

# ИННОВАЦИОННОЕ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 544.623.032.73:624.131.413

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДИФFUЗНОГО СЛОЯ ГЛИНИСТЫХ ЧАСТИЦ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЧВ

Д.А. Безик<sup>1</sup>, Е.И. Безик<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО Брянский государственный аграрный университет  
ул. Советская 2а, с. Кокино, Выгоничский р-н, Брянская обл., Россия, 243365

<sup>2</sup> МБОУ-Кокинская СОШ  
ул. Школьная, 1а, д. Скрябино, Выгоничский р-н, Брянская обл., Россия, 243365

В статье рассматриваются вопросы строения диффузного слоя коллоидных частиц почвы. Приведены аналитические выражения для распределения концентрации ионов и электрического потенциала по толщине водной пленки, покрывающей частицы, а также выражение для ее удельной поверхностной электропроводности. Приводится сравнение зависимости электропроводности от влажности почвы, полученное в эксперименте и расчетным путем.

**Ключевые слова:** диффузный слой, глинистые частицы, электрический потенциал, электропроводность

### Введение

В настоящее время в сельскохозяйственном производстве проявляется тенденция к переходу к системе точного земледелия. Она подразумевает обработку каждого участка поля в соответствии с его локальными потребностями. Это требует разработки быстрых и точных средств диагностики состояния почв. Информативным, быстрым и технологичным способом является диагностика состояния почвы по ее электрическим характеристикам — электропроводности, диэлектрической проницаемости, их частотным зависимостям [9; 11]. Для электророндирования почв применяются разные методы и приборы, выпускаемые промышленностью. В то же время полной теории, описывающей связь электрических параметров почвы с его агротехническими свойствами, пока нет. Создание такой теории весьма актуально.

Теоретическое определение электропроводности — трудная задача, и для ее описания предлагаются различные модели. Например, Родес [12] предложил формулу для расчета электропроводности, учитывающую объемную проводимость твердой, жидкой фаз и поверхностную проводимость. Эта формула показывает

влияние на электропроводность отдельных составляющих почвы, но практически она не может применяться, так как каждый из ее параметров трудно определить.

Некоторые авторы предлагают для практического использования различные эмпирические формулы [11]. Их общим недостатком является узкая область применимости.

Целью настоящей статьи является установление основных факторов и зависимостей, определяющих электропроводность почвы.

### Постановка задачи

Электропроводность почвы определяется проводимостью твердой фазы и проводимостью почвенного раствора. Кроме того, некоторое влияние оказывает и газовая среда [2]. В проводимости почвенного раствора часто выделяют поверхностную проводимость, обусловленную диффузным слоем минеральных и органических коллоидных частиц и проводимость порового раствора [5; 11; 12].

Твердая фаза представлена в почве минеральной и органической частью. Почвенные минералы представлены первичными и вторичными минералами [6]. Из-за гетеровалентных изоморфных замещений ( $\text{SiO}^{4+}$  на  $\text{AlO}^{3+}$ ;  $\text{AlO}^{3+}$  на  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и др.) кристаллы почвенных минералов приобретают нескомпенсированный отрицательный заряд, который компенсируется обменными катионами ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  и др.). При наличии воды ионы (обменные ионы, для глинистых почв чаще всего — катионы), компенсирующие заряд ионов-заместителей, диссоциируют и обуславливают наличие диффузного электрического слоя у минеральных частиц, проводящий электрический ток.

Большинство почв нечерноземной зоны России имеют непроводящие минеральные частицы, поэтому основной вклад в электропроводность вносит почвенный раствор. В зонах с промывным водным режимом засоленность почв невелика. Она составляет от десятков миллиграмм на литр почвенного раствора в подзолистых до нескольких грамм в черноземных почвах [6]. В то же время существенным источником ионов проводимости в почвенном растворе являются обменные катионы коллоидных частиц. Для почв Брянской области емкость катионного обмена (ЕКО) составляет десятые доли моль/л [8]. Таким образом, в ионной проводимости почвенного раствора рассматриваемых почв основную роль играют именно обменные, а не свободные ионы.

