

ПРЕПРИНТ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Методы оценки параметров двойного электрического слоя глинистых грунтов на основе супензионного эффекта

Параметры двойного электрического слоя (ДЭС) глинистых грунтов, такие как толщина ДЭС, знак и величина заряда глинистой частицы, его поверхностная плотность и др., как известно, обуславливают все основные физико-химические свойства глинистых грунтов (такие как набухаемость, усадочность, диффузионно-осмотические явления и др.), а также определяют формирование структурных связей, прочность коагуляционных контактов между глинистыми частицами, что в конечном итоге обуславливает деформируемость и прочность глинистых грунтов [1-4]. Однако большинство методов оценки ДЭС глинистых грунтов являются лабораторными и требуют специальной аппаратуры для электроинженерных исследований.

Поэтому разработка простых и надежных методов оценки параметров ДЭС глинистых грунтов в том числе в полевых условиях, имеет важное практическое значение при инженерно-геологических, инженерно-геофизических и инженерно-экологических исследованиях и изысканиях. В этой связи в статье анализируются возможности современных методов оценки параметров ДЭС в глинистых грунтах и их применения в полевых условиях.

Королёв Владимир Александрович

Профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, д. г.-м. н., г. Москва, Россия
va-korolev@bk.ru

Евтихов Макар Владимирович

Магистрант кафедры инженерной и экологической геологии, геологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова», Москва, Россия
emv649@yandex.ru

Введение

Классическими методами оценки параметров двойного электрического слоя в глинистых грунтах считаются методы электрофореза, электроосмоса и поверхностной проводимости, но для их использования требуется применение специализированного оборудования и проведение достаточно сложных лабораторных испытаний, в связи с чем весьма актуальной представляется разработка более простых методов, не требующих специализированного лабораторного оборудования и применимых в полевых условиях изысканий, основанных, например, на супензионном эффекте [4].

Объектом настоящего исследования выступают глинистые грунты различного состава, а также различные коллоидные системы, такие как золи, эмульсии, супензии.

Предметом исследования является оценка параметров ДЭС глинистых частиц, найденных по результатам определения супензионного эффекта в этих грунтах. Рассмотрим кратко имеющиеся методы оценки параметров ДЭС.

Метод оценки параметров двойного электрического слоя на основе поверхностной проводимости

ПРЕПРИНТ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

При протекании электрического тока через глинистый грунт общая проводимость χ последнего складывается из объемной проводимости порового раствора χ_v и поверхностной проводимости χ_s за счет двойных электрических слоев глинистых частиц [1].

На основе измеренной по проводимости грунта величины χ_s можно рассчитать величину K_s , называемую удельной поверхностной электрической проводимостью и задаваемую выражением (1):

$$K_s = \frac{\chi_s n_0}{S_0} \quad (1)$$

где S_0 – площадь поперечного сечения грунта, а n_0 – его пористость.

Величина K_s определяется проводимостью двойных электрических слоев глинистых частиц, что позволяет на ее основе определить их параметры, но методика расчета этих параметров достаточно сложна и не будет подробно описываться в рамках данной работы.

Метод оценки параметров двойного электрического слоя на основе электрофореза

При приложении к суспензии глинистого грунта разности потенциалов наблюдается движение заряженных глинистых частиц к противоположно заряженному электроду относительно считающейся неподвижной жидкой фазы, причем скорость такого движения определяется геометрией и электрическим зарядом глинистых частиц, а также параметрами раствора, благодаря чему представляется возможным оценить параметры двойных электрических слоев.

Основным законом, связывающим скорость движения глинистых частиц в электрическом поле с параметрами их двойных электрических слоев, считается уравнение Гельмгольца – Смолуховского, предполагающее линейную зависимость скорости от электрохимического потенциала (ζ -потенциала) (2) [3]:

$$\nu_{\text{эф}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta E}{4\pi\eta} = K_{\text{эф}} E \quad (2)$$

где $\nu_{\text{эф}}$ – скорость движения глинистых частиц, ε_0 – электрическая постоянная, ε – относительная диэлектрическая проницаемость раствора, η – его вязкость, E – напряженность электрического поля.

Позже выражение (2) было уточнено Духиным и Дерягиным (1976) [2,3] за счет учета релаксационного эффекта и сил электрофоретического торможения, вызванных электроосмотическим потоком раствора. Полученное ими уравнение обычно записывают в следующем виде (3):

$$\nu_{\text{эф}} = \frac{2\varepsilon \varepsilon_0 \zeta E}{3\pi\eta} f\left(\frac{d}{\delta}\right) \quad (3)$$

где d – диаметр частицы, δ – толщина дебаевской ионной атмосферы, f – функция, описывающая релаксационный эффект.

