

Санкт-Петербургский государственный университет

*Хомутинников Сергей Николаевич*

Выпускная квалификационная работа

***«Оценка влияния постоянных токов системы электрохимической защиты трубопроводов от коррозии на свойства дисперсных грунтов»***

Уровень образования: магистратура

Направление 05.04.01 «Геология»

Основная образовательная программа ВМ.5515.2018. «Геология»

Научный руководитель:  
зав. каф. грунтоведения и  
инженерной геологии ин-та  
наук о Земле,  
к.г.-м. н., доцент  
Бурлуцкий Станислав  
Борисович

Рецензент: главный  
специалист по ПКЗ, ЗАО  
«Трубопроводные системы  
и технологии», к.г.-м.н.  
Яблчанский Анатолий  
Игнатьевич

Санкт-Петербург

2020

## Содержание

Введение .....	3
Глава 1. Основные сведения о подземной коррозии и защите от коррозии .....	5
Глава 2. Электроповерхностные явления в глинистых грунтах .....	17
2.1. Теория двойного электрического слоя .....	18
2.2. Электрокинетические явления .....	24
Глава 3. Основные результаты исследования .....	38
3.1. Геологическое строение участка отбора образцов .....	38
3.1.1. Стратиграфия .....	41
3.2. Описание методики, установки физического моделирования и электрометрического мониторинга .....	52
3.3. Анализ результатов электрометрического мониторинга .....	59
3.4. Анализ изменения физического состояния и механических свойств грунта .....	61
Заключение .....	67
Список литературы .....	68

## Введение

В настоящее время в нашей стране и в мире строится и эксплуатируется большое количество подземных металлических сооружений, в том числе газопроводов, нефтепродуктопроводов, водопроводов, кабелей, компрессорных и насосных станций, и др. Эксплуатация этих производственных объектов несёт достаточно большие риски по причине коррозионных отказов. Поэтому, согласно действующей нормативно-технической документации, данные подземные металлические сооружения подлежат комплексной защите от коррозии. Для подавления процесса электрохимической коррозии подземных металлических сооружений применяют изоляционные покрытия (пассивная защита) и катодную поляризацию подземных коммуникаций (активная защита), создаваемую средствами электрохимической защиты от коррозии. Длительная эксплуатация подземных сооружений приводит к старению и разрушению защитных покрытий. Вследствие этого, подавление электрохимической коррозии требует увеличения величины защитного тока катодной защиты. На трубопроводах, эксплуатируемых более 50 лет выходная сила тока на станциях катодной защиты может достигать до сотни ампер, а плотность защитного тока достигать десятков  $A/m^2$ . Ранее выполненные исследования показали, что в результате катодной поляризации подземных металлических сооружений, расположенных в глинистых грунтах, происходит значительное увеличение рН грунтового электролита и уменьшение удельного электрического сопротивления грунтов, что в значительной степени повышает их коррозионную агрессивность (Яблучанский, 2014, Lars Nielsen, 2006). Кроме того, катодная поляризация способствует изменению физико-механических свойств дисперсных грунтов, слагающих пространство около катодно-защищаемых сооружений.

Целью работы является оценка влияния катодной поляризации на изменение свойств глинистых грунтов, слагающих пространство вблизи подземных катодно-защищаемых инженерных сооружений.

Для выполнения работы были обозначены следующие задачи:

- 1) изучение литературы по тематике электрохимической коррозии и электрокинетических явлений в грунтах
- 2) проведение физического моделирования работы установки катодной защиты на монолите глинистого грунта
- 3) проведение электрометрического мониторинга на исследуемом грунте во время работы установки физического моделирования
- 4) лабораторное изучение физико-механических свойств исследуемого грунта до и после проведения физического моделирования

5) анализ изменений физико-механических свойств исследуемого грунта и  
постановка выводов

Автор выражает благодарность Бурлуцкому Станиславу Борисовичу, Лаздовской Марине Артуровне, Татарскому Антону Юрьевичу, Брянцевой Марианне Георгиевне и Ильину Юрию Тимофеевичу за огромную помощь в проведении всех требуемых лабораторных исследований и написании настоящей работы.

## **Глава 1. Основные сведения о подземной коррозии и защите от коррозии**

*Коррозией металлов* называют самопроизвольное разрушение металлических материалов вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с окружающей средой. Коррозионный процесс протекает на границе двух фаз металл – окружающая среда. Коррозия металлов имеет место практически всюду, где обрабатываются металлы или эксплуатируются металлические изделия или конструкции.

По механизму протекания коррозионных процессов различают два основных типа коррозии: химическую и электрохимическую.

*Химическая коррозия* является результатом непосредственной реакции металлов с неэлектролитами, при которой окисление металла и восстановление окислительной компоненты коррозионной среды происходит в одном акте. В свою очередь химическую коррозию по условиям протекания разделяют на газовую (окисление металла в сухих газах при высокой температуре) и коррозию в жидких агрессивных средах, не обладающих электропроводностью (нефть, нефтепродукты и другие органические соединения).

*Электрохимическая коррозия* — это разрушение металла в результате электрохимического взаимодействия с электролитами, при котором ионизация металла и восстановление окислительной компоненты коррозионной среды протекает отдельно. Этот процесс сопровождается протеканием электрического тока. По условиям протекания электрохимической коррозии различают ее основные виды: подземная (в грунтах); блуждающими токами; биологическая (под воздействием микроорганизмов); контактная (при контактах металлов, имеющих различные стационарные потенциалы в данной коррозионной среде); атмосферная (в воздухе или во влажных газах); внутренняя (трубопроводов и емкостей).

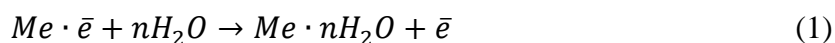
### **Механизм электрохимической коррозии**

Электрохимическая теория коррозии основана на положении, что при всех условиях работы металлических сооружений, соприкасающихся с электролитом, на поверхности металла вследствие ряда причин возникает большое количество мелких коррозионных гальванических элементов, аналогичных обычным гальваническим элементам (Притула, 2003). Возникновение таких коррозионных элементов обусловлено прежде всего тем, что отдельные участки поверхности металла имеют самые различные величины потенциалов. Это различие потенциалов на поверхности металла обуславливается как внутренними, так и внешними факторами. К числу внутренних факторов относятся: природа металла, его кристаллическое строение, наличие внутренних напряжений, температура, различный

характер обработки поверхности металла, наличие загрязнений в металле (сегрегации, шлак и т. д.). К числу внешних факторов, влияющих на возникновение различных потенциалов на поверхности металла, относятся: природа и концентрация электролита, его температура, скорость движения, доступ кислорода к поверхности металла и т. д. (Притула, 2003). Наличие разных потенциалов на поверхности металла приводит к ее дифференциации на анодные (с более отрицательным электродным потенциалом) и катодные (с более положительным электродным потенциалом) участки (Жук, 1976).

Таким образом, в результате движения тока при электрохимической коррозии протекают два процесса: анодный и катодный.

На анодных поверхностях происходит окисление металла с переносом его ионов в раствор электролита:



На катоде протекает другой процесс, сводящийся к ассимиляции избыточных электронов каким либо деполяризатором раствора ( $D$ ), то есть атомом или ионом, способным восстанавливаться (поглощать электрон):



Катодный процесс протекает одновременно и параллельно с анодным процессом, что и обеспечивает возможность непрерывного протекания процесса коррозии (Притула, 2003).

Наиболее важными процессами катодной деполяризирующей реакции являются: катодная реакция восстановления иона водорода в газообразный водород, носящая название водородной деполяризации и имеющая следующую схему:



и затем



и катодная реакция восстановления кислорода с превращением его в ион гидроксила, носящая название кислородной деполяризации:



Схематически, оба эти процесса изображены на рисунке 1. Как можно видеть, кроме анодного и катодного процессов важным явлением при коррозии является протекание тока между анодом и катодом. Это протекание осуществляется в металлическом соединении анода с катодом движением электронов, происходящим от катода к аноду, а в растворе электролита — движением катиона от анода к катоду и движением аниона от катода к аноду (Жук, 1976).

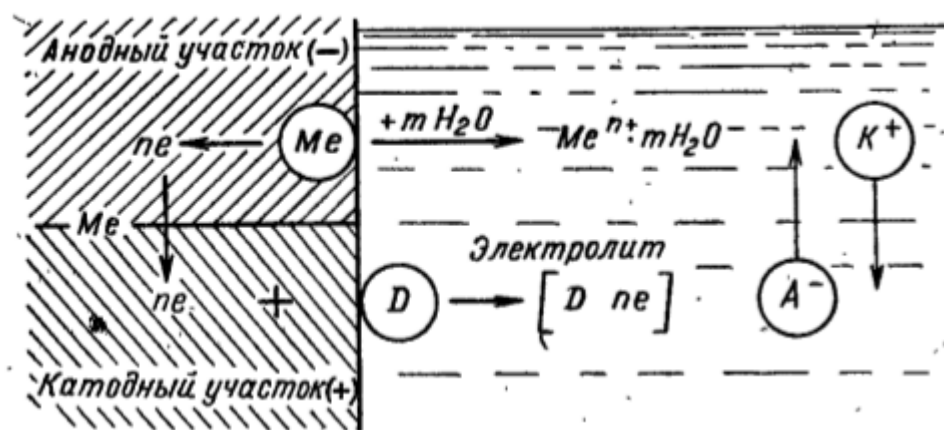


Рис. 1. Схема электрохимического коррозионного процесса (Жук, 1976).

Важной особенностью коррозионного процесса является то, что разрушения при электрохимической коррозии происходят только на анодах, в то время как на катодах происходит процесс деполяризации и разрушение металла не имеет места.

Таким образом, основные условия возникновения коррозии, характеризуются необходимостью наличия следующих факторов:

- 1) Наличие двух разнородных металлов или участков одного и того же металла с различными значениями потенциала
- 2) Контакт обоих металлов или обоих участков металла с общим электролитом.
- 3) Металлическое соединение этих отдельных участков металла между собой, например телом самого объекта или сооружения.
- 4) Наличие диссоциированных ионов в электролите.

### Подземная коррозия

Многие металлические конструкции, такие, как нефтепроводы, газопроводы, водопроводы, канализационные сети, обсадные трубы скважин, силовые электрические кабели, кабели связи, баки и емкости, тубинги метро, сваи и другие строительные конструкции, эксплуатируются в подземных условиях и, соприкасаясь с грунтом, подвергаются коррозионному разрушению. Поэтому одним из самых распространенных видов коррозии является подземная коррозия. Почва и грунт содержат различные химические реагенты и влагу и обладают ионной электропроводностью. Это делает их коррозионноактивными электролитами по отношению к эксплуатируемым в них металлическим конструкциям, что приводит к электрохимической коррозии: конструкций.

Скорость подземной коррозии зависит от нескольких факторов: типа и влажности грунта; воздухопроницаемости; состава и концентрации веществ, растворенных в грунтовых водах; pH; удельного электрического сопротивления.

*Тип грунта.* Грунты представляют собой капиллярно-пористые или коллоидные структуры и в зависимости от условий образования делятся на глинистые (глины, суглинки, супеси, лесс); обломочные (галечники, щебни, гравелистые грунты, песок); торфянистые и насыпные. Из естественных грунтов наибольшей коррозионной активностью обладают глинистые и торфянистые грунты. Особенно опасными с точки зрения коррозии являются насыпные грунты, характерными особенностями которых является неоднородность состава, наличие включений различных веществ (шлаков, золы, строительного мусора), повышенное содержание органических веществ. В связи с этим насыпные грунты обладают высокой коррозионной активностью (Подгорный, 1988).

*Влажность грунтов* существенно влияет на коррозионные процессы. Содержание влаги в почве оказывает большое влияние на интенсивность развития коррозионного процесса. В сухих почвах, коррозия металла незначительна. Но и чрезмерная влажность замедляет коррозию вследствие уменьшения притока кислорода к поверхности трубы. Влажность оказывает влияние на величину удельного электрического сопротивления почвы. С увеличением влажности может уменьшаться концентрация солей в почвенной влаге или же водорастворимые соли, находящиеся в твердом состоянии, перейдут в раствор. Диффузия ионов  $Fe^{2+}$  от анодных участков во влажной почве будет происходить интенсивно, что также активизирует коррозию. Для каждой почвы, в зависимости от ее влагоемкости и засоленности, должен существовать максимум скорости коррозии, отвечающий определенному содержанию влаги. Для большинства почв суглинистого и глинистого типа для обеспечения возможности максимальной коррозии бывает достаточно 10—12% влажности (к весу сухой почвы) (Притула, 2003). Дальнейшее увеличение влажности до некоторого предела сохраняет обычно условия возможности максимальной коррозии. Таким пределом можно считать влажность порядка 20—25%. При этом значении влажность дает большое, но еще не максимальное насыщение почвы водой (Притула, 2003). При этом сохраняется возможность атмосферному кислороду находить себе доступ к поверхности металла, что необходимо для поддержания деполяризации, обеспечивающей постоянную скорость коррозии. После указанного предела влажности наступает такое насыщение почвы водой, при котором она образует сплошной слой в почве, прекращающий достаточное поступление атмосферного кислорода к металлу. В результате этого скорость коррозии резко замедляется из-за



устранения деполяризации. Таким образом, можно видеть пять зон, связанных с количеством влажности почвы (табл. 1) (Притула, 2003):

Таблица 1

Влияние влажности на коррозионные свойства грунтов (Притула, 2003).

Зона	Влажность	Влагосодержание, %	Коррозия
1-я зона	Отсутствие влажности	0%	Отсутствие коррозии
2-я зона	Возрастание влажности до критического значения	10 — 12%	Увеличение коррозии до максимальной
3-я зона	Сохранение критического значения влажности	12 — 25%	Возможность максимальной коррозии
4-я зона	Возникновение сплошного водного слоя в почве	25 — 40%	Снижение скорости коррозии
5-я зона	Увеличение толщины сплошного слоя	Выше 25 — 40%	Невысокая постоянная скорость коррозии

*Воздухопроницаемость* грунтов является важной характеристикой почвенно-грунтовой коррозионной среды. Она зависит не только от влажности, но и от особенностей состава, плотности грунтов и т. д. Повышение воздухопроницаемости обычно ускоряет коррозионный процесс, так как облегчается протекание катодного процесса. В результате неравномерного проникновения воздуха к различным участкам подземного металлического сооружения (поступление кислорода к поверхности металлов происходит с атмосферным воздухом) возникают гальванические пары. Катодами таких гальванических пар всегда будут хорошо аэрируемые участки, анодами — мало аэрируемые (Жук, 1976). Не отрицая влияния воздухопроницаемости почв на коррозию, следует отметить, что прямой зависимости между воздухопроницаемостью почв и скоростью коррозии нет. Коррозия может увеличиваться с ростом воздухопроницаемости до определенного предела, а затем с дальнейшим повышением воздухопроницаемости, скорость ее может снизиться (Притула, 2003). Таким образом, при поступлении кислорода «в избытке» против требующегося для катодного процесса наступает торможение коррозии (Притула, 2003).

*Состав и концентрация веществ, растворенных в грунтовых водах*, определяет агрессивность почвенной коррозионной среды. Химический анализ определяет степень

засоленности почвы, что является одним из факторов, определяющих удельное сопротивление почвы и коррозионную активность грунта. Однако не исключена возможность коррозии и в малозасоленных почвах. Состав и количество гигроскопичных солей оказывают влияние на влажность почвы и склонность ее к высыханию и растрескиванию, что облегчает приток воздуха к отдельным участкам поверхности трубы и обуславливает возникновение коррозионных гальванических пар (Притула, 2003). Поэтому нельзя рассматривать солевой состав почвы вне ее структуры, пористости и воздухопроницаемости. Достаточная диффузия кислорода к поверхности трубы может, как было сказано выше, совершенно изменить течение коррозионного процесса, зависящего от количества и свойств солей. При большом содержании хлоридов в почвенном электролите образование на поверхности металла защитных пленок гидрата окиси железа затрудняется или они не образуются вообще. Суммарное содержание  $\text{Cl}$  и  $\text{SO}_4$  более 300 мг/л указывает на высокую коррозионную активность среды (Притула, 2003). Содержание  $\text{Cl}$  больше 0,1% или серы более 0,3% обуславливает высокую коррозионную активность по отношению к стали. Для свинца опасно присутствие в грунтах органических и азотистых веществ, а для алюминия — растворов хлоридов (Подгорный, 1988).