### Определение основных зависимостей

Основной механический состав почвы, глина и глинистые частицы имеют отрицательный поверхностный заряд [5]. Для определения электропроводности необходимо рассмотреть распределение обменных ионов в почвенном растворе.

Рассматривать будем одномерную задачу, т.е. будем считать, что поверхность частиц плоская и изменение концентрации и электрического потенциала зависит от одной координаты. Механической обработке подвергается почва с небольшой влажностью, что характерно и для оптимального роста растений. Поэтому будем рассматривать почву, имеющую небольшую влажность (5 ÷ 30%). Это означает, что минеральные частицы будут находиться не в бесконечной водной среде, а будут покрыты тонкой пленкой воды, толщиной  $l$ . Для экспериментальной про-

верки предложенных зависимостей использованы моноионные глины, поэтому будем считать, что имеется только один вид анионов и катионов.

Определение распределения ионов в диффузном слое представляет собой стандартную задачу по решению уравнения Пуассона-Больцмана [10]:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} \sum_i z_i e n_{i0} \exp\left(\frac{-z_i e \varphi(x)}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $\varphi$  — потенциал электрического поля, В;  $x$  — расстояние от поверхности глинистой частицы, м;  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость воды;  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная;  $z_i$  — заряд  $i$ -го иона;  $e$  — элементарный заряд;  $n_{i0}$  — концентрация  $i$ -го иона в точке с нулевым потенциалом, м<sup>-3</sup>;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура, К.

В нашем случае раствор представляет собой ограниченную пленку, и концентрации  $n_{i0}$  различны для различных ионов, даже в случае симметричного электролита.

Путем однократного интегрирования из уравнения Пуассона-Больцмана для плоской поверхности можно получить выражение для напряженности электрического поля в диффузном слое:

$$E = \frac{d\varphi}{dx} = \sqrt{\frac{2kT}{\varepsilon\varepsilon_0} \left( n_0^+ \left( e^{\frac{z^+ e \varphi}{kT}} - 1 \right) + n_0^- \left( e^{\frac{z^- e \varphi}{kT}} - 1 \right) \right)}. \quad (2)$$

В случае хемосорбции или при рассмотрении «чистых почв» с очень малой засоленностью можно считать, что ионы одного вида полностью адсорбированы, а другие — могут диссоциировать. В нашем случае могут диссоциировать катионы, а отрицательные заряды жестко связаны с глинистыми частицами. Тогда концентрацию анионов в растворе можно принять равной нулю:  $n_0^- = 0$ .

В этом случае уравнение (2) также можно проинтегрировать и с использованием граничного условия  $\varphi|_{x=l} = 0$  получим распределение потенциала в тонкой пленке воды на коллоидной частице:

$$\varphi = \frac{2kT}{ze} \ln \left( \cos \left( \sqrt{\frac{z^2 e^2 n_0^+}{2\varepsilon\varepsilon_0 kT}} (l-x) \right) \right). \quad (3)$$

Будем считать, что при  $x = 0$  начинается диффузный слой, а слой Штерна расположен при  $x < 0$ , и будем рассматривать только распределение ионов в диффузном слое, который фактически простирается на всю толщину водной пленки. Тогда значение потенциала Штерна:

$$\varphi_d = \frac{2kT}{ze} \ln \left( \cos \left( \sqrt{\frac{z^2 e^2 n_0^+}{2\varepsilon\varepsilon_0 kT}} l \right) \right), \quad (4)$$

т.е. он зависит от толщины водяной пленки.

Концентрация катионов, согласно Гуи и Чепмену, подчиняется распределению Пуассона:

$$n^+ = n_0^+ e^{-\frac{ze\varphi}{kT}},$$

откуда, используя (3), можно получить закон распределения катионов в диффузном слое:

$$n^+ = n_0^+ \cos^{-2} \left( \sqrt{\frac{z^2 e^2 n_0^+}{2\varepsilon\varepsilon_0 kT}} (l-x) \right), \quad (5)$$

а также концентрацию катионов около слоя Штерна:

$$n_d^+ = n_0^+ \cos^{-2} \left( \sqrt{\frac{z^2 e^2 n_0^+}{2\varepsilon\varepsilon_0 kT}} l \right). \quad (6)$$

Поверхностная плотность катионов  $N_{уд}$  в диффузном слое (на  $1 \text{ м}^2$ ) получается интегрированием (5):

$$N_{уд} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 kT n_d^+}{z^2 e^2}} \sqrt{1 - \frac{n_0^+}{n_d^+}} \quad (7)$$

или

$$N_{уд} = \frac{\sqrt{n_d^+ - n_0^+}}{t}, \quad (8)$$

где  $t = \sqrt{\frac{z^2 e^2}{2\varepsilon\varepsilon_0 kT}}$ .