Таким образом для определения электрохимического потенциала на основе электрофореза требуется заполнить часть капилляра суспензией, а остальную часть раствором, аналогичным по составу поровому, а затем приложить разность потенциалов. В таком случае по перемещению границы раствор-суспензия представляется возможным определить скорость перемещения глинистых частиц, что позволяет рассчитать электрохимический потенциал на основе уравнения (2) или уравнения (3) [2].

ПРЕПРИНТ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

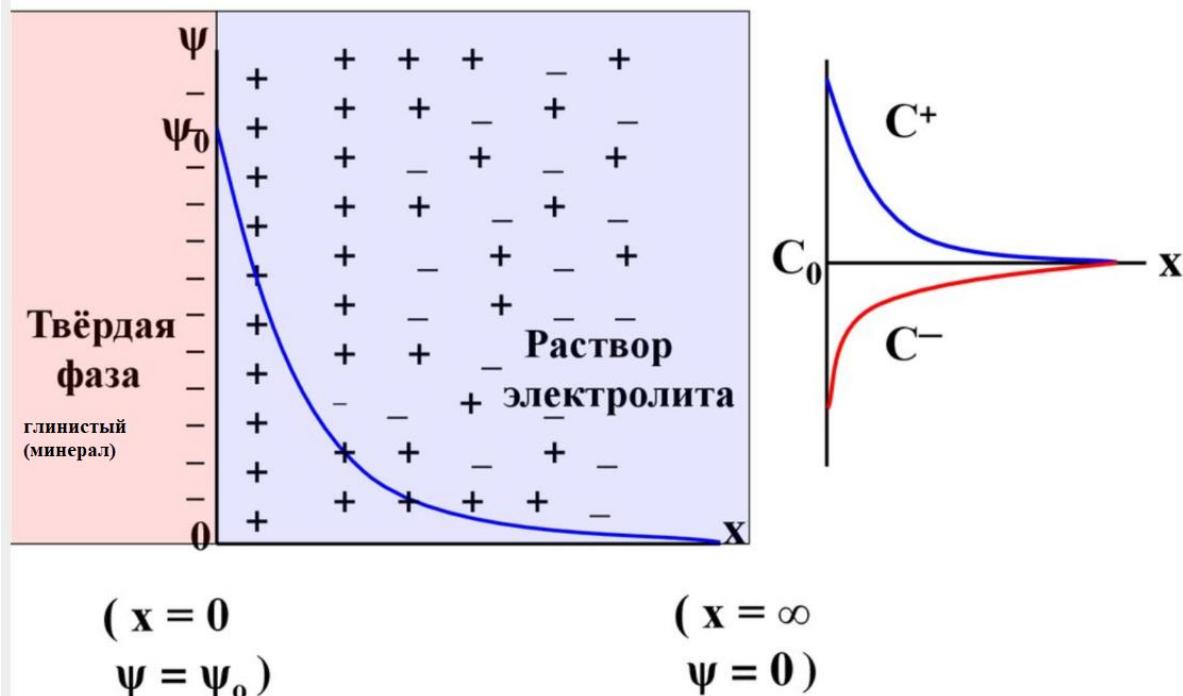


Рис. Строение ДЭС вблизи минеральной поверхности (В.А.Королев)

Метод оценки параметров двойного электрического слоя на основе электроосмоса

Согласно современным представлениям, диффузные части двойных электрических слоев имеют противоположный по отношению к глинистым частицам электрический заряд, благодаря чему при приложении к грунту разности потенциалов наблюдается возникновение потока жидкой фазы относительно неподвижной твердой компоненты [2].

Как было показано многими исследователями, в первом приближении электроосмотический поток также описывается уравнением Гельмгольца – Смолуховского (4) [2]:

$$\nu_{\text{зо}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta E}{4\pi\eta} = K_{\text{зо}} E \quad (4)$$

где $\nu_{\text{зо}}$ – скорость движения жидкой фазы, ε_0 – электрическая постоянная, ε – относительная диэлектрическая проницаемость раствора, η – его вязкость, E – напряженность электрического поля.

Истинную скорость движения порового раствора определить достаточно сложно в связи с неоднородностью геометрии порового пространства, обусловленной полиминеральностью грунтов, различием в геометрии глинистых частиц и образуемых ими микроструктур глинистых грунтов, которые значительно изменяются в зависимости от состава и степени литификации глинистых грунтов. В связи с этим на практике вместо истинной скорости движения порового раствора гораздо чаще пользуются его расходом, в связи с чем уравнение (4) принято записывать в виде (5) [3]:

$$Q_{\text{зо}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta F E}{4\pi\eta} \quad (5)$$

где F – суммарная площадь пор.