*Концентрация водородных ионов* в значительной мере характеризует степень коррозионной активности грунтов. Величина рН в грунте изменяется в зависимости от общей минерализации грунтовых вод и присутствия в них угольной и других минеральных кислот, кислых и основных солей. По показателю рН различают: сильнокислые почвы (3 - 4,5), кислые (4,5 - 5,5), слабокислые (5,5 - 6,5), нейтральные (6,5 - 7,0), слабощелочные (7,0 - 7,5), щелочные (7,5 - 8,5) и сильнощелочные (8,5 и выше). В более кислых средах коррозионная агрессивность повышается.

М. Пурбе предложил представлять термодинамические данные, касающиеся электрохимического и коррозионного поведения металлов в водных средах, в форме компактных сводных диаграмм зависимости потенциала от водородного показателя рН. Такие диаграммы составлены для большинства распространенных металлов. Они наглядно показывают условия (области потенциалов и рН), при которых металл термодинамически устойчив, либо может реагировать, образуя ионы, оксиды или комплексные соединения.

На примере диаграммы Пурбе для системы железо-вода (рис. 2) можно видеть, как концентрация водородных ионов влияет на термодинамическую устойчивость металла.

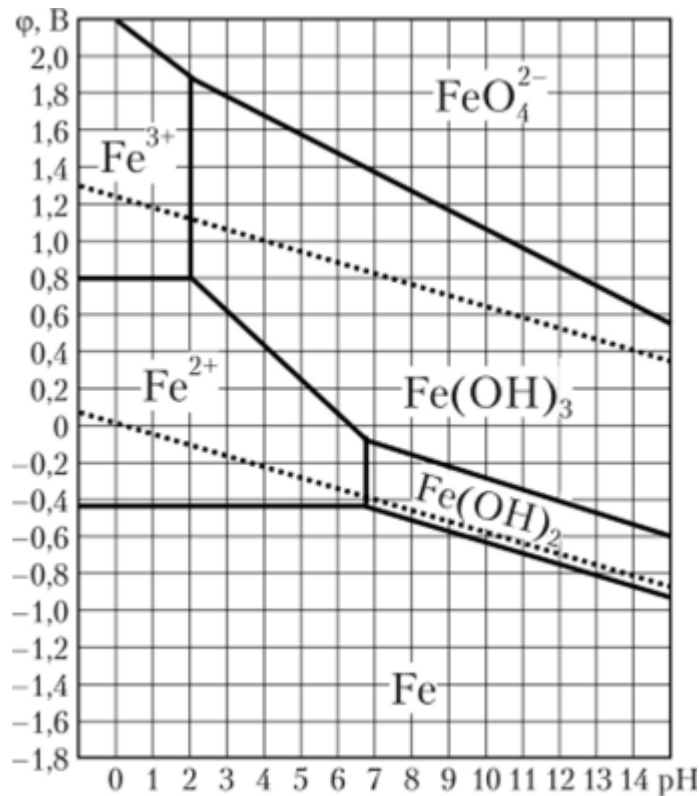


Рис. 2. Диаграмма Пурбе зависимости потенциала  $\phi$  (В) от водородного показателя рН для системы железо-вода.

Между удельным электрическим сопротивлением грунтов и опасностью коррозии в определенных границах существует прямая зависимость; чем меньше удельное сопротивление, тем агрессивней грунт. Удельное электрическое сопротивление зависит от типа и влажности грунта, состава и концентрации солей, воздухопроницаемости и др. Сухие и маловлажные грунты обладают большим удельным сопротивлением. Влажные грунты, содержащие растворы солей, обладают малым удельным сопротивлением. Удельное электрическое сопротивление грунта значительно уменьшается по мере увеличения влажности до 30 - 40%, при дальнейшем увлажнении снижение сопротивления резко замедляется (Притула, 2003). Сопротивление грунта при замерзании почвенной влаги резко возрастает. Концентрация водорастворимых солей в почве понижает удельное электрическое сопротивление грунтов более резко, чем увлажнение (Жук, 1976). Удельное электрическое сопротивление также зависит от погодных условий.

### Способы защиты от коррозии

Согласно ГОСТ 9.602-2016 и ГОСТ Р 51164-98 все подземные металлические сооружения подлежат защите от коррозии. Защита подземных металлических сооружений делится на пассивную и активную. К пассивной защите относятся: изоляция поверхности

металла от агрессивной среды путем нанесения различных защитных покрытий и легирование металла для повышения его коррозионной стойкости. Активной защитой является поляризация конструкций и сооружений (электрохимическая защита) (Подгорный, 1988).

Способы защиты сооружений и конструкций выбираются исходя из коррозионной активности среды по отношению к металлу, особенностей конструкций и условий эксплуатации.

Различают защитные покрытия нескольких типов: органические, неорганические и металлические. К органическим покрытиям относятся лакокрасочные, битумные, полимерные, каменноугольные, эпоксидные и др.; к неорганическим — цементные, асбестоцементные, силикатные, фосфатные и др.; к металлическим — защитные пленки, выполненные из металлов, обладающих меньшей скоростью коррозии, чем основной металл (хромирование, никелирование, оцинкование) (Подгорный, 1988).

Легирование металла с целью повышения его коррозионной стойкости заключается в добавках к сплавам компонентов, повышающих их пассивность, способствующих образованию на поверхности пассивных пленок или образующих слой продуктов коррозии с высокими защитными свойствами (например, легирование конструкционных сталей хромом, никелем, медью, кремнием, а также: удаление вредных примесей из сплавов, ускоряющих коррозию) (Подгорный, 1988).

Защитный эффект при электрохимической защите достигается путем поляризации металлических сооружений и конструкций, в результате которой прекращается или значительно снижается коррозия. Электрохимическая защита применяется в различного рода электролитах (Подгорный, 1988).

Поляризация осуществляется от внешнего источника постоянного тока или путем соединения с металлом, имеющим более отрицательный или более положительный потенциал, чем у защищаемого металла. В зависимости от направления протекания тока в коррозионной среде по отношению к защищаемому объекту различают катодную и анодную поляризацию (Улиг, Ревя, 1989).

Анодная защита основана на пассивации металла при анодной поляризации. Этот способ электрохимической защиты нашел применение лишь в особых случаях, например для защиты оборудования, контактирующего с сильноагрессивными жидкостями в химической промышленности (Улиг, Ревя, 1989).

Катодная защита основана на снижении скорости коррозии металла при катодной поляризации, вследствие смещения его потенциала в отрицательную сторону по отношению к потенциалу коррозии (Бэкман, Швенк, 1984). Защита при помощи катодной

поляризации является широко распространенным и эффективным способом защиты металлов от коррозии.

На практике возникают ситуации, когда достичь необходимой степени защиты при помощи какого-либо одного из перечисленных способов не представляется возможным. В таких случаях применяется несколько различных способов одновременно. Например, существующие в настоящее время защитные изоляционные покрытия по своим физико-химическим свойствам и технологии нанесения не исключают возможности взаимодействия металла с окружающей средой, Со временем защитные покрытия стареют — теряют свои первоначальные физические свойства, защитное действие их значительно уменьшается. Поэтому для долговременной и надежной защиты от коррозии подземных и подводных сооружений в условиях высокой агрессивности среды применяется одновременно защитное покрытие и электрохимическая защита (Подгорный, 1988).

### **Катодная защита**

Катодная поляризация металлических сооружений наиболее важный и распространенный вид электрохимической защиты. Она дает возможность постоянного контроля защиты (наличие защитного потенциала), обеспечивает непрерывность действия и возможность регулировки в отличие от защитных покрытий, которые после повреждения не могут быть легко исправлены, и повышение их эффективности в процессе эксплуатации невозможно (Подгорный, 1988). Экономичность и эффективность катодной поляризации прямо зависит от качества защитных покрытий.

Катодная поляризация металлических сооружений с помощью внешних источников постоянного тока получила название катодной защиты, которая осуществляется установками катодной защиты (УКЗ) (рис. 3).

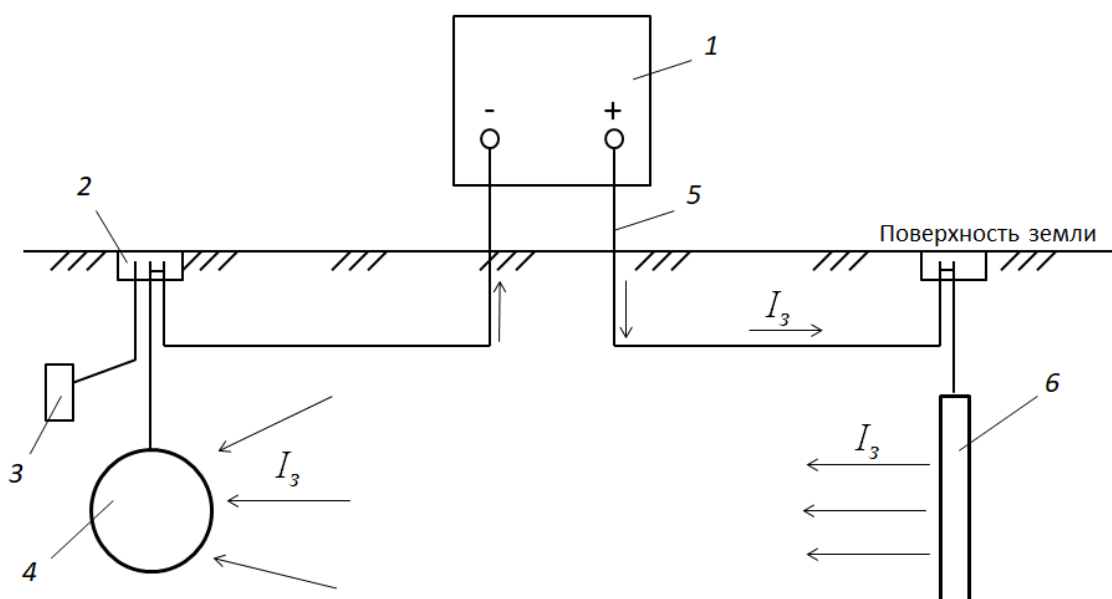


Рис. 3. Схема установки катодной защиты (Подгорный, 1988). 1 – источник постоянного тока; 2 – контактное устройство; 3 – электрод сравнения; 4 – защищаемое сооружение; 5 – соединительные линии; 6 – анодное заземление;  $I_3$  – защитный ток.

УКЗ состоит из источника постоянного тока, анодного заземления, контактного устройства на защищаемом сооружении, электрода сравнения длительного действия с датчиком электрохимического потенциала, соединительных линий постоянного тока, защитного заземления (Подгорный, 1988).

Отрицательный полюс источника постоянного тока УКЗ присоединяется к защищаемому объекту, положительный — к анодному заземлению. К катодной установке могут быть подключены несколько сооружений, при необходимости она может иметь несколько анодных заземлений.

При включении источника ток стекает с анодного заземления. Распространяется по окружающей среде, натекает на сооружение и поляризует его металл. Защитный ток должен быть такой, чтобы создаваемый отрицательный потенциал находился в пределах установленных минимальных и максимальных защитных величин (табл. 2) (ГОСТ 9.602-2016).

Защитные потенциалы металла сооружения относительно насыщенного медно-сульфатного электрода сравнения (ГОСТ 9.602-2016)

Сооружения и условия их эксплуатации	Минимальный защитный потенциал <sup>1)</sup> насыщенного сульфатного сравнения <sup>2)</sup> , В		Максимальный защитный потенциал <sup>1)</sup> насыщенного сульфатного сравнения <sup>2)</sup> , В	
	Поляризационный потенциал (без омической составляющей)	Суммарный (с омической составляющей)	Поляризационный потенциал (без омической составляющей)	Суммарный (с омической составляющей)
Действующие стальные сооружения до их реконструкции <sup>3)</sup> :				
С температурой поверхности (транспортируемого продукта) не выше 40°C	-0,85	-0,9	-1,15	-2,5
С температурой поверхности (транспортируемого продукта) выше 40°C; сооружения при опасности биокоррозии	-0,95	-1,05	-1,15	-3,5
Вновь построенные и реконструированные сооружения:				
С температурой поверхности (транспортируемого продукта) не выше 40°C	-0,85	-0,95	-1,2	-3,5
С температурой поверхности (транспортируемого продукта) выше 40°C, не имеющие теплоизоляции	-0,95	-1,05	-1,1	-3,5

В качестве источников постоянного тока серийно выпускаются автоматические и неавтоматические преобразователя — выпрямители катодной защиты.

Катодную поляризацию металлических сооружений практически можно осуществлять с применением любого источника.

*Анодные заземления* установок катодной защиты служат для создания постоянного контакта положительного полюса источника тока с землей или с другой токопроводящей средой, окружающей сооружение. Анодное заземление является одним из основных

элементов катодной установки, от его параметров зависит эффективность и надежность защиты от коррозии. Электроды для анодных заземлений изготавливаются из стали, чугуна, железокремнистых сплавов (ферросилидов), графита. В зависимости от скорости анодного растворения материала различают электроды: растворимые (углеродистая сталь, серый чугун), малорастворимые (высококремнистый чугун, графит) и нерастворимые (платина, сплавы платины, платинированный титан, сплавы свинца с серебром) (Подгорный, 1988).

### **Выводы к главе 1**

1) Процесс подземной коррозии протекает по электрохимическому механизму, который предполагает возникновение коррозионных гальванических элементов из-за дифференциации поверхности металла на анодные и катодные участки. На анодных участках происходит процесс окисления металла с переносом его ионов в раствор электролита (коррозия), а на катодных – процесс восстановления избыточных электронов.

2) Скорость подземной коррозии зависит от нескольких факторов: типа и влажности грунта; воздухопроницаемости; состава и концентрации веществ, растворенных в грунтовых водах; pH; удельного электрического сопротивления грунтов.

3) Для подавления процесса электрохимической коррозии используют установки катодной защиты. Эти установки генерируют постоянный электрический ток, который протекает от анодных заземлений к защищаемому сооружению, создавая на нем отрицательный потенциал, тем самым предотвращая коррозию.

4) Действие катодной защиты обеспечивает протекание электрического тока в грунте большой плотности, что может повлиять на его состояние и свойства.



## Глава 2. Электроповерхностные явления в глинистых грунтах

Для оценки изменения свойств глинистых грунтов под действием электрического тока, прежде всего, необходимо понимание того, что такое глинистый грунт и какие процессы могут в нем протекать при наложении внешнего электрического поля.

К. глинистым грунтам относятся тонкодисперсные образования, содержащие не менее 3% глинистых частиц и проявляющие набухаемость и пластичность при увлажнении. По своему составу они подразделяются на глины, суглинки и супеси (Грунтоведение, 2005).

Глинистые породы образуют один из наиболее широко распространенных видов грунтов. Они встречаются среди пород различного возраста начиная с докембрийских отложений и кончая современными образованиями и составляют более 65% всей массы осадочных пород (Грунтоведение, 2005). Залегают глинистые грунты в виде мощных толщ, слоев, прослоев, линз, конусов выноса и т.п. Мощность их может изменяться от нескольких сантиметров до сотен метров.

Гранулометрический состав глинистых грунтов многообразен. В целом их твердая компонента представляет собой полидисперсную систему. У супеси это глинисто-пылевато-песчаная система с содержанием глинистых частиц 3—10%, а у глин — песчано-глинисто-пылеватая или песчано-пылевато-глинистая, с содержанием тех же частиц 30—60% и даже более (Грунтоведение, 2005).

Минеральный состав глинистых грунтов также разнообразен. Все они состоят из обломочных (песчаных и пылеватых) агрегатов и зерен, главным образом кварцевых, и тонкодисперсных частиц глинистых минералов. В составе глинистых грунтов некоторых генетических типов (ледниковых, элювиальных, делювиальных, пролювиальных и др.), содержатся включения крупнообломочного материала, различного по петрографическому составу (Грунтоведение, 2005). В глинистых образованиях аридных зон, а также отложениях открытых морей и засоленных лагун встречаются включения карбонатов и различных солей (гипса, ангидрита, каменной соли). Озерные глины, старичные аллювиальные и морские глины часто обогащены органическим веществом. В зависимости от количества и состава этих примесей среди глинистых пород выделяют карбонатные, загипсованные и другие разновидности глинистых образований, а также глинистые грунты с примесью растительных остатков, количество которых должно составлять 5—10% (Грунтоведение, 2005).

Наибольшее значение при формировании типичных свойств глинистых грунтов имеют минералы группы слоистых силикатов – глинистые минералы (гидрослюда, монтмориллонит, каолинит, хлорит), именно слоистый тип структуры и высокая

дисперсность глинистых минералов определяет специфику свойств присущих глинистым грунтам (высокая гидрофильность, липкость, способность к набуханию, ионному обмену и т.д.) (Грунтоведение, 2005).

Дисперсное состояние этих минералов обуславливает преобладание в глинистых грунтах разнообразных поверхностных явлений, в том числе электроповерхностных, поскольку, чем меньше размер частиц, тем выше их удельная поверхностная энергия (Грунтоведение, 2005).

