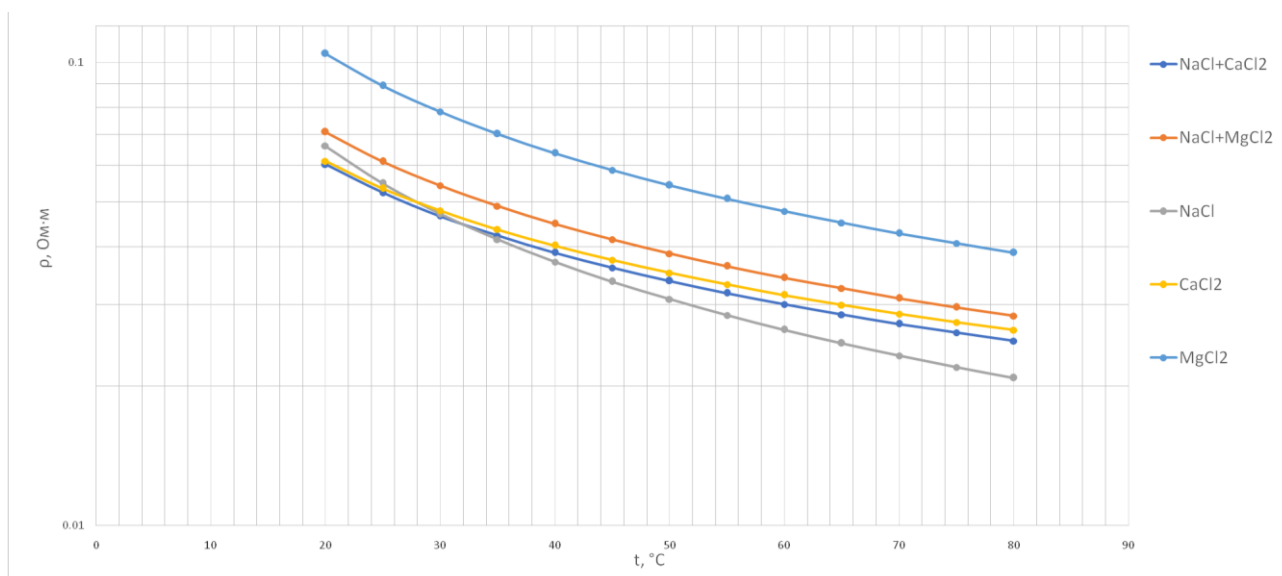
**Рис. 6.** Экспериментальная зависимость удельного электрического сопротивления растворов  $\text{CaCl}_2$  от концентрации и температуры

Как видно из графиков, при минерализации более 200 г/л кривые для растворов этих солей также выполаживаются, то есть процессы солеотложения происходят и в этих растворах.

Также были проведены сравнительные измерения УЭС для различных солей и их смесей с ростом температуры (рис. 8).



**Рис. 7.** Экспериментальная зависимость удельного электрического сопротивления растворов  $\text{MgCl}_2$  от концентрации и температуры



**Рис. 8.** Удельное электрическое сопротивление растворов различных солей и их смесей при минерализации раствора  $C=200$  г/л

Из рис. 8 видно, что наименьшим сопротивлением обладают растворы  $\text{NaCl}$ , наибольшим –  $\text{MgCl}_2$ , при этом в ходе нагрева наиболее сильно изменяется сопротивление растворов именно этих солей (диапазон температуры от 22 до 80 °C) – более чем в 6 раз. Сопротивление растворов  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaCl}+\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaCl}+\text{MgCl}_2$  в том же диапазоне температур уменьшается примерно в 3 раза.

## Выводы

В результате проведения экспериментальных работ получены зависимости  $\rho_v = f(C_v)$  для растворов солей NaCl, CaCl<sub>2</sub>, и MgCl<sub>2</sub>, которые хорошо совпадают с теоретическими данными в областях низких и средних минерализаций растворов и расходятся с последними в области высоких минерализаций. Полученные экспериментальные зависимости можно использовать для более точной интерпретации электрометрических методов ГИС в случаях высокоминерализованных пластовых вод.

Получена сравнительная характеристика изменения УЭС с ростом температуры для различных солей и их смесей.

В дальнейшем необходимо изучение влияния различных солей и их смесей в различных соотношениях и концентрациях, особенно в области высокой минерализации, на УЭС, не только при атмосферных, но и при пластовых условиях в целях корректной количественной интерпретации электрометрии ГИС.

*Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема: «Прогноз состояния ресурсной базы нефтегазового комплекса России на основе системных исследований перспектив нефтегазоносности природных резервуаров в карбонатных, терригенных и сланцевых формациях», № АААА-А19-119030690047-6).*

## Литература

1. Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. Петрофизика: Учеб. для вузов. М.: Недра, 1991. 368 с.
2. Латышова М.Г., Мартынов В.Г., Соколова Т.Ф. Практическое руководство по интерпретации данных ГИС. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. 327 с.
3. Стрельченко В.В. Геофизические исследования скважин. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2008. 551 с.
4. Shlumberger log interpretation charts. 2009. <http://www.slb.com>, 2009. (Дата обращения 20.09.2019).
5. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия. М.: Высш. школа, 1984. 519 с.

## Experimental exploration of the effect of NaCl and other salts solution mineralization on the electrical resistivity of the solution

O.M. Ponomarenko<sup>1,2\*</sup>, K.A. Istomina<sup>1</sup>, L.D. Makasheva<sup>1</sup>, M.N. Bolshakov<sup>2</sup>

1 – Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow;

2 - Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

E-mail: \*ponomarenko.o@gubkin.ru

**Abstract.** In this research, we delve into changing electrical resistivity of formation water models depending on mineralization of NaCl solutions at different temperatures. We look at low- to medium-mineralized solutions as well as the ones with high and ultra-high mineralization. The main goal of this research is the elaboration of known relations  $\rho_w = f(C_w, t)$  in areas of high and ultra-high mineralization. As a result of several experiments, some relations were yielded, the ones that have a strong correlation with theoretical values in areas of low and medium solution mineralization, and a few more that differ from the last ones in the area of high mineralization.

**Keywords:** formation water models, solution mineralization, changing electrical resistivity, experimental dependence.

**Citation:** Ponomarenko O.M., Istomina K.A., Makasheva L.D., Bolshakov M.N. Experimental exploration of the effect of NaCl and other salts solution mineralization on the electrical resistivity of the solution // Actual Problems of Oil and Gas. 2019. Iss. 4(27). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-27.art7> (In Russ.).

### References

1. Dobrynin V.M., Vendelshtein B.Y., Kozhevnikov D.A. Petrophysics: Textbook for universities. Moscow: Nedra, 1991. 368 p. (In Russ.).
2. Latyshova M.G., Martynov V.G., Sokolova T.F. Log data interpretation: Practical guide. Moscow: Nedra-Biznestsentr, 2007. 327 p. (In Russ.).
3. Strelchenko V.V. Well logging investigations. Moscow: Nedra-Biznestsentr, 2008. 551 p. (In Russ.).
4. Schlumberger log interpretation charts. 2009. <https://www.slb.com> (Accessed on 20.11.2019).
5. Antropov L.I. Theoretical electrochemistry. Moscow: Vysshaya Shkola, 1984. 519 p. (In Russ.).