Согласно теории Гельмгольца – Смолуховского, ζ -потенциал не зависит от ширины зазора между частицами глины или радиуса пор, а следовательно, не должен зависеть от влажности водонасыщенных глин при их уплотнении. Однако на практике многие данные свидетельствуют об обратном, что привело исследователей к выводу о необходимости введения поправок в уравнение

ПРЕПРИНТ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

(5). Это связано в первую очередь с тем, что толщина ДЭС становится сопоставимой с размером пор и требуется учет перекрытия ДЭС различных глинистых частиц, для чего вводятся различные поправочные коэффициенты γ (6) [2]:

$$\zeta = \gamma \zeta' \quad (6)$$

где ζ — истинное значение электрохимического потенциала, ζ' — значение, определенное по теории Гельмгольца — Смолуховского.

На основе теории термодинамики необратимых процессов Н.В. Чураевым и Б.В. Дерягиным (1966) было выведено уравнение, учитывающее взаимодействие диффузных слоев ДЭС с помощью введения поправочного множителя в классическое уравнение Гельмгольца — Смолуховского. Аналогичное выражение с поправкой для коэффициента электрососмоса было получено Н.Ф. Бондаренко (1973), которое применимо к капиллярно-пористым системам, в том числе и глинистым грунтам. Согласно этому выражению, поправочный коэффициент γ составляет (7) [2]:

$$\gamma = \frac{1}{1 - \frac{\delta}{H} \tanh \frac{H}{\delta}} \quad (7)$$

где δ — толщина дебаевской ионной атмосферы, H — зазор (расстояние) между сближаемыми частицами.

Использование выражения (7) и ему подобных для оценки электрохимического потенциала глинистых частиц осложняется отсутствием практических методов определения величин H и δ , которые к тому же имеют различные значения в различных точках в связи с полидисперсностью глин и наличием контактов между частицами.

Метод оценки параметров двойного электрического слоя на основе супензионного эффекта в отличие от вышеописанных, может применяться и в полевых условиях, поскольку не требует сложной лабораторной техники. Для измерения супензионного эффекта в полевых условиях необходимо иметь лишь портативный pH-метр и дистиллированную воду для приготовления супензий изучаемых грунтов [2,4]. Концентрации ионов в пределах двойного электрического слоя и за его пределами значительно различаются, благодаря чему измеренные концентрации различных ионов в супензии и в равновесном поровом растворе также будут различаться. Наиболее исследованным проявлением данного эффекта является супензионный эффект, проявляющийся в различии измеряемых концентраций ионов водорода, что выражается в несовпадении величин pH в супензии и равновесном поровом растворе. Величину супензионного эффекта (ΔpH) определяют следующим образом (8) [2-4,5]:

$$\Delta pH = pH_{\text{суп}} - pH_{\text{раст}} \quad (8)$$

где $pH_{\text{суп}}$ — величина pH в равновесном растворе, а $pH_{\text{раст}}$ — значение pH в супензии.

На величину супензионного эффекта (ΔpH) влияют те же факторы, что и на строение ДЭС, среди которых стоит отметить следующие [2,3]:

- **Концентрация супензии или влажность грунта**, с ростом которых супензионный эффект (ΔpH) сначала увеличивается, а затем снижается, что может быть связано со степенью пептизации глинистых частиц. В литературе, однако, содержатся противоречивые сведения о факторах, влияющих на супензионный эффект в глинах [3,4,5].
- **Концентрация порового раствора (электролита)**: Увеличение концентрации приводит к снижению величины супензионного эффекта.
- **Минеральный состав и дисперсность**, так как различные глинистые минералы обладают различной удельной поверхностью, формой кристаллов и количеством изоморфных замещений, что определяет общий заряд частиц. На величину супензионного эффекта влияют те же факторы, что и на параметры двойных электрических слоев глинистых частиц, что позволяет оценивать эти параметры на основе супензионного эффекта. Однако зависимость супензионного эффекта (ΔpH) от pH для глинистых грунтов остается слабо изученной. [4]. В частности, отрицательный

ПРЕПРИНТ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

заряд глинистых частиц способствует концентрированию вблизи их поверхности ионов водорода, что проявляется в отрицательных величинах супензионного эффекта, а положительный заряд частиц, наоборот способствует концентрированию гидроксильных групп, что выражается в положительных величинах супензионного эффекта. В точке нулевого заряда супензионный эффект не регистрируется. Таким образом, *знак супензионного эффекта соответствует знаку заряда глинистых частиц.*

Зависимость величины супензионного эффекта ΔpH от величины общего заряда частиц q является гораздо более сложной, но ее можно представить в виде некоторой функции $\Delta pH = \Delta pH(q)$ [4].