### 2.1. Теория двойного электрического слоя

Открытые Фридрихом Рейссом в 1807 г. электрокинетические явления были теоретически объяснены лишь в последней четверти XIX в. в связи с развитием представлений об электрическом строении межфазной границы раздела «твердое тело-жидкость», ответственном за эти явления. Г. Квинке одним из первых в своих работах ввел представление о строении этой границы.

В результате контакта двух фаз электрические заряды перераспределяются между фазами таким образом, что фазы заряжаются с противоположными знаками и с зарядами равной величины. При этом образуется система зарядов, получившая название **двойного электрического слоя (ДЭС)**, а между фазами возникает разность электрических потенциалов ( $\varphi$ ).

В дальнейшем, ключевую роль в разработке теории двойного электрического слоя сыграли такие известные ученые как Г. Гельмгольц, Ж. Б. Перрен, А. Кен, Г. Фрейндлих, Л. Ж. Гуи, Д. Чепмэн, которые представляли структуру двойного электрического слоя на границе раздела фаз в виде плоскопараллельного молекулярного конденсатора, внутренняя обкладка которого обусловлена зарядами твердого тела, а внешняя – зарядами, находящимися в газе или жидкости. В системе «коллоидные частицы – раствор электролита» носителями электрического заряда являются ионы. Ионы внешней обкладки называются противоионами, а ионы, образующие внутреннюю обкладку и вызывающие возникновение межфазного потенциала, - потенциалопределяющими (Королев, 2015).

Но в настоящее время общепринятой классической теорией является теория двойного электрического слоя О. Штерна, как наиболее полно отвечающая экспериментальным данным. Разрабатывая схему строения ДЭС, О. Штерн объединил схемы Гельмгольца-Перрена и Гуи-Чепмэна, но в отличие от последних, где учитывалось лишь кулоновское взаимодействие противоионов с ионами внутренней обкладки, О. Штерн попытался также учесть роль специфической адсорбции противоионов под действием некулоновских (вандерваальсовых) сил и учесть размер ионов (Королев, 2015).

Основным положением в модели строения ДЭС О. Штерна является разделение "внешней" обкладки слоя противоионов на внутреннюю и внешнюю части (рис. 4).

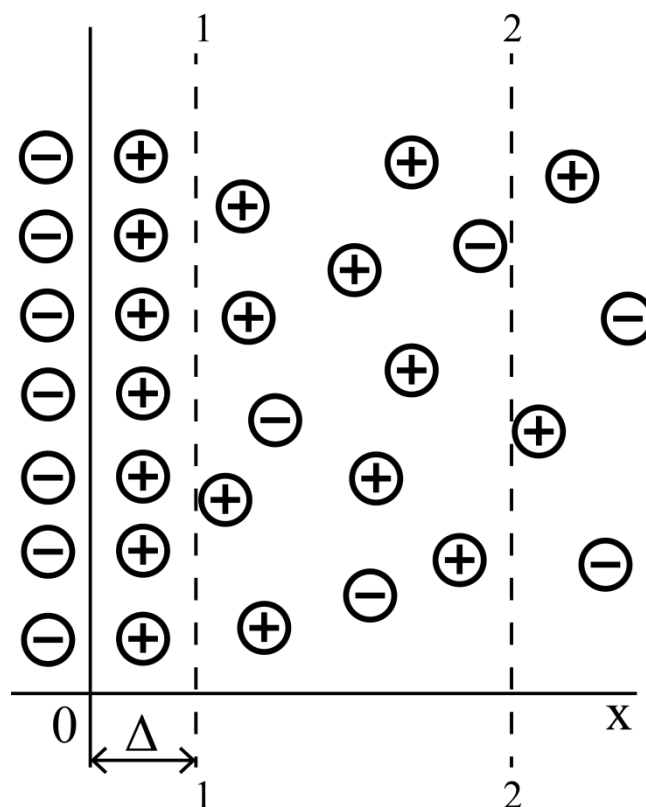


Рис. 4. Схема строения ДЭС по О. Штерну. 1-1 – граница адсорбционного слоя; 2-2 – граница диффузного слоя и равновесного раствора (внешняя граница ДЭС).

Внутреннюю часть образуют первый или несколько первых слоев противоионов, притягивающихся наиболее прочно к твердой поверхности под влиянием как электростатических, так и адсорбционных сил. Эта часть ДЭС называется "адсорбционным" слоем или «плотным слоем» (Королев, 2015).

Строение адсорбционного слоя описывалось О. Штерном на основе теории молекулярной адсорбции Ленгмюра и учитывалось, что ионы не могут приблизиться к поверхности на расстояние меньше  $\Delta$  плоскости наибольшего приближения ионов, обусловливаемого размерами ионов и их гидратационной способностью (Королев, 2015). При этом толщина адсорбционного слоя определяется как расстояние от поверхности до центра тяжести зарядов внутренней обкладки ДЭС (т.е. до плоскости, проходящей через центры ближайших к поверхности противоионов). Остальные противоионы, необходимые для компенсации зарядов потенциалопределяющих ионов, образуют диффузную часть ДЭС, называемую диффузным слоем или слоем Гуи (Королев, 2015).

Однако адсорбционный механизм образования ДЭС является не единственным. Второй механизм образования ДЭС связан с диссоциацией поверхностных ионогенных групп под влиянием полярной дисперсионной среды (Королев, 2015).

Кроме того, было выявлено, что образование ДЭС может быть связано не только с переходом ионов через границу раздела фаз в процессах специфической адсорбции и поверхностной диссоциации. При исследовании взаимодействия глинистых минералов с водными растворами электролитов было установлено, что ДЭС может возникать и без ионных переходов, а в результате изоморфных замещений компонентов твердой фазы кристаллической решетки (например атома Si на атом Al и т. п.), при которых поглощается электрон извне и твердая фаза минерала приобретает отрицательный заряд (Королев, 2015).

К настоящему времени накоплен большой экспериментальный материал о структуре ДЭС в различных системах, что позволяет выделить типы различных ДЭС. Так, в зависимости от количества участвующих в данной системе фаз, двойные электрические слои можно подразделить на простые (в двухфазной водонасыщенной системе) и сложные (в системах из трех и более фаз) (Королев, 2015).

В зависимости от толщины поверхностных пленок или слоев воды следует различать «неразвитый» или «тонкий» ДЭС (когда в силу малой толщины пленки, например в концентрированном растворе, отсутствует какая-либо периферийная часть двойного слоя, например диффузная) и «развитый» или «толстый» ДЭС, отвечающий полностью сформированным составляющим его слоям, протяженным вглубь объема жидкости (Королев, 2015). Кроме того, следует различать также свободные и перекрывающиеся ДЭС, в зависимости от того, сближены или нет противолежащие границы раздела фаз на такие расстояния, что их ДЭС начинают взаимодействовать между собой, вызывая либо отталкивание (в случае одноименно заряженных ДЭС), либо взаимное притяжение.

Учитывая геометрию поверхностей раздела фаз, а следовательно, и объемную конфигурацию ДЭС, последние подразделяются на плоские ДЭС, возникающие вблизи плоских границ раздела фаз, сферические (вокруг сферических и близких к ним границ раздела), цилиндрические ДЭС, а также ДЭС более сложной формы, в частности - ДЭС на шероховатой или пористой поверхности (Королев, 2015).

И, наконец, в зависимости от параметров внешнего электрического поля можно различать равновесный ДЭС, возникающий в нулевом или постоянном электрическом поле, и неравновесный или поляризованный ДЭС, возникающий при наличии переменного электрического поля. Как частный случай последнего типа ДЭС следует

различать также стационарный ДЭС, квазиравновесность которого поддерживается стационарностью переменного электрического поля во времени (Королев, 2015).

### Двойной электрический слой в глинистых грунтах.

Механизм возникновения и свойства ДЭС в глинистых грунтах при взаимодействии их с водными растворами к настоящему времени достаточно хорошо изучен. При соприкосновении твердых минеральных частиц с водой и водными растворами качество их поверхности существенно изменяется - происходят процессы взаимодействия полярного растворителя (НО) с адсорбционными центрами твердой поверхности, появляются дополнительные поверхностные активные центры (Королев, 2015). Например, за счет поверхностной диссоциации различных ионогенных групп глинистых минералов происходит адсорбция некоторых ионов из раствора и другие процессы, обусловленные как спецификой кристаллохимического строения дисперсных минералов, так и свойствами окружающего раствора, его концентрацией, зарядом ионов, величиной рН и т.д.

Гидратация поверхности дисперсных минералов в грунтах происходит в два этапа. На *первом этапе* гидратации поверхности дисперсных минералов преобладают процессы взаимодействия молекул воды с наиболее активными центрами адсорбции — координационно-ненасыщенными атомами и ионами решетки, а также ионами-компенсаторами ее заряда – обменными катионами, среди которых в грунтах наиболее распространены  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$ . Закономерности гидратации ионов связаны в основном с их валентностью и размерами (Королев, 2015). В общем случае, чем выше отношение этих параметров (то есть «плотность поверхностного заряда иона»), тем больше гидратируемость ионов ( $\text{Fe}^{3+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Li}^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ ). При этом следует учитывать и степень их взаимодействия с поверхностью. Процесс гидратации ионов ослабляет это взаимодействие и способствует их отхождению от поверхности в объем раствора, то есть «диссоциации» (Королев, 2015). Способность ионов к поверхностной диссоциации оценивается степенью взаимодействия их с поверхностью, на что, в свою очередь, оказывает влияние плотность поверхностного заряда иона (чем она выше, тем взаимодействие сильнее) и местоположение иона относительно поверхности после гидратации. В связи с этим ряд гидратируемости ионов отличается от вышеприведенного ряда их поверхностной «диссоциируемости»: ( $\text{Li}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Fe}^{3+}$ ); при этом ион  $\text{K}^+$  часто вообще исключается из этого ряда, так как из-за низкой степени гидратируемости (за счет большого радиуса при единичном заряде) он может

компенсировать поверхностные заряды на коротких расстояниях, утрачивая при этом способность к диссоциации (Злочевская, Королев, 1988).

На процесс диссоциации некоторых поверхностных вторичных ОН-групп существенное влияние оказывает присутствие в растворе  $H^+$ - или  $OH^-$ -ионов, то есть pH раствора (Злочевская, Королев, 1988).

В связи с тем, что дисперсные минералы являются полярными адсорбентами, наиболее активно взаимодействующие с полярным растворителем – водой, то для них характерна «отрицательная» физическая адсорбция ионов из раствора (Королев, 2015). Однако в определенных условиях может происходить и «положительная» «специфическая» адсорбция ионов на таких поверхностях. Это хемосорбция, или сверхэквивалентная адсорбция многовалентных ионов, или избирательная адсорбция.

1. Химическая сорбция (хемосорбция) отдельных ионов возможна в том случае, когда они образуют нерастворимое химическое соединение с ионами минеральной поверхности грунта.

2. Сверхэквивалентная адсорбция многовалентных ионов ( $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $PO_4^{3-}$ ,  $SO_4^{2-}$  и др.) может происходить как на заряженных, так и на незаряженных участках минеральной поверхности, либо при возникновении межмолекулярных ван-дер-ваальсовых сил. При этом дисперсионные силы проявляются как результат поляризующего действия ионов на электронные оболочки атомов, в результате чего возбуждаются направленные колебания электронов и происходит их взаимодействие.

3. Избирательная адсорбция некоторых ионов может происходить в том случае, если они являются одноименными ионами кристаллической решетки минералов (или изоморфными). В этом случае при адсорбции их идет как бы достройка структуры кристаллической решетки минерала, причем часть заряда адсорбируемого иона (как и при двух вышеуказанных видах специфической адсорбции) остается свободной, сообщая остаточный заряд поверхности кристалла.

Следовательно, в системе "глинистый грунт - водный раствор электролита" на поверхности твердых минеральных частиц образуется множество качественно разнообразных адсорбционных центров, природа которых зависит как от кристаллохимии поверхности, так и от взаимодействующего раствора (Королев, 2015). Знак и величина электрического заряда частиц есть результат статистического распределения различных ионогенных групп на минеральной поверхности. Избыток ионов одного знака или "заряд" поверхности вызывает, в силу электростатического притяжения, соответствующую ориентировку ионов противоположного знака, образуя при этом двойной электрический слой (ДЭС).

При низкой концентрации взаимодействующего с породой раствора наличие вблизи поверхности избыточной по отношению к раствору концентрации приповерхностных ионов, образовавшихся за счет поверхностной диссоциации минералов, способствует процессу "осмотического" перетока в область дополнительного количества влаги (Королев, 2015). При этом процесс гидратации породы из стадии адсорбции воды на активных центрах переходит во *второй этап* гидратации - "осмотического" впитывания влаги из раствора и формирования диффузной части ДЭС. Остающиеся на поверхности твердой минеральной фазы ионы, сообщаящие ей определенный знак и величину заряда, являются потенциалопределяющими, а перешедшие в приповерхностную область порового раствора ионы противоположного знака - противоионами. К потенциалопределяющим относят часто и ионы специфически адсорбированные, поскольку они обычно притягивают противоионы, хотя (более строго) эти ионы составляют адсорбционный слой.

Можно полагать, что специфика образования ДЭС глинистых грунтах, связанная преимущественно с «диссоциацией» поверхностных ионогенных групп, содержащих строго локализованные вблизи них противоионы обуславливает преобладание противоионов ДЭС в пристенной области (до 90%), по сравнению с диффузной (Злочевская, 1969).

При повышенной концентрации взаимодействующего раствора процессы поверхностной диссоциации ионов подавлены, «осмотический» переток влаги отсутствует, ионы диффузного слоя оказываются в пристенной части ДЭС (Королев, 2015).

Противоионы ДЭС непрерывно обмениваются с ионами раствора того же знака, обуславливая при этом так называемые обменные реакции в грунтах.

Основные закономерности ионного обмена:

1. Реакции обмена в строго эквивалентных соотношениях, являются в основном обратимыми (если не сопровождаются хемосорбцией или, или адсорбцией многовалентных ионов), скорость реакции обмена несколько медленнее, чем физическая адсорбция, особенно в случае обмена в межслоевом пространстве набухающих минералов.

2. интенсивность обмена зависит от валентности ионов в растворе, их радиуса, концентрации в растворе, соотношения жидкой и твердой фаз: чем все эти параметры больше, тем выше скорость реакции обмена и энергия вхождения ионов в обменный комплекс грунта.

3. Ряд ионов по энергии их вытеснения из обменного состояния соответствует так называемому лиотропному ряду:

для катионов:  $Ba^{2+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+ > Li^+$ ;

для анионов:  $SiO_3^{2-} > SiO_4^{2-} > CO_3^{2-} > SO_4^{2-} > Cl^-$ .

4. С ростом pH раствора увеличивается процесс катионного обмена, с уменьшением pH – анионного обмена. Если обменивающимися ионами минерала являются  $H^+$  или  $OH^-$ , то pH взаимодействующего раствора может измениться (Королев, 2015).

Ионообменные процессы играют большую роль при формировании свойств ДЭС. Однако наряду с ними, следует учитывать состав, структуру и свойства самой жидкой фазы грунтов, оказывающей существенное воздействие на их электроповерхностные свойства, поскольку процессы формирования ДЭС и ионообменные реакции протекают, прежде всего, в жидкой среде.

## 2.2. Электрокинетические явления

Если двойной электрический слой у твердой поверхности находится под действием внешней разности потенциалов, приложенной параллельно этой поверхности, то разноимённость зарядов твердой и жидкой фаз приводит, в случае неподвижного капиллярно-пористого тела в электрическом поле, к перемещению противоионов диффузного слоя вместе с жидкой фазой к соответствующему полюсу. Именно по такому механизму действуют процессы **электроосмоса** и **электрофореза**.

Так, в случае электроосмоса воды через отрицательно заряженную пористую диафрагму катионы подвижной части ДЭС движутся со скоростью  $v_{эо}$ , в сторону отрицательного электрода — катода, увлекая за собой и молекулы воды вследствие вязкого трения. При электрофорезе отрицательно заряженная частица, напротив, стремится сместиться со скоростью  $v_{эф}$  к противоположному положительному полюсу - к аноду (рис. 5).

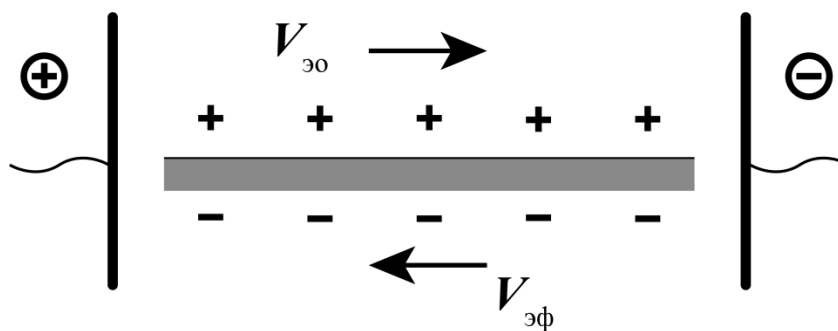


Рис. 5. Схема механизма электрокинетических явлений (Королев, 2015).