Эта постоянная, фактически присутствующая в (3)—(7), схожа с эффективной толщиной ионной атмосферы в теории Дебая-Хюккеля, однако в выражении для  $t$  концентрация  $n_0$  — это не концентрация электролита на удалении от коллоидной частицы, а концентрация в точке, где потенциал электрического поля равен нулю.

Максимальная поверхностная плотность обменных катионов в диффузном слое определяется емкостью катионного обмена (ЕКО) почвы:

$$N_{ад.макс} = \frac{ЕКО \cdot N_A}{S_{уд}}, \quad (9)$$

где ЕКО — емкость катионного обмена, моль/кг;  $S_{уд}$  — удельная площадь поверхности глинистых частиц,  $\text{м}^2/\text{кг}$ ;  $N_A$  — число Авогадро.

Для адсорбции обменных катионов примем модель мономолекулярной адсорбции Ленгмюра [1. С. 511]. В этой модели количество адсорбированных ионов зависит от концентрации адсорбируемых ионов, однако в нашем случае мы будем рассматривать зависимость не от концентрации электролита в поровом растворе, а от концентрации противоионов вблизи слоя Штерна  $n_d^+$ . Согласно Ленгмюру:

$$N_{\text{ад}} = N_{\text{ад.макс}} \frac{k_{\text{ад}} n_d^+}{1 + k_{\text{ад}} n_d^+}, \quad (10)$$

где  $k_{\text{ад}}$  — коэффициент адсорбции,  $\text{м}^3$ .

Коэффициент адсорбции в уравнении (10) равен отношению констант адсорбции и десорбции и соответственно зависит от скоростей этих двух процессов, в частности от температуры.

Количество некомпенсированных анионов коллоидных частиц равно количеству катионов в диффузном слое:

$$N_{\text{ад.макс}} - N_{\text{ад}} = N_{\text{уд}}$$

Из этого уравнения и (10) можно получить формулу

$$\frac{\text{ЕКО} \cdot N_A}{S_{\text{уд}}} = \left( 1 + k_{\text{ад}} \frac{n_0^+}{\cos^2(t\sqrt{n_0^+})} \right) \frac{\sqrt{n_0^+}}{t} \text{tg}(t\sqrt{n_0^+}), \quad (11)$$

из которой по заданной толщине водяной пленки  $l$ , емкости катионного обмена ЕКО и коэффициенту адсорбции  $k_{\text{ад}}$  можно (путем численного решения) определить концентрацию  $n_0^+$ , а затем распределение ионов по толщине диффузного слоя и его удельную поверхностную электропроводность.

Поверхностная электропроводность  $\gamma_s$  диффузного слоя равна

$$\gamma_s = \int_0^l \gamma dx = \int_0^l z e n^+ b^+ dx, \quad (12)$$

где  $\gamma$  — удельная электропроводность раствора, находящегося на расстоянии  $x$  от частицы,  $\text{См/м}$ ;  $b^+$  — подвижность ионов,  $\text{В}/(\text{м} \cdot \text{с})$ .

Как отмечено в литературе, свойства связанной воды меняются при приближении к коллоидной частице [9]. Ориентированность молекул воды возрастает по мере приближения к адсорбирующей поверхности, а подвижность сольватированных ионов — уменьшается. Вопрос о подвижности ионов представляет собой отдельную задачу, учитывающую зависимость сольватации и собственно подвижности от толщины водяной пленки, а также включающий гидродинамическую задачу.