Если предположить, что радиус сходимости разложения функции $\Delta pH(q)$ в ряд Маклорена превосходит предполагаемые величины q (необходимым условием является конечно производной ΔpH по q при $q = 0$), то функцию $\Delta pH(q)$ можно заменить соответствующим рядом ($\sum_{n=0}^{\infty} K_n q^n$). Из общих сведений о супензионном эффекте известно, что при среднем заряде глинистых частиц равном или близком к 0 супензионный эффект не проявляется, а значит можно считать, что коэффициент K_0 равняется 0. Практически для всех глинистых грунтов средние заряды их частиц значительно меньше 1 Кл/г, а значит при общей массе глинистого грунта в супензии не более 1 г членами q^n при n большем или равном 2 также можно пренебречь ввиду их относительной малости [4].

Таким образом, в первом приближении можно предполагать, что *величина супензионного эффекта прямо пропорциональна общему заряду глинистых частиц* и коэффициентом пропорциональности служит некоторая константа $K_{\Delta pH}$, которая здесь будет именоваться «постоянной супензионного эффекта». Данная постоянная зависит от температуры супензии, ее объема; концентрации и pH электролита, но при соблюдении равенства этих параметров ее можно считать равной для супензий различных глинистых грунтов. Важным следствием из этого является то, что в супензиях с одинаковыми концентрациями и электролитами величины супензионного эффекта оказываются пропорциональными общему заряду частиц, а значит средние заряды глинистых грунтов оказывается возможным сравнивать исходя из равенства (9) [4]:

$$\left(\frac{\Delta pH}{t\bar{q}} \right)_{sol,C,T} = K_{\Delta pH} \equiv const \quad (9)$$

где ΔpH — величина супензионного эффекта, t — масса навески грунта, \bar{q} — средний заряд глинистых частиц, а индекс sol, C, T обозначает постоянство электролита, концентрации супензии и температуры.

Толщина двойного электрического слоя δ согласно основным теориям (Гуи – Чепмена, Дебая – Гюкеля, Штерна и др.) приблизительно одинаковая и не зависит от свойств частиц и определяется исключительно концентрацией раствора электролита. Согласно теории Гуи – Чепмена толщина ДЭС определяется следующим образом (10) [4]:

$$\delta = \frac{1}{F} \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 RT}{2\pi \sum_i Z_i^2 C_{\infty,i}}} \quad (10)$$

где F — постоянная Фарадея, $\varepsilon \varepsilon_0$ — диэлектрическая проницаемость среды, R — универсальная газовая постоянная, T — температура, Z_i — заряд иона i , $C_{\infty,i}$ — концентрация иона i в условиях отсутствия электростатического потенциала.

С учетом того, что для определения супензионного эффекта требуется измерить pH равновесного раствора ($pH_{раст}$), толщину двойного электрического слоя представляется возможным оценить сверху следующим образом (11):

$$\delta \lesssim \frac{1}{2F} \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 RT}{\pi}} \times 10^{\frac{4 - |pH_{раст} - 7|}{2}} \approx 389 \times 10^{-\frac{|pH_{раст} - 7|}{2}} \text{ м} \quad (11)$$

ПРЕПРИНТ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

По сведениям о заряде глинистых частиц и толщине двойного электрического слоя можно оценить электростатический потенциал поверхности глинистых частиц φ_0 , чего не позволяет ни один из перечисленных ранее методов, так как в отличие от последних метод супензионного эффекта не требует движения частиц и их ДЭС относительно друг друга, а следовательно, не нуждается в возникновении поверхности скольжения. На основе теории Гуи – Чепмена **электростатический потенциал φ_0 можно оценить сверху следующим образом (12) [4]:**

$$\varphi_0 = \frac{\bar{q}\delta}{\varepsilon\varepsilon_0} \lesssim \frac{\Delta pH}{mK_{\Delta pH}} \frac{1}{2F} \sqrt{\frac{RT}{\varepsilon\varepsilon_0\pi}} \times 10^{\frac{4-|pH-7|}{2}} \approx \frac{\Delta pH}{mK_{\Delta pH}} \times 542 \times 10^{-\frac{|pH-7|}{2}} \quad (12)$$