Поскольку по мере приближения к поверхности твердой фазы подвижность ионов ДЭС и молекул жидкости не одинаковы, то при определенной интенсивности внешнего электрического поля скольжение жидкой и твердой фазы относительно друг друга происходит не непосредственно на межфазной границе, а на некотором расстоянии от нее - по так называемой плоскости скольжения. Скорость скольжения жидкости будет нелинейно возрастать по мере удаления от поверхности, достигая своего максимума за границей ДЭС. При этом разность потенциалов между частью жидкости, не вовлеченной в движение, связанной с твердой фазой и между всем остальным раствором, характеризуется электрокинетическим или  $\zeta$ -потенциалом, который поддается непосредственному экспериментальному определению (Злочевская, Королев, 1988).

Однако место границы скольжения жидкости в рамках модели Штерна до сих пор остается неясным, и в общем случае ее представляют либо находящейся в диффузном слое, либо совпадающей с границей адсорбционного слоя (Королев, 2015). Согласно многочисленным исследованиям расстояние от межфазной границы до плоскости скольжения ( $a$ , следовательно, и величина  $\zeta$ -потенциала) зависит от влажности среды, температуры, природы фаз и других факторов. Вместе с тем, интенсивность электрокинетических явлений будет тем больше, чем больше зарядов диффузного слоя окажется в подвижной части жидкости, то есть чем толще ДЭС (Королев, 2015).

### Теория электроосмоса

Электроосмос – это перенос жидкости в капиллярно-пористых системах под действием внешнего постоянного электрического поля. Причина электроосмоса обуславливается наличием на границе раздела твердой и жидкой фаз в капиллярно-пористых системах двойного электрического слоя. Так, в случае электроосмоса воды через отрицательно заряженную диафрагму катионы подвижной части ДЭС движутся в сторону отрицательного электрода, увлекая за собой молекулы воды. Таким образом, при относительном перемещении фаз независимо от причин, его вызвавших, происходит смещение двойного электрического слоя по так называемой плоскости скольжения. Вместе с тем, интенсивность электрокинетических явлений будет тем больше, чем больше зарядов диффузного слоя окажется в подвижной части жидкости.

Современная теория электроосмоса в глинистых грунтах базируется на представлениях Г. Гельмгольца и М. Смолуховского и полученном ими классическом уравнением для линейной скорости движения жидкости при электроосмосе:

$$v_{30} = \frac{\varepsilon \zeta E}{4\pi\eta} \quad (6)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость порового раствора;  $\eta$  – ее вязкость;  $v_{\text{эо}}$  – линейная скорость движения порового раствора относительно скелета глины;  $E$  – напряженность внешнего электрического поля;  $\zeta$  – электрокинетический потенциал.

Важно отметить, что уравнение не содержит геометрических параметров системы; оно справедливо как для одиночных капилляров, так и для сложных капиллярно-пористых систем.

В природных глинистых грунтах в зависимости от степени их литификации, состава и концентрации порового раствора соотношение между толщиной ДЭС и радиусом пор может быть весьма различным. Более того, в силу полидисперсности глин и неоднородности порового пространства в них можно говорить лишь об эффективном или преобладающем радиусе пор глины. Поскольку действительная линейная скорость электроосмотического движения жидкости в глинах  $v_{\text{эо}}$  неизвестна, так же как и площадь поперечного сечения фильтрации пор ( $\omega$ ), то для обработки экспериментальных данных электроосмоса глин вместо линейной  $v_{\text{эо}}$  используют объемную  $Q_{\text{эо}}$  скорость электроосмотического движения жидкости, которые связаны между собой соотношением (Королев, 2015):

$$Q_{\text{эо}} = v_{\text{эо}} \cdot \omega \quad (7)$$

С учетом этого уравнение Гельмгольца – Смолуховского приобретает вид, удобный для экспериментального анализа электроосмоса в глинах:

$$\frac{Q_{\text{эо}}}{I} = \frac{\varepsilon \zeta}{4\pi\eta(\chi_v - \chi_s)} = P_{\text{эо}} \quad (8)$$

Где  $I$  – сила электрического тока;  $P_{\text{эо}}$  – электроосмотический перенос;  $\chi_v$  – удельная электропроводность равновесного порового раствора;  $\chi_s$  – поверхностная проводимость.

Преобразуя уравнение получаем:

$$\frac{Q_{\text{эо}}}{E} = \frac{Q_{\text{эо}} l}{U} = \frac{\varepsilon \zeta \omega}{4\pi\eta} = \omega K_{\text{эо}} \quad (9)$$

Где  $K_{\text{эо}}$  – коэффициент электроосмоса;  $l$  – расстояние между электродами.

Понятие коэффициента электроосмоса  $K_{\text{эо}}$  было впервые введено в научный оборот в 1940 г. Б. Ф. Рельтовым. Его величина для разных грунтов лежит в диапазоне  $10^{-5} - 10^{-4}$  см<sup>2</sup>/В·с (Королев, 2015). С учетом этого уравнение для скорости электроосмоса принимает простой вид:

$$Q_{\text{эо}} = \omega K_{\text{эо}} E \quad (10)$$

На практике величину  $K_{\text{эо}}$  определяют экспериментально по формуле:

$$K_{\text{эо}} = \frac{Q_{\text{эо}} l}{U \omega} \quad (11)$$

Эти уравнения позволяют по экспериментальным данным изучения электроосмоса в грунте рассчитать его  $\zeta$ -потенциал (Королев, 2015).

В результате исследований электроосмотического осушения грунта Б. А. Ржаницын предложил формулу для определения количества выделяющейся из грунта воды; он показал, что осушение грунта с заметным его уплотнением начинается прежде всего в анодной зоне и распространяется в направлении к катоду, уплотнение и упрочнение наблюдается также и в межэлектродной зоне (Королев, 2015).

При проведении лабораторных исследований Б. Ф. Рельтов обнаружил важную закономерность электроосмотического осушения грунтов. Независимо от Д. Маклина и Д. Рольфа он установил, что количество воды, выделяющейся из грунта при электроосмосе, прямо пропорционально количеству затраченного электричества. Д. Маклин и Д. Рольф утверждали, что эта пропорциональность сохраняется очень непродолжительное время; Б. Ф. Рельтов же проследил ее проявление в течение 90 – 100 ч (Королев, 2015).

Кроме того, Д. Маклин и Д. Рольф установили, что при одинаковой затрате электричества степень осушения разных типов грунтов различна: так, наибольшее количество воды выделяется из супесей, несколько меньшее – из суглинков и еще меньшее из глины. На основании этого был сделан вывод, что между содержанием глинистых частиц в грунте и расходом электрического тока на 1 г выделяемой воды существует линейная зависимость (Королев, 2015).

Такую же зависимость в 1951 г. Обнаружил Г. Н. Жинкин, установив, что каждый грунт имеет свой показатель осушения, выражающийся в количестве электричества, затраченного на выделение 1 см<sup>3</sup> воды. Этот показатель осушения не зависит от режима тока, но резко меняется с изменением гранулометрического и минерального состава грунта и его первоначальной влажности (Королев, 2015). Большое количество проведенных опытов позволило установить, что наименьший показатель осушения имеют супесчаные грунты, а наибольший – глины. Показатель осушения суглинков занимает промежуточное значение.

Значительно расширили и углубили представление об электроосмосе В. Шаад и Р. Хефели. Они рассмотрели совместное действие на грунт гидравлической и электроосмотической фильтрации, нашли новое математическое выражение закономерности электроосмотического осушения, дали ряд новых понятий и теоретических положений. Они рекомендовали определять электроосмотическую высоту подъема как разность уровней воды на катоде и аноде при напряжении  $U$  по уравнению

$$h_{\text{э}} = \frac{K_{\text{эо}}}{K_{\text{ф}}} \quad (12)$$

Где  $h_3$  – удельная электроосмотическая высота подъема при напряжении  $U = 1$  В;  $K_{30}$  – коэффициент электроосмоса в  $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ;  $K_{\phi}$  – коэффициент фильтрации в  $\text{см}/\text{с}$ .

Следовательно, удельная высота подъема прямо пропорциональна коэффициенту электроосмоса и обратно пропорциональна коэффициенту фильтрации. По удельной высоте можно определить, какова степень активности процесса электроосмотической фильтрации относительно гидравлической фильтрации; высоту  $h_3$  можно считать измерителем электроосмотического эффекта (Королев, 2015).

### **Факторы, влияющие на электроосмос в грунтах.**

Величина электроосмотического переноса воды ( $P_{30}$ ) как и  $\zeta$ -потенциал в глинистых грунтах зависит от целого ряда факторов. К внутренним факторам относятся химико-минеральный состав грунта, гранулометрический состав (дисперсность), плотность-влажность грунта, состав обменных катионов и концентрация электролита порового раствора, его рН и др. К внешним факторам относятся температура и давление, параметры внешнего электрического поля и др.

**Влияние минерального состава** на электроосмос в грунтах проявляется через дисперсность и гидрофильность составляющих их минералов, а также через природу данной минеральной поверхности. Последнее заключается через влияние термодинамического  $\varphi_0$ -потенциала поверхности данного минерала на величину  $\zeta$ -потенциала и электроосмотического переноса  $P_{30}$ : при прочих равных условиях чем выше  $\varphi_0$ -потенциал, тем больше значения  $\zeta$ -потенциала и электроосмотического переноса  $P_{30}$ , поскольку величина  $P_{30}$  (как величина  $K_{30}$ ) пропорциональна  $\zeta$ -потенциалу. В свою очередь  $\zeta$ -потенциал минералов определяется типом кристаллической структуры и особенностями изоморфных замещений (Королев, 2015).

Влияние минерального состава глин на  $K_{30}$  исследовалось А. Т. Соколовским и Р. И. Злочевской, установившими, что в поле постоянного электрического тока при одинаковой влажности глин максимальные значения характерны для монтморилонитовой глины, несколько меньшие, но близкие к ним значения отмечаются у преимущественно гидрослюдистой синей кембрийской глины и каолиновой глин, более низкими значениями обладают полиминеральные полидисперсные глины – аллювиальный суглинок и аллювиальная супесь, имеющие преимущественно иллитовый состав глинистой фракции (Королев, 2015).

Однако подобное сравнение величин  $K_{30}$  разных по минеральному составу глин не вполне корректно, так как эти грунты одновременно имеют и разную дисперсность. При

близких значениях  $\varphi_0$ -потенциала минералов, слагающих данные грунты, величина  $K_{30}$  скорее будет определяться их различной дисперсностью.

**Влияние дисперсности** на величину  $K_{30}$ , как и других параметров электроосмоса ( $P_{30}$  и  $\zeta$ -потенциала), более определено: с ростом дисперсности при прочих одинаковых условиях возрастает доля порового пространства, занятая диффузной частью ДЭС. А поскольку в электроосмотический поток воду вовлекают именно ионы диффузной части ДЭС, то чем их больше в единице объема пор, тем выше скорость электроосмоса и  $K_{30}$ . Поскольку среди основных групп глинистых минералов дисперсность их уменьшается в ряду: смектиты > иллиты > каолиниты, то в этом же ряду уменьшается величина  $K_{30}$ . В общем случае при прочих одинаковых условиях в зависимости от гранулометрического состава грунтов их коэффициент электроосмоса  $K_{30}$  и  $P_{30}$  уменьшаются в ряду тяжелые глины > глины > суглинки > супеси > пески. В последних электроосмос может вообще отсутствовать из-за незначительной роли ДЭС в их поровом пространстве (Королев, 2015).

**Влияние состава обменных катионов** в глинистых грунтах на  $\zeta$ -потенциал и параметры электроосмоса ( $K_{30}$  и  $P_{30}$ ) исследовалось многими авторами. При этом было установлено неоднозначное влияние обменного комплекса на величину  $K_{30}$  для глин разного минерального состава. Так, для глин каолинитового состава максимальное значение соответствует  $K^+$ - и  $Na^+$ -формам, а наименьшие –  $Ca^{2+}$ -форме, так как у глин, содержащих одновалентные катионы, толщина ДЭС выше, чем у образцов с двухвалентными катионами (Королев, 2015).

Для монтморилонитовых глин, обладающих значительно большей дисперсностью, размер пор соизмерим с толщиной диффузного слоя, и поэтому зависимость  $K_{30}$  от состава обменных катионов за счет большего перекрытия ДЭС в случае одновалентных катионов имеет обратный характер: величина  $K_{30}$  увеличивается в ряду  $Na$ -форма <  $K$ -форма <  $Ca$ -форма. Однако в отсутствие перекрытия одноименных ДЭС, значения коэффициента электроосмоса  $K_{30}$  монтморилонитовых глин в зависимости от состава обменных катионов, как и у каолинитов, увеличивается в ряду  $Ca$ -форма <  $K$ -форма <  $Na$ -форма (Королев, 2015).

**Влажность** глин является существенным фактором, влияющим на  $\zeta$ -потенциал и параметры электроосмоса, включая  $K_{30}$  и  $P_{30}$ . С ростом влажности  $W$  заметное передвижение порового раствора в глинах при электроосмосе практически начинается лишь при влажности, близкой к нижнему пределу пластичности ( $W_p$ ), то есть в условиях существования сплошного слоя воды в порах породы, содержащей «осмотически поглощенную» влагу в пределах диффузной части ДЭС (Королев, 2015). Увеличение

влажности сверх  $W_p$  приводит к дальнейшему росту  $K_{эо}$ ,  $P_{эо}$ , а также  $\zeta$ -потенциала не только за счет более полного развития диффузного слоя ДЭС, но и за счет увеличения диаметра пор образца. Этот процесс имеет место вплоть до влажности, близкой к полному водопоглощению глин  $W_{sw}$ , при которой величины  $K_{эо}$  и  $P_{эо}$  достигают своих максимальных значений (Королев, 2015).

Как известно, водопоглощение глинистых грунтов увеличивается с ростом емкости обмена глин, уменьшением заряда обменных катионов и величины их радиуса. При этом удельное водопоглощение глин тем выше, чем значительнее толщина диффузного слоя ДЭС, больше их  $\zeta$ -потенциал, а следовательно и величина  $K_{эо}$ . Однако большее водопоглощение глин часто бывает связано с ростом дисперсности их частиц, и толщина поверхностного слоя воды вокруг частиц может быть в этом случае относительно небольшой; при очень высокой дисперсности  $\zeta$ -потенциал глин уменьшается и падают величин  $K_{эо}$  и  $P_{эо}$ . При этом, видимо, необходимо учитывать не только рост концентрации противоионов ДЭС, но и гидравлическое сопротивление электроосмосу граничного слоя воды, особенности строения порового пространства глин и другие факторы (Королев, 2015). Так, например, для смектитовых глин при очень больших влажностях (близких к  $W_{sw}$ ) величина  $K_{эо}$  выше, чем для иллитовых и каолинитовых, а при  $W \approx W_L$  – ниже, чем у указанных глин.

Зависимости  $K_{эо}$  и  $P_{эо}$  от влажности являются нелинейными с максимумом, отвечающим влажности, близкой к пределу свободного водопоглощения или набухания ( $W_{sw}$ ). Сначала увеличение электроосмотического переноса  $K_{эо}$  и  $P_{эо}$  с ростом влажности глин связано с увеличением толщины поверхностных слоев воды в поровом пространстве глин и уменьшением при этом степени перекрытия ионных атмосфер ДЭС, полное развитие которых в глинах происходит вплоть до влажности свободного набухания ( $W_{sw}$ ) (Королев, 2015). Снижение величины  $K_{эо}$  и  $P_{эо}$  при более высоких влажностях ( $W \gg W_{sw}$ ) в дальнейшем, когда глина приобретает текучую консистенцию, связано с проявлением процесса, обратного электроосмосу, - электрофореза отдельных глинистых частиц в условиях увеличивающегося объема дисперсной среды – поровой воды, снижающего электроосмотический перенос.

Таким образом, любое воздействие на капиллярно-пористую систему, способствующее увеличению средней объемной концентрации противоионов ДЭС, сопровождается уменьшением электроосмотического переноса  $P_{эо}$ . Но поскольку рост концентрации противоионов ДЭС в значительной степени связан с объемом влаги в пределах ДЭС, то уменьшение толщины поверхностных слоев воды, обусловленное любыми причинами будет приводить к снижению скорости электроосмотического

переноса (Королев, 2015). Следовательно, причиной изменения  $P_{э0}$  в глинистых грунтах является любая модификация толщины поверхностного слоя воды в них, свойства которого (вязкость, подвижность молекул и др.), в том числе и концентрация электролита порового раствора, обуславливают то или иное влияние на значения  $P_{э0}$ .