Если подвижность ионов принять равной скорости движения воды в пленке под действием кулоновской силы на ионы (электроосмос), то она равна

$$b^+ = \frac{ze}{\eta t^2} \ln \left( \frac{\cos(t\sqrt{n_0^+}(l-x))}{\cos(t\sqrt{n_0^+}l)} \right), \quad (13)$$

где  $\eta$  — вязкость воды, Па · с.

Тогда из (5), (12) и (13) удельная поверхностная электропроводность водяной пленки на поверхности глинистых частиц:

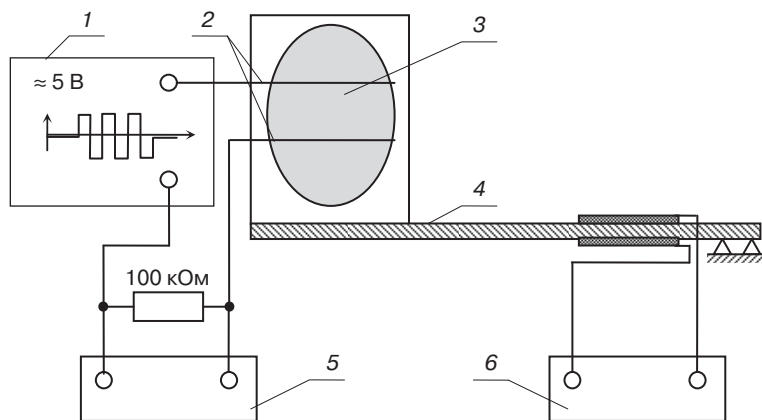
$$\gamma_s = \frac{z^2 e^2 \sqrt{n_0^+}}{\eta l^3} \left( \operatorname{tg}(t\sqrt{n_0^+}l) - t\sqrt{n_0^+}l \right). \quad (14)$$

Электропроводность почвы зависит от ее дисперсного и минерального состава, формы и ориентации частиц, но если эти частицы не проводят электрический ток, то электропроводность почвы будет пропорциональна выражению (14).

### Экспериментальная проверка и обсуждение результатов

Для проверки полученных выражений был проведен эксперимент по определению электропроводности почвы в зависимости от ее влажности.

Экспериментальная проверка производилась на установке, представленной на рис. 1. Измерение проводимости почвы проводилось на переменном токе кондуктометрическим методом по двухэлектродной схеме включения.



**Рис. 1.** Схема установки по измерению проводимости почвы:

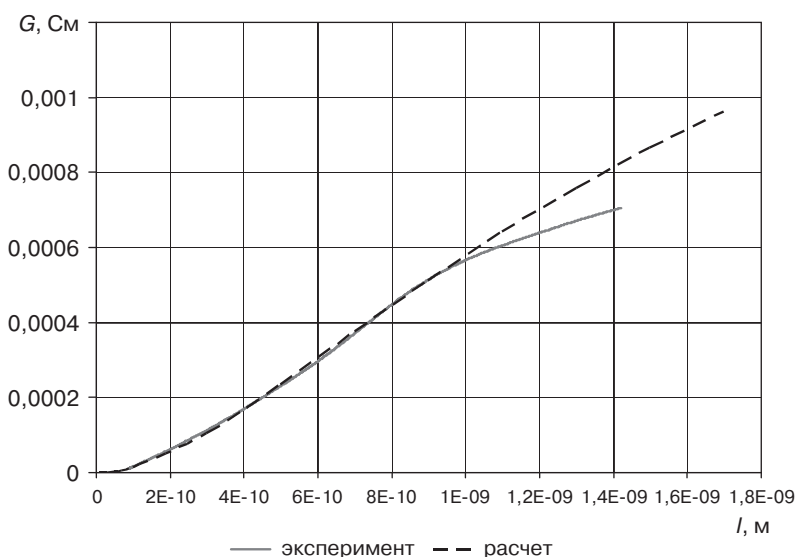
- 1 — источник питания кондуктометрической ячейки; 2 — электроды;
- 3 — стеклянная подложка с исследуемым образцом; 4 — тензобалка;
- 5 — выход к измерителю сопротивления; 6 — выход к измерителю приращения массы

Исследуемые образцы помещали в виде суспензии на стеклянную подложку с электродами из инертного сплава ПдВ-20. Т.0, 15ПдВ-20. Подложка закреплялась на тензобалке, подключенной к схеме измерения приращения массы. Образцы

предварительно увлажняли дистиллированной водой, которая постепенно испарялась и поглощалась кюветой с хлористым кальцием. Процесс протекал медленно, около суток, что позволяло считать температуру образца неизменной. Измерения проводились через заданные промежутки времени (30 с) в автоматическом режиме под управлением компьютера. Вся установка находилась в термостате.