Заключение

Таким образом, на основе супензионного эффекта представляется возможным оценить основные параметры ДЭС наравне с классическими методами, такими как метод поверхностной проводимости, электрофорез и электроосмос, но в то же время для него не требуется применения специализированного оборудования или проведения сложных лабораторных испытаний. Классические методы предполагают движение диффузных частей двойных электрических слоев относительно глинистых частиц, а следовательно, не позволяют оценить истинный потенциал поверхности, а только электрокинетический (ζ -) потенциал, т.е. потенциал на поверхности скольжение, положение которой до сих пор считается неясным. Метод же супензионного эффекта в отличие от классических методов, позволяет оценить истинный потенциал поверхности, но не позволяет оценить потенциал на поверхности скольжения. Его преимуществом также является возможность применения в полевых условиях.

Список литературы

1. Злочевская Р.И., Королёв В. А. Электроповерхностные явления в глинистых породах / Уч. пособие. — Издательство Московского университета Москва, 1988. — 177 с.
2. Королёв В.А. Лабораторные работы по электроповерхностным явлениям в грунтах / Учебное пособие. — М., ООО «Самполиграфист», 2022. — 136 с.
3. Королёв В.А. Теория электроповерхностных явлений в грунтах и их применение / Изд. 2-е, перераб. и доп. //Электронное издание. — КДУ, Добросвет, г.Москва, 2023. — ISBN 978-5-7913-1302-7. — DOI: 10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1302-7-2023-498.
4. Королёв В.А., Евтихов М.В. Методика определения супензионного эффекта в глинистых грунтах // Грунтоведение. — 2025. — Т. 24, № 1. — С. 43–49.
5. Чернобережский Ю. М. Исследование супензионного эффекта и устойчивости дисперсных систем в связи с их электроповерхностными свойствами. (монография) — Ленинград, 1978. — 414 с.

REFERENCES ►

1. Zlochevskaya R.I., Korolev V.A. Electrical Surface Phenomena in Clayey Rocks / Tutorial. — Moscow University Publishing House, Moscow, 1988. — 177 p.
2. Korolev V.A. Laboratory Work on Electrical Surface Phenomena in Soils / Tutorial. — Moscow, ООО "Sampoligrafist", 2022. — 136 p.
6. 3. Korolev V.A. Theory of electric surface phenomena in soils and their application/Ed. 2nd, revised. and add .//Electronic edition. - KDU, Dobrosvet, Moscow, 2023. — ISBN 978-5-7913-1302-7. — DOI: 10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1302-7-2023-498.
7. 4. Korolev V.A., Evtikhov M.V. Methods for determining the suspension effect in clay soils//Soil science. — 2025. - T. 24, NO. 1. - S. 43-49.
8. 5. Chernoberezhsky Yu. M. Study of suspension effect and stability of disperse systems in connection with their electric surface properties. (monograph) - Leningrad, 1978. - 414 s.

ПРЕПРИНТ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

KOROLEV V.A.

Professor, Department of Engineering and environmental geology
Geological Faculty of Moscow State University
M.V. Lomonosov, d. G.-m. N., Moscow,
Россия va-korolev@bk.ru

M.V. EVTIKHOV

Master's student of the Department of Engineering and Environmental Geology, Geological Faculty of Moscow State University named after MV Lomonosov," Moscow, Russia emv649@yandex.ru

METHODS OF ESTIMATING PARAMETERS OF DOUBLE ELECTRIC LAYER OF CLAY SOILS BASED ON SUSPENSION EFFECT

*

Abstract. Parameters of the double electric layer (DPS) of clay soils, such as the thickness of the DPS, the sign and value of the charge of the clay particle, its surface density, etc., as is known, determine all the main physicochemical properties of clay soils (such as swelling, shrinkage, diffusion-osmotic phenomena, etc.), and also determine the formation of structural bonds, the strength of coagulation contacts between clay particles, which ultimately determines the deformability and strength of clay soils [1-4]. However, most methods for assessing the DPS of clay soils are laboratory and require special equipment for electrokinetic studies.

Therefore, the development of simple and reliable methods for assessing the parameters of DPS of clay soils, including in the field, is of great practical importance in engineering-geological, engineering-geophysical and engineering-ecological studies and surveys. In this regard, the article analyzes the possibilities of modern methods for assessing DPS parameters in clay soils and their application in the field.

Keywords: clay soils, double electric layer, electrophoresis, electroosmosis, surface conductivity, suspension effect

REFERENCE FOR CITATION: Korolev V.A., Evtikhov M.V. Methods for estimating parameters of the double electric layer of clay soils. - GeolInfo, 2025, T. No., p. -. DOI