**Влияние концентрации** электролита порового раствора на электроосмотический перенос проявляется достаточно отчетливо. Анализируя зависимости  $K_{э0}$  и  $P_{э0}$  от концентрации порового раствора электролита в глинах при одинаковых характеристиках влажности (и прочих одинаковых условиях), следует отметить, что для глин подтверждаются закономерности, установленные для всевозможных капиллярно-пористых систем и диафрагм: с увеличением концентрации электролита происходит сжатие толщины ДЭС и вследствие этого снижаются значения  $\zeta$ -потенциала, а следовательно, и величины  $K_{э0}$  и  $P_{э0}$  (Королев, 2015). Вместе с тем имеются экспериментальные данные, которые пока не сопровождаются теоритическим обоснованием, свидетельствующие о том, что перенос жидкости в глинах от анода к катоду происходит при очень больших концентрациях как в кислых, так и в щелочных растворах (Королев, 2015).

Значения величин электроосмотического расхода могут колебаться в пределах нескольких порядков в зависимости от начальной влажности грунта, его емкости обмена, содержания свободного электролита и типа глинистого грунта (минеральный состав, дисперсность, микроструктура).

Влияние степени минерализации порового раствора на  $K_{э0}$  проявляется в глинистых породах таким же образом, как и при изменении  $\zeta$ -потенциала: в общем случае уменьшается с ростом концентрации раствора электролита в поровом растворе (Королев, 2015).

**Влияние pH** порового раствора на закономерности изменения электроосмотического переноса  $P_{э0}$  и коэффициента электроосмоса  $K_{э0}$  в глинах различного минерального состава и плотности-влажности до настоящего времени изучено недостаточно. Роль pH порового раствора при электроосмосе в глинах следует рассматривать независимо от щелочности или кислотности порового раствора. Согласно исследованиям В. А. Королева (2015), по мере увеличения концентрации ионов гидроксила в щелочной области или ионов водорода в кислой области происходит увеличение электроосмотического переноса.

**Влияние микроорганизмов** в дисперсных грунтах, оказывающих существенное воздействие на многие физико-химические свойства грунтов, обуславливает и их влияние на электрокинетические свойства дисперсных частиц грунтов, изменяя заряды частиц, в

частности, при адсорбции на частицах минералов отрицательно заряженных клеток или продуктов метаболизма микроорганизмов, функциональные группы которых могут иметь как положительный, так и отрицательный заряды (Королев, 2015). Электроповерхностные свойства микроорганизмов определяются наличием на их поверхности тех или иных ионогенных групп в диссоциированном состоянии. Степень их диссоциации, в свою очередь, зависит от pH среды. При изменении pH среды меняется электрофоретическая подвижность ряда микроорганизмов. Для некоторых микробных клеток зависимость  $\zeta$ -потенциала от концентрации раствора электролита имеет вид, аналогичный тому, что и для глинистых минералов (Королев, 2015). Наличие относительно высокого отрицательного  $\zeta$ -потенциала у микроорганизмов способно существенным образом влиять на распределение общего  $\zeta$ -потенциала дисперсного грунта, содержащего те или иные микроорганизмы, а следовательно, влиять и на величину электроосмотического переноса  $P_{эо}$  и коэффициента электроосмоса  $K_{эо}$  (Королев, 2015).

Из внешних факторов, влияющих на электроосмос в дисперсных грунтах, наиболее существенное влияние оказывают температура и параметры прикладываемого внешнего электрического поля (напряженность и др.).

**Влияние температуры** увеличение электропроводности ( $\chi_v + \chi_s$ ) в тонком слое влаги при нагревании будет приводить к снижению электроосмотического переноса  $P_{эо}$ . При этом поверхностная проводимость ( $\chi_s$ ) возрастает с температурой в большей мере, чем  $\chi_v$ . Что же касается температурной зависимости коэффициента электроосмоса  $K_{эо}$ , то ее теоретический анализ неочевиден из-за сложности изменения параметров  $\zeta$ ,  $\varepsilon$  и  $\eta$  с температурой, входящих в выражение для  $K_{эо}$ . Судя по экспериментальным данным, величина коэффициента электроосмоса  $K_{эо}$  возрастает с температурой (Королев, 2015). Таким образом, результирующее влияние температуры на электроосмотический перенос  $P_{эо}$  определяется соотношением величин ( $\chi_v + \chi_s$ ) и  $K_{эо}$ , меняющихся с температурой.

**Влияние напряженности электрического поля** постоянного тока ( $E$ ) на электроосмотическую фильтрацию воды в глинистых грунтах имеет сложный характер. Начальный градиент напряжения электрического поля  $E_0$ , при котором впервые обнаруживается электроосмотический перенос, зависит от минерального и гранулометрического состава глин. Увеличение  $E_0$  связано либо с более высокой дисперсностью глин и, следовательно, малым размером пор, заполненным тонким слоем структуроизмененной влаги, либо существенно влияние на  $E_0$  оказывает низкая электрохимическая активность (незначительное содержание глинистой фракции) и существенная неоднородность порового пространства (Королев, 2015). По мере роста  $E$  в электроосмотический перенос вовлекается все большее количество противоионов ДЭС,



что приводит к росту  $K_{эо}$  вплоть до достижения некоторого критического (первого) градиента напряжения электрического поля  $E_{кр}'$ , способного привести в движение все ионы диффузной части ДЭС (Королев, 2015). В результате при этом устанавливается стационарный ламинарный электроосмотический поток жидкости. Постоянство  $K_{эо}$  сохраняется вплоть до значения величины (второго) критического градиента  $E_{кр}''$ , выше которого наблюдается резкое увеличение коэффициента электроосмоса в 2-2,5 раза. При дальнейшем увеличении  $E$  коэффициент электроосмоса вновь остается практически постоянным. Резкое увеличение  $K_{эо}$  при напряженности  $E \gg E_{кр}''$  объясняется особыми реологическими свойствами граничных фаз поровой жидкости вблизи твердой поверхности глинистых грунтов, который при  $E < E_{кр}''$  не участвуют в электроосмотической фильтрации ввиду наличия существенной сдвиговой прочности у этих слоев (Королев, 2015). При напряжении  $E > E_{кр}''$  в движение вовлекается уже не только объемная часть жидкости, но и ее граничная фаза, в результате чего резко возрастает коэффициент электроосмоса  $K_{эо}$ . Если при  $E < E_{кр}''$  в движении принимают участие только ионы диффузной части ДЭС, то при  $E > E_{кр}''$  в движение вовлекаются и ионы адсорбционного (пристенного) слоя. Таким образом, при высокой напряженности  $E$  в глинистых грунтах весь двойной слой вовлекается в электроосмотическое движение.

### Теория электрофореза в грунтах

Электрофорез, то есть движение заряженных частиц под действием внешнего электрического поля, осуществим в грунтах лишь в ограниченных условиях. В большинстве дисперсных грунтов из-за специфики их структуры нет условий для осуществления электрофореза, так как частицы в них находятся не в свободнодисперсном состоянии, а связаны друг с другом структурными связями различной природы. Чем выше прочность структурных связей, тем большую энергию надо затратить на отрыв частиц друг от друга для последующего вовлечения их в электрофоретический поток. С другой стороны, дисперсные частицы, даже будучи «оторванными» от соседей, обычно не могут свободно перемещаться под действием электрофореза в поровом пространстве грунта, поскольку последнее, как правило, имеет весьма сложную структуру: наличие замкнутых пор, наличие сужающихся пор, перемычек, заземленных газов и т. п. Ограниченность электрофоретической подвижности частиц в большинстве дисперсных грунтов обуславливает малое применение электрофореза для грунтов, однако полностью его не исключает (Королев, 2015).

Таким образом, основными условиями протекания электрофореза частиц в грунтах являются:

- 1) наличие в грунте свободнодисперсных заряженных частиц;
- 2) наличие в грунте свободного порового пространства (открытой пористости) и относительно широких сообщающихся поровых каналов либо наличие свободной жидкой дисперсионной среды, в которой могла бы осуществляться электрофоретическая подвижность частиц
- 3) наличие внешнего электрического поля

Линейная скорость электрофореза частиц грунта ( $v_{\text{эф}}$ ), имеющих определенный  $\zeta$ -потенциал в среде с диэлектрической постоянной  $\varepsilon$  и вязкостью  $\eta$ , в поле напряженностью  $E$  описывается уравнением Смолуховского:

$$v_{\text{эф}} = \frac{\varepsilon \zeta E}{4\pi\eta} \quad (13)$$

Если известно число частиц ( $N$ ),двигающихся под действием электрофореза в единице объема грунта, можно определить их общий поток ( $J_{\text{эф}}$ ) в грунте:

$$J_{\text{эф}} = v_{\text{эф}} N = \frac{k_1 \varepsilon \zeta E N}{4\pi\eta} \quad (14)$$

Где  $k_1$  – численный коэффициент.

Как видно из уравнений на скорость электрофореза  $v_{\text{эф}}$  грунтовых частиц влияют те же факторы, что и в случае электроосмоса (Королев, 2015). В частности скорость электрофореза частиц  $v_{\text{эф}}$  прямо пропорциональна величине их  $\zeta$ -потенциала и диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  дисперсионной среды (порового раствора, взаимодействующего с грунтом) и обратно пропорциональна вязкости  $\eta$  дисперсионной среды. Таким образом, все факторы, влияющие на  $\zeta$ -потенциал будут оказывать влияние и на величину  $v_{\text{эф}}$  грунтовых частиц. А именно скорость электрофореза  $v_{\text{эф}}$  грунтовых частиц будет возрастать с уменьшением концентрации электролита порового раствора и увеличением заряда частиц и их потенциала  $\varphi_0$ . Кроме того, при прочих одинаковых условиях скорость электрофореза грунтовых частиц будет определяться и составом обменного комплекса грунта; она будет возрастать при наличии в ДЭС частиц катионов разной валентности в ряду:  $K^+ > K^{2+} > K^{3+}$  (Королев, 2015).

Важно отметить, что поскольку грунт является многокомпонентной системой, в которой кроме минеральных частиц могут содержаться различные органико-минеральные и биотические компоненты, большинство из которых несет на своей поверхности электрический заряд, то в грунтах возможен и электрофорез этих частиц. Особую роль приобретает в грунтах электрофорез наночастиц, представленных заряженными токсичными частицами – загрязнителями грунтов (ионными комплексами, ионными соединениями и т. п.).

## **Электрокоагуляция и преобразование структуры грунтов**

Находясь в поле электрического тока, дисперсные грунты в результате влияния различных электрокинетических и электрохимических процессов испытывают существенные структурные преобразования. В зависимости от исходного состояния грунта и степени его литификации эти преобразования будут различны. Наиболее существенные преобразования структуры претерпевают нелитифицированные дисперсные грунты или современные осадки, не прошедшие стадию диагенеза.

Изменение свойств грунтов обязано электроосмотическому обезвоживанию и коагуляции глинистых частиц, происходящим вследствие катионного обмена, а также образованию агрегатов частиц в результате действия гидратов окиси алюминия или железа (в зависимости от рода металла электродов). В результате этих электрохимических преобразований грунты не только изменяют свою структуру, но и приобретают иные свойства: уменьшается их набухание и усадка, снижается липкость, увеличивается угол внутреннего трения и т.п.

Особую практическую роль приобретает целенаправленное электрическое преобразование структуры современных природных или искусственных осадков, когда за счет воздействия электрического тока удастся получить требуемую структуру грунта. В частности, электрическое преобразование структуры таких осадков имеет большое значение для очистки сточных вод, а также для ускорения осаждения высокодисперсных осадков в хвостохранилищах.

**Электрокоагуляцией** называют процесс ускорения коагуляции осадков дисперсных частиц в поле постоянного электрического тока за счет электродных процессов и увеличения при этом в растворе концентрации многовалентных ионов металлов, слагающих электроды и вызывающих эту коагуляцию. Большую роль в этом процессе также играет электрофорез частиц, под действием которого усиливается соударение частиц и образование агрегатов.

В процессе коагуляции выделяют две стадии: 1) сближение первоначально удаленных друг от друга частиц; 2) их взаимодействие (слипание) на малых расстояниях. При наложении внешнего электрического поля обе стадии изменяются: за счет электрофореза частицы сближаются у одного из электродов, что создает условия для протекания второй стадии – их активной коагуляции. Во внешнем электрическом поле происходит деформирование ДЭС, а нарушение его симметрии способствует увеличению эффективности соударения частиц.

Дисперсные грунты в электрическом поле претерпевают существенные изменения своей структуры в результате электрокоагуляции и электрокинетических явлений.

Особенно сильно микроструктурные преобразования происходят при электроосмосе дисперсных грунтов в их приэлектродных катодной и анодной зонах.

Основными причинами, вызывающими структурные преобразования грунтов при воздействии электрического тока, являются:

- 1) уплотнение грунта в анодной зоне за счет электроосмотического осушения;
- 2) разуплотнение грунта в катодной зоне за счет электроосмотического увлажнения;
- 3) электрокоагуляция частиц, особенно в катодной зоне;
- 4) изменение pH в анодной и катодной зонах;
- 5) концентрирование у анода или катода определенных ионов вследствие их электрохимического переноса.

Согласно электронно-микроскопическим исследованиям изменения микроструктуры различных глинистых грунтов при электроосмосе, выполненным В. А. Королевым (2015), были выявлены следующие закономерности. В анодной зоне микроструктура глины становится за счет электроосмотического осушения более плотной, крупные поры, занятые водой, практически отсутствуют, вместо них преобладают тонкие и мелкие поры, а микротекстура однородная. В отличие от этого в катодной зоне за счет электроосмоса формируется более рыхлая микроструктура, здесь видны крупные поры, занятые водой, а микротекстура становится псевдотурбулентной за счет миграции электроосмотического потока воды.

Поскольку в анодной зоне при электроосмосе создается кислая среда, а в катодной – щелочная, то в этих зонах принципиально меняется строение ДЭС вокруг частиц и, как следствие этого, изменяется микростроение грунтов в целом. Однако, учитывая, что частицы глинистых грунтов, подвергнутых электроосмосу, чаще всего находятся в стесненных условиях, когда они не могут свободно менять свою пространственную ориентацию и т. п., следует признать, что основную роль в структурных преобразованиях грунтов при электроосмосе играет осушение анодной зоны и увлажнение катодной, а также электрохимические процессы, приводящие к изменению pH в этих зонах.

Таким образом, воздействие постоянного электрического тока на грунты сопровождается существенными преобразованиями их свойств, микроструктуры и микротекстуры.

## **Выводы к главе 2**

1) В результате контакта твердой и жидкой фаз в глинистых грунтах образуется система зарядов, получившая название двойного электрического слоя (ДЭС);

2) Если ДЭС находится под действием электрического тока, то это обуславливает протекание электрокинетических явлений, а именно электроосмоса (перенос жидкости в глинистых грунтах под действием электрического тока) и электрофореза (движение заряженных частиц под действием электрического тока);

3) На электрокинетические явления оказывают влияние следующие факторы: минеральный состав грунта; дисперсность грунта; состав обменных катионов; влажность грунта; концентрация электролита порового раствора; водородный показатель pH; наличие микроорганизмов в грунте; температура; напряженность электрического поля;

4) В результате влияния электрокинетических явлений и обусловленного ими процесса электрокоагуляции происходит изменение структуры и физико-механических свойств глинистых грунтов.

### Глава 3. Основные результаты исследования

С целью оценки изменения физико-механических свойств дисперсных грунтов под влиянием токов катодной защиты, было выполнено физическое моделирование на образце глинистого грунта.

Объектом исследований были выбраны нижнекембрийские синие глины сиверской свиты, которые широко распространены по всей Ленинградской области.

Участок отбора образцов находится недалеко от городского поселения Никольское, Ленинградской области. Город расположен в северной части Тосненского района, к юго-востоку от границы Санкт-Петербурга (рис. 6).