Для образцов использовали глинистые дерново-подзолистые почвы Брянской области из горизонта В без органических примесей. Почва использовалась после предварительной обработки растворами солей для получения моноионных образцов по методике К.К. Гедройца [5].

На рисунке 2 показаны графики проводимости моноионной глины от влажности, а также расчетная зависимость, параметры которой ( $k_{ад}$  и масштабный коэффициент) были подобраны методом наименьших квадратов. Концентрация катионов на границе водной пленки рассчитывалась по уравнению (11) по заданной ЕКО и удельной площади  $S_{уд}$ . Подобранный значение коэффициента адсорбции для приведенного графика  $k_{ад} = 1,5^{-25} \text{ м}^3$ .



**Рис. 2.** Сравнение экспериментальной и теоретической зависимости проводимости почвы от влажности

Согласно рисунку 2 расчетный график достаточно хорошо описывает зависимость проводимости почвы от ее влажности. Некоторое отличие объясняется выбором зависимости подвижности ионов от расстояния до твердой частицы. Кроме того, при выводе расчетных формул не учитывалась адсорбция ионов свободной поверхностью воды. Отклонение расчетной зависимости от экспериментальной при большой толщине водной пленки (влажности) объясняется, по-видимому, переходом от плоского течения электрического тока к объемному.

Такой же эксперимент был проведен и при других температурах. Коэффициент адсорбции  $k_{ад}$  подбирался в каждом случае по методу наименьших квадратов. За-

зависимость коэффициента адсорбции от температуры можно описать уравнением [3. С. 441]:

$$k_{ад} = k_{ад.0} e^{-\frac{Q}{RT}},$$

где  $k_{ад.0}$  — частотный множитель,  $\text{м}^3$ ;  $Q$  — теплота адсорбции, Дж/моль.

Следовательно, зависимость  $k_{ад}(T)$  в координатах  $\ln(k_{ад}), 1/T$ , должна представлять собой прямую. Соответствующий график приведен на рисунке 3 и косвенно подтверждает правильность определения коэффициента адсорбции.

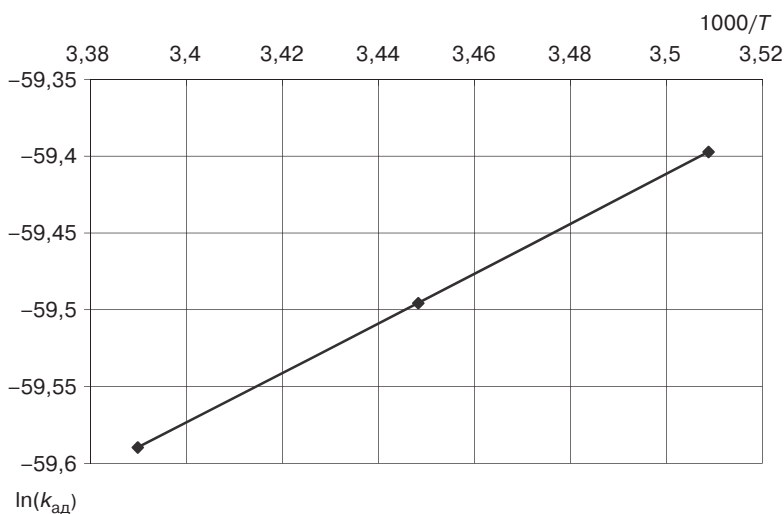


Рис. 3. Зависимость коэффициента адсорбции от температуры

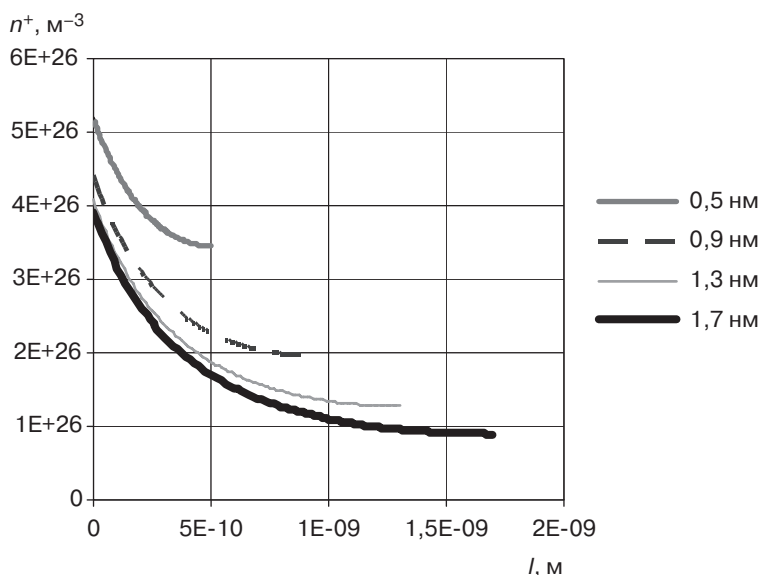


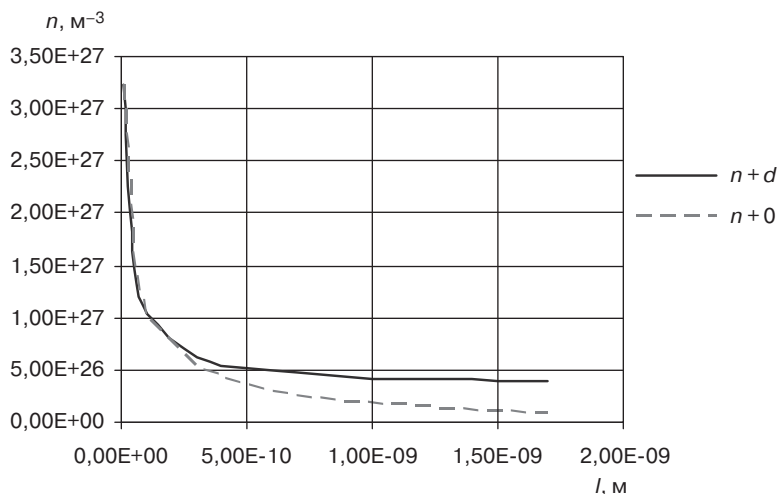
Рис. 4. Распределение обменных катионов в водной пленке на глинистой частице



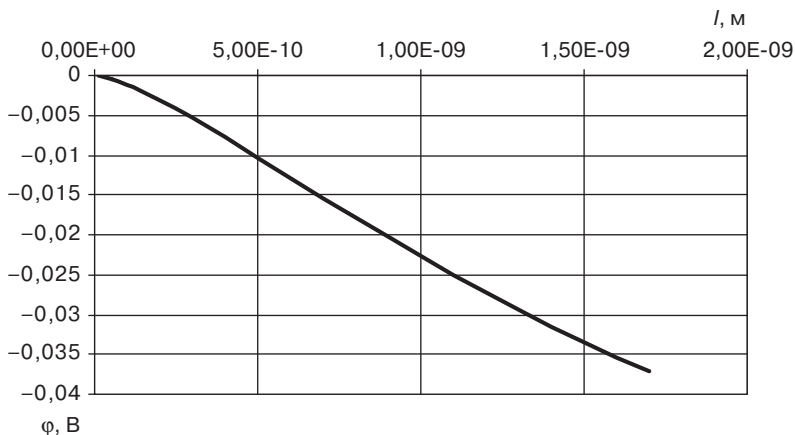
Полученные аналитические зависимости позволяют определить характер изменения концентрации катионов в водной пленке, потенциал Штерна и др.

На рисунке 4 показано распределение обменных катионов по толщине водной пленки. Видно, что по мере уменьшения влажности, т.е. уменьшения толщины водной пленки, увеличивается концентрация ионов, причем как на свободной границе пленки, так и вблизи слоя Штерна.