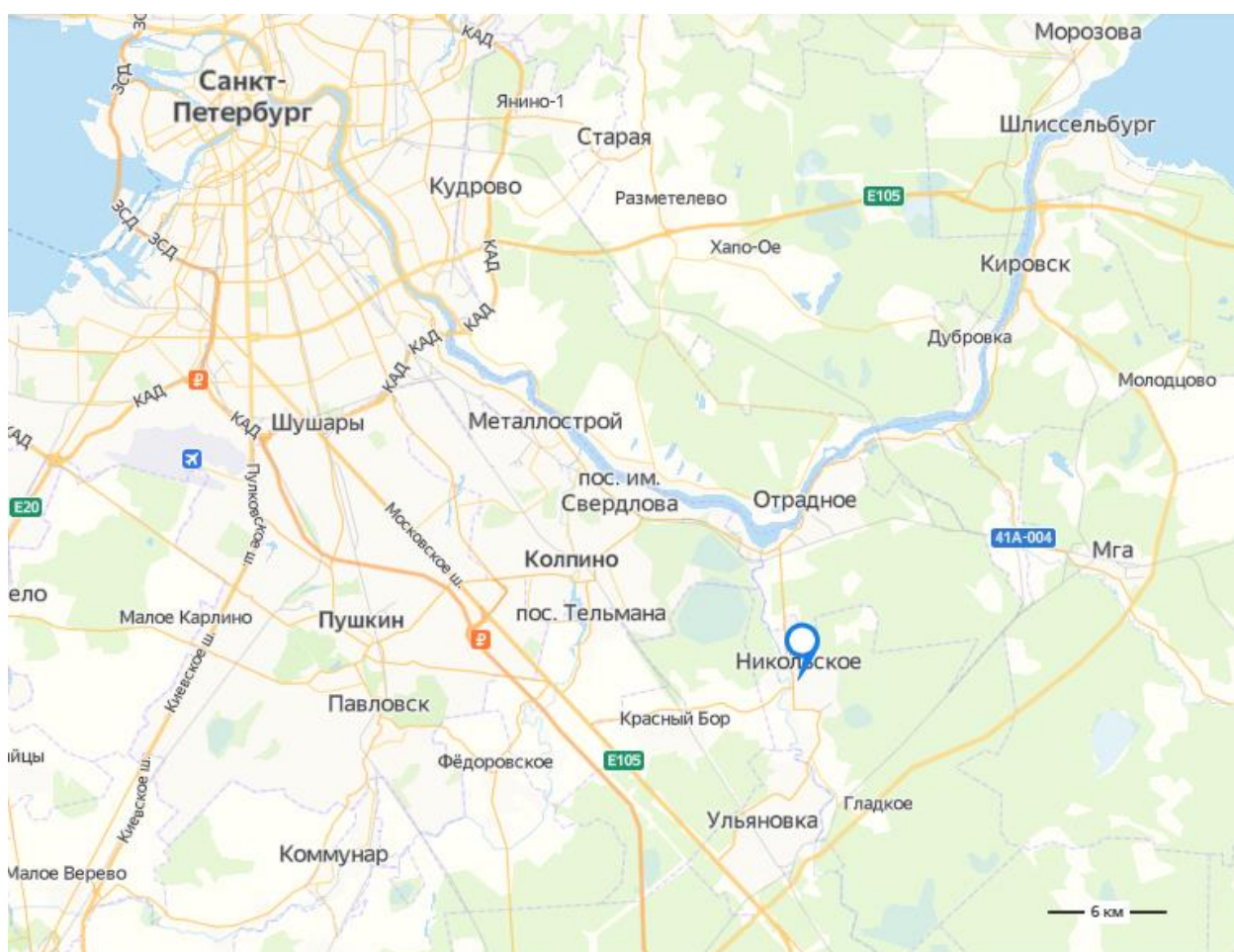


Рис. 6. Местоположение городского поселения Никольское (maps.yandex.ru).

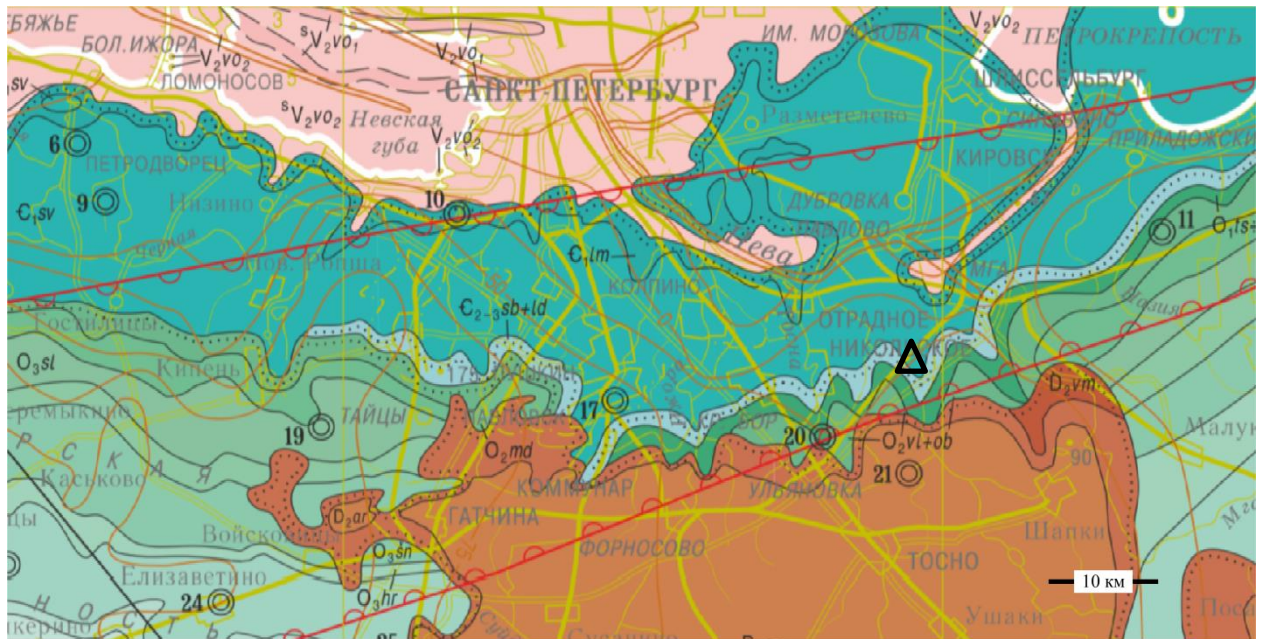
#### 3.1. Геологическое строение участка отбора образцов

Рельеф рассматриваемой территории представляет собой плоскую равнину, прорезанную долиной реки Тосна. Данный район приурочен к северной оконечности Ордовикского плато. Абсолютные отметки дневной поверхности варьируют в пределах 30-35 м.

Ордовикское плато представляет собой слабо холмистую возвышенность с абсолютными отметками поверхности до 150 м. Плато разделяется на два участка: западный, называемый Ижорским плато или Ижорской возвышенностью, и восточный, расположенный между реками Мга и Волхов, называемый Волховским плато.

В структурном плане территория относится к северо-западной части Русской платформы (рис. 7). На архейском кристаллическом фундаменте залегают породы осадочного чехла протерозойско-палеозойского возраста. Основной особенностью геологического строения этой области является пологое моноклинальное залегание слагающих ее образований, с очень слабым падением их к югу и юго-востоку. Кристаллический фундамент сложен гранито-гнейсами и гнейсо-гранитами с подчиненными амфиболитами и кварцитами архейского и протерозойского возраста. Это сложно дислоцированная толща с многочисленными разломами со смещениями блоков фундамента. Непосредственно на фундаменте залегают более молодые образования. Это песчано-глинистые отложения валдайской серии вендского комплекса (котлинский горизонт), а выше глины с песчаником в основании балтийского комплекса (ломаносовская и сиверская свиты) нижнего кембрия. К югу они погружаются под ордовикские и верхнедевонские породы.

Непосредственно на рассматриваемой территории кристаллический фундамент образует Никольско-Тосненское структурное поднятие – следствие блокового поднятия кристаллического фундамента, произошедшего в неогене - плейстоцене. Отражением этого поднятия является повышение абсолютных отметок поверхности осадочного чехла платформы (Кузнецов, 1974). Поэтому здесь отсутствуют образования ордовика и девона и кембрийские глины лонтоваской свиты залегают под маломощным слоем четвертичных отложений.



D <sub>2</sub> ar	Аркулюаская свита [7,8] — пески и песчаники красноцветные с прослоями алевролитов и глин, редко мергелей и песчаных доломитов (до 135 м)
D <sub>2</sub> nr	Наровская свита [7] — доломиты и мергели с прослоями глин, алевролитов и песчаников (72–99 м)
D <sub>2</sub> vm	Веймарнская свита [7] — пески и песчаники светло-серые с редкими прослоями алевролитов и глин, мергелей и доломитов (до 24 м)
O <sub>3</sub> sl	Солецкая свита [12] — известняки и доломиты (11–22 м)
O <sub>2</sub> md	Медниковская свита [11–12] — глинистые известняки и доломиты неравномерной крепости (до 31 м)
O <sub>2</sub> vl+ob	Волховская и обуховская свиты объединенные [11–12] — глауконитовые известняки и доломиты (до 31 м)
O <sub>1</sub> ts÷lt	Тосненская, копорская и леэссеская свиты объединенные [11] — пески, песчаники мелкозернистые, цефевые, с вкрапленностью глауконита, диктионемовые аргиллиты, местами глины и алевролиты, ники и глины глауконитовые (до 16 м)
Є <sub>2-3</sub> sb+ld	Саблинская и ладожская свиты объединенные [14] — пески и песчаники, вверху с прослоями глини алевролитов (до 47 м)
Є <sub>1</sub> sv	Сиверская свита [14] — глины пластичные с редкими прослоями алевролитов (100–120 м)
Є <sub>1</sub> lm	Ломоносовская свита [14] — глины, алевролиты и песчаники (4–23 м)
Vkt	Валдайская серия. Котлинский горизонт — глины уплотненные, аргиллиты, алевролиты, песчаники

Рис. 7. Фрагмент государственной геологической карты Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Центрально-Европейская. Листы О-35, (N-35), О-36. (Вербицкий В. Р., Вербицкий И. В., Васильева О. В., Саванин В. В. и др., 2012). Черным треугольником показано примерное расположение участка отбора образцов.



### 3.1.1. Стратиграфия

В геологическом строении рассматриваемой территории принимают участие породы кристаллического фундамента и осадочного чехла, в составе которых выделяются дочетвертичные и четвертичные отложения (рис. 8).

Система	Отдел	Ярус	Серия	Горизонт	Свита (подсвита)	Индекс	Литология	Характеристика пород
Четвертич.						Q		Суглинок с гальками и валунами
Кембрийская	Нижний	Томмотский	Балтийская	Лонтоваский	Сиверская	E <sub>1</sub> sv		Толща «синих» глин
				Ломоносовская				
Вендская	Верхний	Валдайская	Коглинский	Коглинская	Верхняя	V <sub>2</sub> kt <sub>2</sub>		Глина алевроитовая
					Нижняя	V <sub>2</sub> kt <sub>1</sub>		Переслаивание песков, песчаников и глин
								Глина алевроитовая
								Гравелитистый песчаник
Архейская группа						A		Гранито-гнейсы

Рис. 8. Литологическая колонка отложений участка отбора образцов.

#### Архей-протерозой (AR-PR)

Самые древние образования, принимающие участие в геологическом строении территории, это архейско-протерозойские породы, слагающие кристаллический фундамент. Они представлены гранито-гнейсами и гнейсо-гранитами с подчиненными

амфиболитами и кварцитами Это сложно дислоцированная толща с многочисленными разломами со смещениями блоков фундамента, прорванная многочисленными интрузиями гранитов, реже диоритов и габбро (Геология СССР..., 1971).

## **Верхний протерозой. Вендская система. Верхний отдел. Валдайская серия.**

### **Котлинский горизонт. Котлинская свита**

*Нижнекотлинская (гдовская) подсвита ( $V_{2kt1}$ )* залегает трансгрессивно на эродированной поверхности кристаллического фундамента. Покрывается гдовская подсвита глинами верхнекотлинской свиты. Глубина залегания отложений 280 - 300 м, мощность 80 - 90 м (Геология СССР..., 1971).

Отложения нижнекотлинской подсвиты имеют трехчленное строение. Выделяются три литологически различные пачки: нижняя гравелито-песчаниковая, или песчаная; средняя глинистая, или алевритово-глинистая; верхняя песчано-алевритовая.

Гравелито-песчаниковая пачка начинается базальным слоем, представленным гравелитом, гравелитистым грубозернистым песчаником, или реже мелкогалечниковым конгломератом. Мощность базального слоя изменяется от 4 до 7 м. Гравелит и гравелитистые песчаники обычно окрашены в серый и зеленовато-серый цвет, местами в нижней части пачки в бурый и фиолетово-бурый. Обломочный материал слабо или совсем неотсортирован. Зерна плохо окатаны. В минеральном составе песчаников и гравелитов преобладает кварц (50 - 70%), в подчиненном значении содержится полевой шпат (до 25%), присутствует в небольших количествах слюда (биотит и мусковит), встречаются отдельные крупные гравийные зерна и гальки гранито-гнейсовых пород. В тяжелой фракции, помимо преобладающих рудных и сульфидных минералов, встречаются циркон и карбонаты и в долях процента — гранат, турмалин, эпидот, рутил, титанит, лейкоксен, глауконит, роговая обманка. По степени цементации песчаники различны: от слабо до плтноцементированных. Тип цемента—выполнения пор и базальный, состав — кремнисто-глинистый, с примесью окислов железа. Выше базального слоя нижняя пачка гдовского горизонта сложена разномзернистыми, средне- и мелкозернистыми песчаниками с включениями редких гравийных зерен; на них залегают песчаники мелко- и тонкозернистые, сменяющиеся нередко алевритами. Песчаники и алевриты этой части разреза окрашены также в серые и зеленовато-серые цвета. Они преимущественно кварцевые, с примесью полевых шпатов, микроклина и кислого плагиоклаза (до 5 - 10%), нередко с большим количеством слюды (до 20 - 40%); из аксессуаров встречаются единичные зерна турмалина. Цемент глинистый, кремнистый, местами карбонатный, по типу — базальный, выполнения пор и соприкосновения. В песчаниках местами

присутствуют тонкие, в несколько сантиметров толщиной, глинистые прослои. Мощность нижней песчаной пачки гдовского горизонта изменяется от 5 до 20 м (Геология СССР..., 1971).

Далее выделяется глинистая (или алевроитово-глинистая) пачка. Глины, слагающие основную часть пачки, уплотненные, в различной степени алевроитистые, тонкослоистые и массивные с раковистым изломом. В тонкослоистых разностях глин на плоскостях напластования встречаются слюдисто-алевритовые присыпки, а также бурые сапропелитовые и пиритовые пленки. Глины имеют зеленовато-серую и темно-серую, местами буровато-коричневую, вишневую и табачно-желтую окраску. По минеральному составу глинистых частиц чаще всего они являются каолинитово-гидрослюдистыми, реже монтмориллонитовыми и гидрослюдистыми. Бурые разновидности глин обогащены гидроокислами железа. Алевроитовая фракция глин состоит из кварца, полевых шпатов и слюд, встречаются пирит и черные рудные минералы (Геология СССР..., 1971).

Верхняя - песчано-алевритовая пачка составляет обычно больше половины разреза гдовского горизонта. Она сложена неравномерно переслаивающимися песками, песчаниками, алевролитами, алевролитами и глинами. Пески и песчаники в большинстве случаев преобладают в ее нижней части. Глины и алевролиты, как правило, развиты в верхней части. Песчаники средне- и мелкозернистые, кверху сменяются мелко- и тонкозернистыми в различной степени глинистыми. Они окрашены в зеленовато-серый и зеленовато-светло-серый цвет. По минеральному составу песчаники полевошпатово-кварцевые, иногда со значительным преобладанием кварцевого материала, слюдистые. Цемент глинистый, участками карбонатный. В песчаниках наблюдается волнистая и косая слоистость. Алевролиты и алевролиты чаще образуют прослойки мощностью от долей сантиметра до нескольких сантиметров, реже слагают почти целиком верхнюю часть песчано-алевритовой пачки. По составу зерен, цемента и по окраске они аналогичны песчаникам. В алевролитах хорошо выражена тонкая горизонтальная и волнистая слоистость. На плоскостях напластования присутствуют скопления слюды и порошковидного пирита. Глины тоже составляют обычно тонкие прослойки в песчано-алевритовой пачке, реже образуют значительные по мощности (2 - 3 м) прослои. Они отличаются от глин средней пачки более однотонной зеленовато-серой и реже буровато- и розовато-коричневой окраской и более ясно выраженной тонкой слоистостью. В глинах на плоскостях напластования встречаются темно-бурые битуминозные пленки. Состав глин гидрослюдистый, редко монтмориллонито-гидрослюдистый. Общая мощность песчано-алевритовой пачки изменяется от 45 до 50 м (Геология СССР..., 1971).