Диффузный слой коллоидных глинистых частиц отчетливо выражен только в случае большой влажности, когда концентрация катионов велика около частиц, а в остальном объеме она существенно меньше. В этом случае имеет смысл разделять электропроводность на объемную и диффузную (поверхностную), как это делает ряд авторов [5; 11; 12]. Если же влажность почвы не велика, то концентрация обменных катионов практически неизменна по толщине пленки и такое разделение не целесообразно. Различие в концентрациях ионов на свободной границе и около слоя Штерна иллюстрирует рис. 5.



**Рис. 5.** Зависимость концентрации ионов на свободной границе  $n_0^+$  и около слоя Штерна  $n_d^+$  от толщины водной пленки



**Рис. 6.** Зависимость потенциала Штерна от толщины водной пленки (ионы  $K^+$ ,  $T = 293$  К,  $EKO = 0,159$  моль/кг)

Формула (4) показывает, что потенциал Штерна зависит от толщины водной пленки и, соответственно, влажности почвы (рис. 6). Этот потенциал связан с  $\zeta$ -потенциалом, определяющим электрокинетические явления. При деформации почвы может возникать ЭДС, связанная с потенциалом течения, который как раз и определяется  $\zeta$ -потенциалом.

### Выводы

Электропроводность почв в первую очередь определяется электропроводностью ее жидкой фазы. Основными носителями заряда в почвах нечерноземной зоны России являются обменные ионы коллоидных частиц. При расчете электропроводности почв необходимо рассматривать распределение ионов во всем объеме поровой воды, не разделяя объемный слой проводимости и диффузный. Полученные аналитические зависимости позволяют рассчитать распределение ионов в пленке воды на коллоидных частицах почвы, потенциал Штерна и удельную поверхностную проводимость пленки почвенного раствора. При этом основными факторами, определяющими электропроводность почв, является влажность, емкость катионного обмена и удельная поверхность твердой фазы почвы.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Адамсон А.* Физическая химия поверхностей. М.: Мир, 1979. 568 с.
- [2] *Безик Д.А., Гурьянов Г.В.* Влияние газовой фазы на электрические свойства почв // Научное обозрение. 2015. № 11. С. 123—132.
- [3] *Безик Д.А., Гурьянов Г.В., Юдина Е.М.* Электрические явления при обработке почвы // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 1. С. 270—272.
- [4] *Елисеев П.И.* Взаимосвязь некоторых свойств почвы легкого гранулометрического состава гумидной зоны с электрофизическими параметрами: автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М., 2013. 25 с.
- [5] *Злочевская Р.И., Королев В.А.* Электроповерхностные явления в глинистых породах. М.: Изд-во МГУ, 1988. 177 с.
- [6] *Кауричев И.С., Панов Н.П., Розов Н.Н.* и др. Почвоведение / под ред. И.С. Кауричева. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1989. 719 с.
- [7] *Королев В.А.* Связанная вода в горных породах: новые факты и проблемы // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 9. С. 79—85.
- [8] *Просянкин Е.В., Смольский Е.В., Гуца А.С.* Влияние загрязнения нефтью на почвы юго-запада нечерноземной зоны России // Агрохимия. 2012. № 7. С. 74—86.
- [9] *Субботина М.Г., Батье-Салес Хорхе.* Об электропроводности почв в современных условиях // Пермский аграрный вестник. 2013. № 3 (3). URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/ob-elektroprovodnosti-pochv-v-sovremennyh-issledovaniyah>
- [10] *Щукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А.* Коллоидная химия: учебник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2004. 445 с.
- [11] *Corwin D.L.* 2008. Past, present and future trends of soil electrical conductivity measurement using geophysical methods. In: B.J. Allred, J.J. Daniels and M.R. Ehsani (editors) Handbook of Agricultural Geophysics. CRC Press. Boca Raton, FL. Chapter 2 pp. 17—44.
- [12] *Rhoades J.D., Manteghi N.A., Shouse P.J., Alyes W.J.* Soil Sci. Soc. Am. J., 53. 433—439. 1989.

## CALCULATION OF PARAMETERS OF DIFFUSE LAYER OF CLAY PARTICLES AND THEIR INFLUENCE ON THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF THE SOIL

D.A. Bezik<sup>1</sup>, E.I. Bezik<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bryansk state agrarian University  
*Sovetskaya str., 2a, s. Kokino, Vygonichsky district, Bryansk region, Russia, 243365*

<sup>2</sup> MBOU-Kokinskaja school  
*School str., 1a, d. Skryabino, Vygonichsky district, Bryansk region, Russia, 243365*

The article discusses the structure of the diffuse layer of colloidal particles of the soil. The authors present analytical expressions for the concentration distributions for the exchange of ions and electric potential through the thickness of the water film covering the particles. Also given the expression for the specific surface conductivity of colloidal particles. The dependence of the conductivity of the soil moisture obtained in the experiment is compared with the calculated dependence.

**Key words:** diffuse layer, clay particles, electric potential, electrical conductivity

### REFERENCES

- [1] Adamson A. *Fizicheskaya himiya poverhnostej* [Physical chemistry of surfaces]. M.: Mir, 1979. 568 s.
- [2] Bezik D.A., Gur'yanov G.V. *Vliyanie gazovoj fazy na ehlektricheskie svojstva pochv. Nauchnoe obozrenie* [The influence of the gas phase on the electrical properties of soils. Scientific review]. 2015. № 11. S. 123—132.
- [3] Bezik D.A., Gur'yanov G.V., Yudina E.M. *Elektricheskie yavleniya pri obrabotke pochvy. Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Electrical phenomena at the soil. Proceedings of Kuban state agrarian University]. 2015. № 1. S. 270—272.
- [4] Eliseev P.I. *Vzaimosvyaz' nekotoryh svojstv pochvy legkogo granulometricheskogo sostava gumidnoj zony s ehlektrofizicheskimi parametrami: avtoref. diss. ... kand. biol. nauk* [The relationship of some properties of soils of light granulometric composition of humid areas with electrical parameters: abstract. diss. kand. biol. sciences]. M., 2013. 25 s.
- [5] Zlochevskaya R.I., Korolev V.A. *Elektropoverhnostnye yavleniya v glinistyh porodah* [Surface phenomena in argillaceous rocks]. M.: Izd-vo MGU, 1988. 177 s.
- [6] Kaurichev I.S., Panov N.P., Rozov N.N. i dr. *Pochvovedenie. Pod red. I.S. Kauricheva. 4-e izd., pererab. i dop.* [Soil science. Edited by I.S. Kaurichev. 4-e izd., rev.]. M.: Agropromizdat, 1989. 719 s.
- [7] Korolev V.A. *Svyazannaya voda v gornyh porodah: novye fakty i problem. Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal* [The Bound water in rocks: new facts and problems. Soros educational journal]. 1996. № 9. S. 79—85.
- [8] Prosyannikov E.V., Smol'skij E.V., Gushcha A.S. *Vliyanie zagryazneniya nef't'yu na pochvy yugo-zapada nechennozernoj zony Rossii. Agrohimiya* [Effect of oil pollution on soils of the South-West nechernozemny zone of Russia]. 2012. № 7. S. 74—86.
- [9] Subbotina M.G., Bat'e-Sales Horhe. *Ob ehlektroprovodnosti pochv v sovremennyh usloviyah. Permskij agrarnyj vestnik* [About conductivity of soil in modern conditions. Agrarian Bulletin of the Perm]. 2013. № 3 (3). URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/ob-ehlektroprovodnosti-pochv-v-sovremennyh-issledovaniyah>
- [10] Shchukin E.D., Percov A.V., Amelina E.A. *Kolloidnaya himiya: uchebnik. 3-e izd., pererab. i dop.* [Colloid chemistry: textbook. 3-e izd., rev. and extra]. M.: Vyssh. shk., 2004. 445 s.

- [11] Corwin D.L. 2008. Past, present and future trends of soil soil electrical conductivity measurement using geophysical methods. In: B.J. Allred, J.J. Daniels and M.R. Ehsani (editors) Handbook of Agricultural Geophysics. CRC Press. Boca Raton, FL. Chapter 2 pp. 17—44.
- [12] Rhoades J.D., Manteghi N.A., Shouse P.J., Alves W.J. Soil Sci. Soc. Am. J., 53. 433—439. 1989.