*Верхнекотлинская подсвита ( $V_2kt_2$ ).* Отложения верхнекотлинской подсвиты полого погружаются к юго-востоку под согласно перекрывающие его отложения балтийской серии нижнего кембрия и более молодые палеозойские образования. Глубина залегания подсвиты 170 – 190 м, мощность 100 - 110 м. Нижняя граница выражена не всегда отчетливо, так как переход песчано-алевритовых пород верхней части гдовской подсвиты к преимущественно глинистым породам верхней подсвиты постепенный. Верхняя граница котлинской свиты также выражена неясно. Переход от котлинской свиты к вышележащей толще переслаивания песчаников алевролитов и глин ломоносовской свиты постепенный и граница между ними в отдельных разрезах условна (Геология СССР..., 1971).

Отложения верхнекотлинской подсвиты на рассматриваемой территории характеризуется сравнительным постоянством разреза. Она представлен однообразной толщей плотных глин в различной степени алевритовых, серого и зеленовато-серого цвета, на отдельных участках с буроватым оттенком. Характерной особенностью их является тонкая слоистость, обусловленная частым, через 1 – 3 мм переслаиванием глинистых и в различной степени алевритистых прослоек. На плоскостях напластования присутствуют многочисленные бурые пленки тонкозернистого пирита и органического вещества. Последние обычно называют ляминаритовыми пленками, из-за наличия обрывков одноименных водорослей. Слоистость в глинах горизонтальная и мелковолнистая, косая. Кроме того, в глинах наблюдаются по всему разрезу складочки подводного оползания. Характерным является присутствие в глинах прослоев и линз (от 1 мм до 3 см редко до 10 – 20 см) а также отдельных желваков и пленок сидерита желто-бурого цвета, это мелкокристаллический железистый карбонат бурого и светло-коричневого цвета, иногда с включениями отдельных мелких зерен кварца и тонкозернистого хлорита. На некоторых участках в глинах наблюдаются трещинки, заполненные алевритовым материалом. По трещинкам и по слойкам часто заметны смещения. Глины гидрослюдистые, частично монтмориллонито-гидрослюдистые и в меньшей мере каолинитовые (Геология СССР..., 1971).

В самых низах свиты присутствуют песчаники, образующие прослой в глинах, выше по разрезу они переходят в алевролиты. В песчаниках и алевролитах также наблюдается тонкая горизонтальная и волнистая слоистость, обусловленная наличием на плоскостях напластования слюдистой «присыпки» и тонкозернистого пирита (Геология СССР..., 1971).

## Кембрийская система. Нижний отдел. Балтийская серия

*Ломоносовская свита (Є<sub>1</sub>lm).* Отложения ломоносовской свиты представляют собой базальные слои балтийского циклического комплекса. Нижняя граница ломоносовской свиты выражена неотчетливо, наблюдается постепенный переход от песчаных глин в верхней части разреза котлинской свиты к песчаникам ломоносовской свиты. В связи с этим нижняя граница ломоносовской свиты проводится условно. Верхняя граница свиты также в большинстве случаев нечеткая, так как переход от песчано-алевритовых пород ломоносовской свиты к глинам сиверской свиты постепенный. Мощность ломоносовской свиты колеблется от нескольких метров до 10 - 20 м (Геология СССР..., 1971).

Ломоносовская свита сложена неравномерно переслаивающимися песчаниками, алевролитами и глинами. Песчаники, слагающие нижнюю часть свиты мощностью от 0,5 до 2,0 м, по преимуществу мелкозернистые и среднезернистые, местами крупнозернистые, имеют светло-серую окраску, иногда с зеленоватым и розоватым оттенком, тонкогоризонтально- и косослоистые. Слоистость обусловлена распределением по слоям обломочного материала различной крупности зерна, присутствием тонких глинистых примазок и скоплений по плоскостям наложения слюды и зерен глауконита. Песчаники преимущественно кварцевые (60 - 80% и более), с небольшой примесью полевых шпатов и слюды. В тяжелой фракции встречаются циркон, хлорит, амфибол, кианит, рудные (пирит), местами глауконит, иногда сидерит или анкерит. Цемент песчаников и алевролитов — глинистый, кварцевый, местами карбонатный, по типу — выполнения пор и соприкосновения (Геология СССР..., 1971).

Алевролиты составляют меньшую часть разреза свиты. Мощность прослоев алевролитов колеблется от 0,10 до 0,50 м. По минеральному составу они не отличаются от песчаников. Для них также характерна тонкая горизонтальная и косая слоистость. На плоскостях напластования алевролитов и песчаников наблюдаются бурые пятна тонкозернистого пирита, реже темно-бурые пленки органического вещества (Геология СССР..., 1971).

Глины присутствуют в разрезе свиты чаще всего в виде тонких прослоев и линз мощностью от нескольких сантиметров до 1 м. Глины в различной степени песчанистые и алевритистые, зеленовато-серого цвета, обладают тонкослоистой текстурой, на плоскостях напластования содержат алевритовые присыпки и пленки тонкозернистого пирита. По минеральному составу глинистых частиц они относятся к гидрослюдистым. В алевритовой фракции глин преобладает кварц, содержится примесь полевых шпатов (от 5 до 25%) и меньше — слюды (мусковит, биотит, хлорит). В тяжелой фракции преобладают рудные, местами много циркона и титанистых минералов. Содержание граната,

турмалина, рутила, брукита, титанита, кианита, ставролита, гиперстена составляет несколько процентов. Из аутигенных минералов встречаются единичные зерна глауконита; в породе присутствуют отдельные зерна и мелкие агрегаты кристаллов пирита (Геология СССР..., 1971).

*Лонтоваский горизонт. Сиверская свита (C<sub>1sv</sub>) («синие глины»).* Нижняя граница сиверской свиты выражена неотчетливо, так как литологический состав отложений, слагающих нижнюю часть ее разреза, близок к литологическому составу подстилающих пород. Мощность сиверской свиты колеблется в пределах 90 - 100 м (Геология СССР..., 1971).

Сиверская свита представлена сравнительно однообразной толщей глин, содержащих местами маломощные редкие прослои песчаников и алевролитов. Глины голубовато- или зеленовато-серые, на отдельных участках с фиолетовыми, красноватыми и коричневыми полосами и пятнами, в различной степени алевритистые и песчанистые, массивные и неравномернослоистые, пластичные. Слоистость обусловлена присутствием тончайших, в доли миллиметра, слюдисто-алевритовых пропластков и присыпок на плоскостях напластования. Цвет алеврита — светло-серый и зеленоватый. Характерным признаком глин является присутствие присыпок темно-бурого порошковидного пирита, образующих короткие лентовидные прерывистые полоски миллиметровой ширины. Пирит встречается, кроме того, по всей толще глин в отдельных кристаллах или в конкрециях. В сухом состоянии глины сланцеватые, но наряду с этим встречаются и массивные с полураковистым изломом. Глины гидрослюдистые, реже монтмориллонитовые (Геология СССР..., 1971).

В глинах содержится примесь алевритовых зерен; алеврит также составляет линзы и прослои различной мощности. Алеврит преимущественно кварцевый, с примесью слюды и калиевого полевого шпата; в малых количествах содержатся хлорит, глауконит, рудные минералы, отдельные зерна циркона, рутила и турмалина. Биотит и хлорит частично изменены в гидрослюду. Песчаники и алевролиты, образующие прослои и линзы мощностью от 2 - 3 мм до 10 - 30 см преимущественно в нижней части толщи глин, имеют светло-серую, иногда с зеленоватым оттенком окраску, тонкогоризонтально- и косослоистую текстуру, различную степень цементации. Они состоят в основном из зерен кварца, с подчиненным количеством полевых шпатов, слюды и хлорита. Характерно также присутствие аутогенного глауконита. Кроме того, встречаются, как правило, пирит и железистые карбонаты. Цемент глинистый, глинисто-кремнистый, реже карбонатный (Геология СССР..., 1971).

Формирование синих глин приходилось на максимум трансгрессии нижнекембрийского теплого мелководного моря и приурочено к каледонскому циклу орогенеза, начавшемуся в раннем кембрии, который унаследовал от позднего докембрия характер тектонической и палеогеографической обстановки (Дашко, 2000). В своем развитии глинистые породы нижнего кембрия испытали несколько циклов прогрессивного и регрессивного литогенеза, что определило состояние толщи, степень дезинтегрированности глин и соответственно их физико-механические свойства, а также проницаемость (Дашко, 2014).

Катагенетические преобразования синих глин происходили за счет комплекса следующих процессов: 1) гравитационного уплотнения осадков под действием давления перекрывающих пород; 2) действия тектонических сил в области сочленения Русской платформы с Балтийским щитом; 3) изменения термодинамических и физико-химических условий по мере погружения толщи пород на глубину и формирования цементационных связей при повышении концентраций солей поровых растворов (Дашко, 2000).

В палеозое они были перекрыты отложениями кембрийскими, силурийскими и девонскими общей мощностью 300—350 м, создающими нагрузку примерно 60—70 кг/см. Впоследствии они оказались в области размыва и, следовательно, претерпевали постепенную разгрузку. К началу четвертичного периода весь покров палеозойских отложений был смыт и в четвертичное время ледник эродировал, а ледниковые воды размывали непосредственно кембрийские глины. Мощность ледникового покрова могла достигнуть 1000 м. Следовательно, в период оледенения временная нагрузка на кембрийские глины достигала 80 - 90 кг/см. В послеледниковое время кембрийские глины северо-западной части Русской платформы оказались под покровом четвертичных отложений мощностью от 5 - 10 до 50 - 100 м, т. е. под нагрузкой от 1 - 2 до 10 - 20 кг/см (Дашко, 2000).

Таким образом, кембрийские глины дважды после отложения испытывали нагрузку: первую, меньшую по величине, но продолжительную, — в палеозое и вторую, большую по величине, но весьма кратковременную, — в ледниковое время. В течение же значительного геологического времени они были разгружены, подвергались разуплотнению, которое сопровождалось явлениями гидратации. Также весьма серьезный вклад в уплотнении глин сыграли тектонические силы, активно действующие в регионе сочленения Русской платформы с Балтийским щитом.

Процессы прогрессивного катагенеза синих глин сменялись длительными периодами разгрузки и регрессивных литогенетических преобразований пород. Первый этап регрессивного литогенеза связан с периодом образования эрозионного среза пород

палеозоя и Балтийско-Ладожского уступа (глинта), который является результатом тектонических движений в доледниковое время. Синие глины предглинтовой зоны в этот период времени испытали разуплотнение за счет разрушения и размыва вышележащих пород (Дашко, 2000). В последниковое и в настоящее время рассматриваемые отложения в Санкт-Петербургском регионе также находятся на стадии регрессивного литогенеза. Синие глины залегают под маломощным чехлом четвертичных отложений различного генезиса (моренных, озерно-ледниковых и техногенных), либо выведены на дневную поверхность (Дашко, 2000). Все эти геологические условия, в которых находились кембрийские глины определили их современное состояние и свойства.

Нижнекембрийские глины относятся к морским образованиям и выделяются в особый класс отложений - гемипелагических глин, формирование которых происходило из голубых илов в теплом климате при активном развитии органической жизни (Дашко, 2014). Наличие большого количества органики определило развитие восстановительной среды, в которой протекала деятельность сульфатредуцирующих бактерий с образованием сероводорода и последующим – сульфидов железа: пирита и марказита. Исходный осадок глин (голубые илы) накапливался в спокойной тектонической обстановке, о чем свидетельствуют выдержанность мощности толщи глин по площади, отсутствие складок подводного оползания и ярко выраженной слоистости, а также сравнительная однородность минерального и гранулометрического состава глин по глубине и площади их развития (Дашко, 2000).

Цвет кембрийских глин сверху голубовато-зеленый, иногда с лиловыми и красными пятнами и разводами, внизу обычно темно-зеленый и серовато-зеленый. Иногда лиловая или малиново-красная окраска у глин проявляется в виде горизонтальных полос, параллельных плоскостям напластования мощностью от нескольких сантиметров до 0,2—0,3 м. В естественных обнажениях эти глины имеют яркий синева-голубоватый оттенок, поэтому их называют синими (Ломтадзе, 1958). Они в основном представляют собой неоднородную по вертикали, тонкослоистую породу, часто с хорошо выраженной ленточной текстурой, проявляющейся в чередовании глинистых и пылеватых слоев мощностью от долей миллиметра до 1—2 мм. Наряду с тонкослоистыми встречаются и более однородные разности с массивной текстурой с развитой в большей или меньшей степени отдельностью по напластованию (Ломтадзе, 1958). Изредка отмечаются однородные неслоистые разности. В синих глинах встречаются прослойки алевролитов и песчаников, которые в общей массе глин распределены неравномерно. На поверхностях напластования синих глин часто наблюдается волнистость — следы деятельности волн и подводного размыва. Поверхность напластования нередко покрыта мелкозернистым,



часто глауконитовым песком. В виде включений в синих глинах встречается пирит в форме отдельных кристаллов, скоплений мелких кристаллов по плоскостям напластования, а также в форме различных сростков. В верхних горизонтах синих глин иногда встречаются кристаллы гипса (Ломтадзе, 1958).

Микротекстура синих глин массивная, переходная к сланцеватым, так как основная глинистая масса породы оптически ориентирована одинаково, структура пелитовая или микролепидобластовая. В естественном залегании они имеют большую влажность и скрытопластичную или тугопластичную консистенцию. При изломе дают неровную занозистую поверхность (Ломтадзе, 1958). В естественных обнажениях вязкие и липкие. При высыхании сильно растрескиваются, образуя обломки и щебенку неправильной остроугольной формы.

Гранулометрический состав синих глин весьма однообразен. Содержание глинистых фракций в синих глинах всегда превышает 30%, а в некоторых случаях достигает почти 60%. Содержание пылеватых фракций изменяется от 40 до 50—54%. Содержание песчаных фракций ничтожно. Следовательно, синие глины по гранулометрическому составу должны быть классифицированы как глины алевролитовые или тяжелые алевролитовые (Ломтадзе, 1958).

В составе синих глин обнаружено 17 минералов. Основную массу породы составляет тонкочешуйчатая серицитоподобная слюда. Встречаются также мусковит (1%), бурые слюды (0,2%), кварц (14,6%) и полевые шпаты (3%). В виде незначительных примесей присутствуют хлорит, глауконит, карбонат, пирит, бурые гидроокислы железа, турмалин, циркон, апатит, амфибол, эпидот и рутил (Ломтадзе, 1958).

Во фракции 0,05—0,01 мм легкие минералы составляют 99,25%, тяжелые 0,75%. В составе легких минералов преобладает кварц, а среди тяжелых — пирит. Минеральный состав тонкодисперсной части синих глин существенно отличен от состава грубодисперсной части. Детальные исследования синих глин из Саблинского месторождения показали, что тонкодисперсная их часть состоит из гидрослюды и монтмориллонита с незначительной примесью кварца. Для верхних горизонтов толщи этих глин характерны гидрослюды, а для более глубоких — монтмориллонит (Ломтадзе, 1958).

Основная породообразующая роль тонкодисперсной части этих глин принадлежит гидрослюдам, но также синие глины имеют примеси минералов монтмориллонитовой группы. Таким образом, синие глины нижнего кембрия можно отнести к типу монтмориллонитово-гидрослюдистых.

Химический состав как синих глин отличается сравнительным постоянством. Это малоглиноземистые глины с избыточным содержанием кремнезема, который представлен главным образом кварцем, составляющим алевритовую часть глин. Коэффициент, выражающий отношение процентного содержания  $\text{SiO}_2$  к  $\text{R}_2\text{O}_3$ , у синих глин изменяется от 2,7 до 3,8, что указывает на преимущественно гидрослюдистый состав кембрийских глин (Ломтадзе, 1958).

Таблица 3

Химический состав синих глин (Ломтадзе, 1958).

Окислы	Химический состав синих глин, взятых из района				
	Пулкова	г. Пушкина	г. Павловска	Саблинского месторождения	р. Нарова
$\text{SiO}_2$	59,45	60,64	61,20	61,87	58,06—60,22
$\text{Al}_2\text{O}_3$	20,55	18,00	22,65	18,35	15,83—16,92
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3,16	4,79	5,02	3,40	7,98—10,86
$\text{FeO}$	2,54	2,61	—	2,69	—
$\text{CaO}$	2,82	0,41	0,82	0,41	0,49—0,99
$\text{MgO}$	1,89	2,52	2,43	2,69	2,46—2,75
$\text{K}_2\text{O}$	2,20	4,18	2,91	5,72	—
$\text{Na}_2\text{O}$	0,64	0,17	—	0,04	—
$\text{SO}_3$	0,60	1,26	—	0,37	—
Потери при прокаливании	5,11	4,84	4,36	4,46	5,83—6,56
$\text{H}_2\text{O}$ гигр.	2,99	3,15	2,78	—	2,28—2,56

Исследование химического состава синих глин в предглинтовой зоне Ленинградской области показали заметное содержание органического вещества 0,55—1,27%, в отдельных точках отмечается повышенное количество органических остатков, достигающих 4—5%. При этом содержание битума может варьировать в пределах 0,5—1% (Ломтадзе, 1958).

Вследствие повышенной уплотненности кембрийские глины имеют сравнительно малую естественную влажность. Среднее значение естественной влажности синих глин равно 16—17% при максимальном 19,8 и 28,0% и минимальном 11,8 и 10,0% (Ломтадзе, 1958).

Среднее значение пористости синих глин 30—33%, а коэффициенты пористости 0,42—0,49. Это указывает не только на повышенную уплотненность, но и достаточную однородность состояния (Ломтадзе, 1958).

Кембрийские глины имеют обычно тугопластичную или полутвердую консистенцию. Они с трудом разминаются и растираются в руках. Естественная влажность глин, как правило, ниже предела пластичности. Глины в тугопластичном

состоянии встречаются редко и главным образом в приповерхностных горизонтах или в увлажненных зонах. Состояние: консистенции также свидетельствует об однородности кембрийских глин (Ломтадзе, 1958).

Синие глины в естественных условиях залегания можно считать породами весьма слабосжимаемыми и обладающими главным образом упругими деформациями. Кембрийские глины залегают на различных глубинах и поэтому имеют различное состояние. Коэффициент сжимаемости глин оказывается равным десяти тысячным долям квадратного сантиметра на килограмм и указывает на достаточно большую уплотненность. Средний модуль деформации синих глин равен всего 276 кг/см при испытании кубиков и 922 кг/см по компрессионным испытаниям. Также синие глины обладают повышенным сопротивлением сдвигу. При насыщении водой сопротивление кембрийских глин сдвигу заметно снижается. При испытании на сдвиг деформации синих глин обычно имеют пластический характер, деформации нередко развиваются быстро при повышенных сдвигающих усилиях, а поверхность «сдвига» имеет неровный раковистый излом (Ломтадзе, 1958).

#### **Четвертичная система (Q)**

Отложения четвертичного периода на рассматриваемой территории представлены сложным комплексом ледниковых, водно-ледниковых, озерных, морских, аллювиальных, эоловых, болотных и техногенных образований различного возраста, от среднечетвертичного до современного.

Непосредственно на участке отбора образцов четвертичные отложения представлены суглинками желтоватой или буровато-серой окраски с большим количеством галек и валунов кристаллических пород. Эти отложения перекрывают нижнекембрийские «синие» глины сиверской свиты чехлом мощностью 5-7 м.

Таким образом, нижнекембрийские синие глины сиверской свиты были выбраны в качестве объекта исследований по следующим признакам: доступность отбора монолита грунта большого размера; сравнительная однородность строения, гранулометрического и минерального состава; высокое содержание глинистых частиц, что обуславливает активное протекание всевозможным электроповерхностных и кинетических явлений в данном грунте.

### 3.2. Описание методики, установки физического моделирования и электрометрического мониторинга

Образец монолита глинистого грунта для физического моделирования был отобран с сошедшего оползня, который находится в районе городского поселения Никольское Ленинградской области. Здесь четвертичные суглинки желтоватой или буровато-серой окраски с большим количеством галек и валунов кристаллических пород смещаются вниз по склону по поверхности контакта с кембрийскими глинами (рис. 9).



Рис. 9. Оползень, с которого отбирались образцы для исследования.

Было отобрано несколько образцов грунта (рис. 10), один для проведения физического моделирования и еще пара образцов меньшего размера для изучения физико-механических свойств грунта. Для сохранения естественной влажности образцы были обернуты несколькими слоями технической стретч-пленки.



Рис. 10. Отбор монолита грунта для исследования.

В лаборатории образец глинистого грунта был подготовлен для проведения эксперимента. Монолит был приведен к форме близкой к параллелепипеду, размером 400x250x250 мм (рис. 11). Излишки грунта так же были использованы в дальнейшем для изучения свойств грунта.



Рис. 11. Подготовка монолита кембрийской глины для проведения физического моделирования.

Далее был произведен сбор установки, моделирующей работу системы электрохимической защиты от коррозии. К боковым противоположным торцам образца были прикреплены электроды для контакта с грунтом, которые, в свою очередь, соединялись с регулируемым источником постоянного тока. В качестве электродов использовались две стальные пластины одинакового размера 210x297 мм. Для внешней электрической цепи, электрод, на который подается минус от источника постоянного тока, обозначался как “катод”, электрод на который подается плюс – “анод”. Общий вид установки приводится на рисунке 12.



Рис. 12. Общий вид установки физического моделирования.

Далее производилась поляризация образца постоянным током величиной 140 мА непрерывно в течение 44 суток.

При таких характеристиках плотность тока была равной  $2,24 \text{ А/м}^2$ . Согласно поляризационным кривым для стали смещение потенциала в таком случае будет равным примерно  $-0,55 \text{ В}$  (рис. 13). Учитывая стандартный электродный потенциал стали ( $-0,55 \text{ В}$ ), измеренный относительно медносульфатного неполяризующегося электрода сравнения, общий поляризационный потенциал будет равен  $-1,1 \text{ В}$ , это означает, что он находится почти на верхней границе интервала значений, установленных в ГОСТ 9.602-2016 (см. главу 1).

Решение повысить значение поляризационного потенциала и держать его у верхней границы, было принято по двум причинам. Первая причина заключается в малой продолжительности эксперимента, поэтому для того, чтобы зафиксировать более существенные изменения свойств исследуемого грунта за такой короткий срок поляризационный потенциал был повышен. Вторая причина связана с очень длительной эксплуатацией многих подземных сооружений, которая приводит к старению и разрушению защитных покрытий. Вследствие этого, подавление электрохимической коррозии требует увеличения величины защитного тока катодной защиты. Для того чтобы смоделировать данную ситуацию поляризационный потенциал был повышен.

Исследование изменения свойств глинистых грунтов под действием электрического поля, потенциал которого равен указанным в ГОСТ 9.602-2016 интервалам значений является предметом дальнейших исследований.

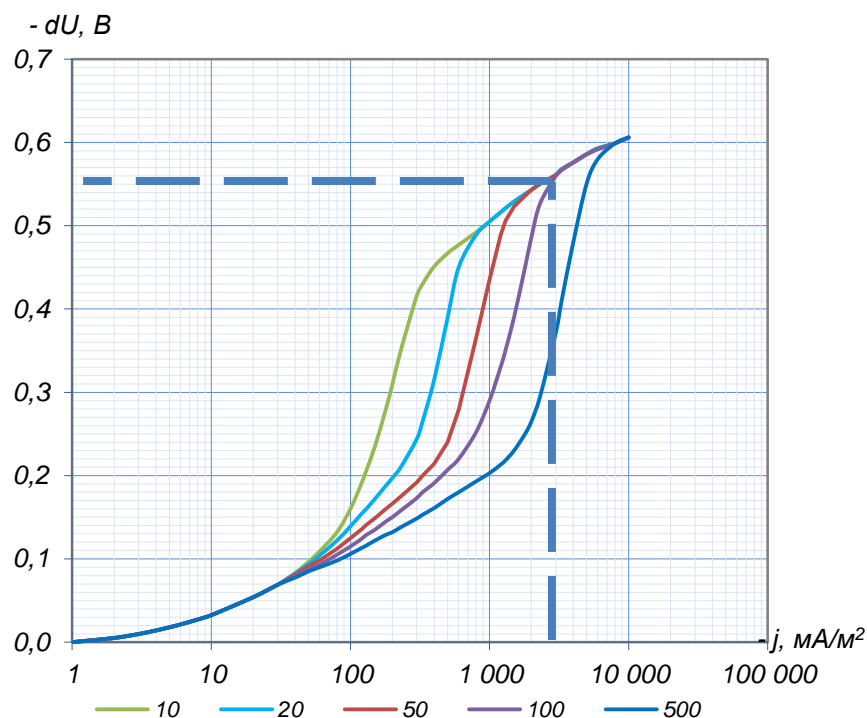


Рис. 13. Катодные поляризационные кривые стали при различном удельном сопротивлении земли  $\rho$ , Ом·м (индекс кривых) (Красноярский, Цикерман, 1968).

После окончания поляризации образец глинистого грунта был вскрыт для изучения физико-механических характеристик. Сразу после вскрытия обнаружались существенные недостатки установки. Во-первых, анодный электрод был частично растворен в следствие вышеописанных процессов (см. главу 1), что могло влиять на плотность тока и создавать неоднородности в поле удельного электрического сопротивления. Также в результате процесса электроосмоса большое количество химически связанной воды перешло в гравитационную. Этой воде не куда было уходить кроме как в нижнюю часть монолита. В результате получился образец с резко неравномерным распределением влажности, что очень сильно могло повлиять на дальнейшее определение физико-механических характеристик грунта. Поэтому было решено повторить эксперимент на идентичном монолите кембрийских глин с некоторыми изменениями в изначальной установке.

Для второй установки физического моделирования (рис. 14) был сделан поддон с водоотводом, в который был помещен образец. За все время поляризации образца, в следствие процесса электроосмоса, из него выделилось 2,2 л воды. Также в качестве анода теперь использовалась не стальная, а графитовая пластина, что предотвращало быстрое растворение электрода.



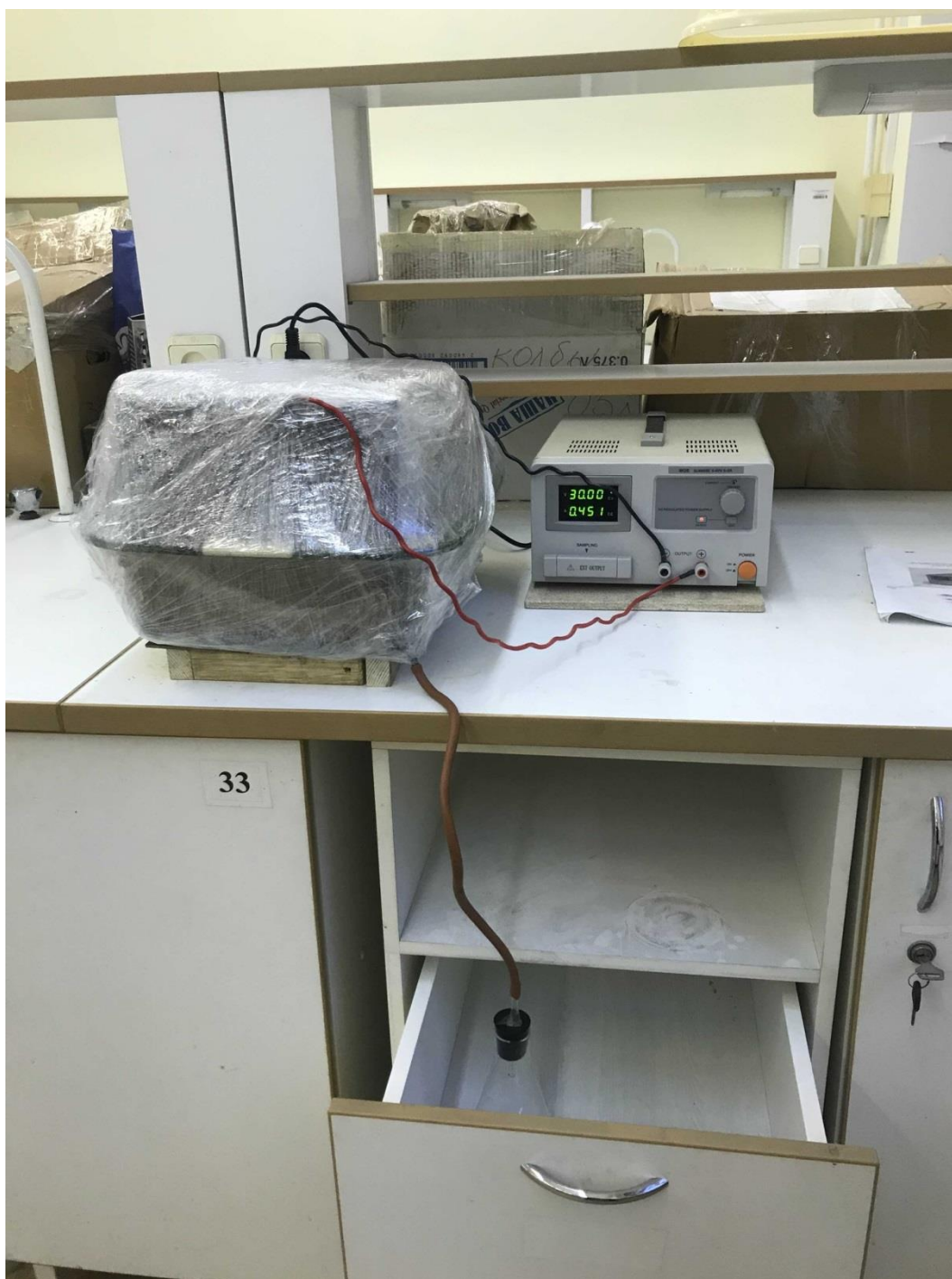


Рис. 14. Вторая установка физического моделирования.

Для контроля изменений электрических свойств образца в процессе эксперимента с периодичностью 1 раз в 10 суток выполнялись мониторинговые электрометрические измерения (рис. 15). Профиль наблюдения длиной 32 см располагался на верхней горизонтальной поверхности образца, пикет 0 профиля находился в 2 см от катодного электрода, пикет 32 в 2 см от анодного электрода. Электрометрические измерения выполнялись вдоль профиля шагом 2 см с помощью четырехэлектродной установки AMNB, располагающейся ортогонально профилю. В каждой точке измерения

выполнялись замеры с тремя разносами питающей линии АВ. Параметры установок:  $MN=2\text{см}$ ,  $AB/2= 5;8;11\text{ см}$ . Измерения проводились с помощью электроразведочной аппаратуры «ЭРА-МАХ» стабилизированным низкочастотным переменным током на частоте 4.88 Гц.



Рис. 15. Электрометрические измерения с помощью электроразведочной аппаратуры «ЭРА-МАХ».

Контакт стальных электродов с образцом осуществлялся через отверстия в защитной пленке. После измерений защитное покрытие восстанавливалось. Источник постоянного тока во время электрометрических исследований отключался. Схема расположения профиля и электроразведочной установки на профиле приводится на рисунке 16.

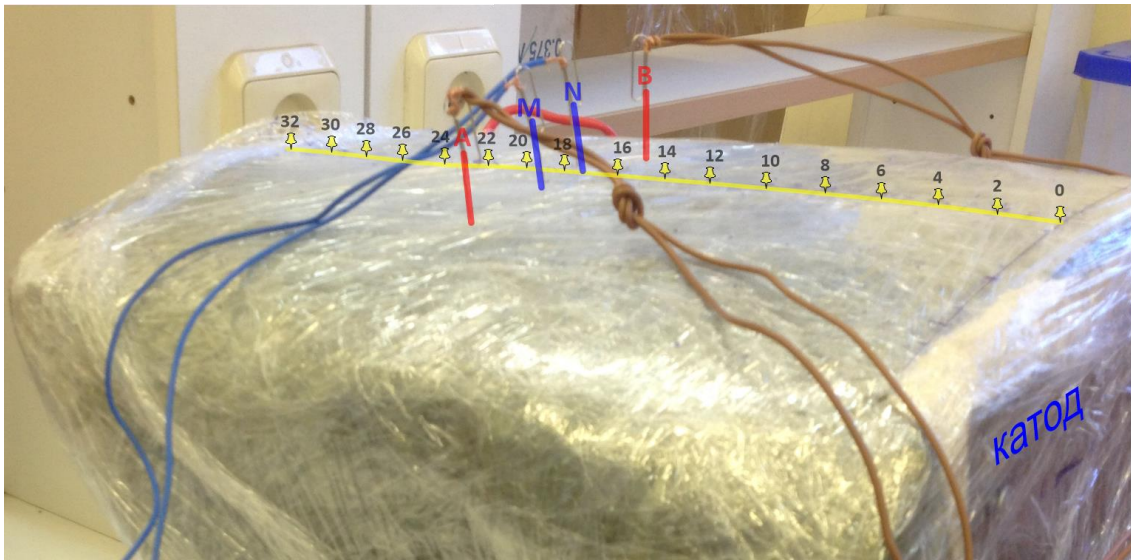


Рис. 16. Схема расположения профиля и электроразведочной установки.

### 3.3. Анализ результатов электрометрического мониторинга

Всего было выполнено 5 циклов измерений, по результатам каждого цикла измерений был получен разрез кажущихся сопротивлений (КС). Разрез КС для цикла I приводится на рисунке 17.

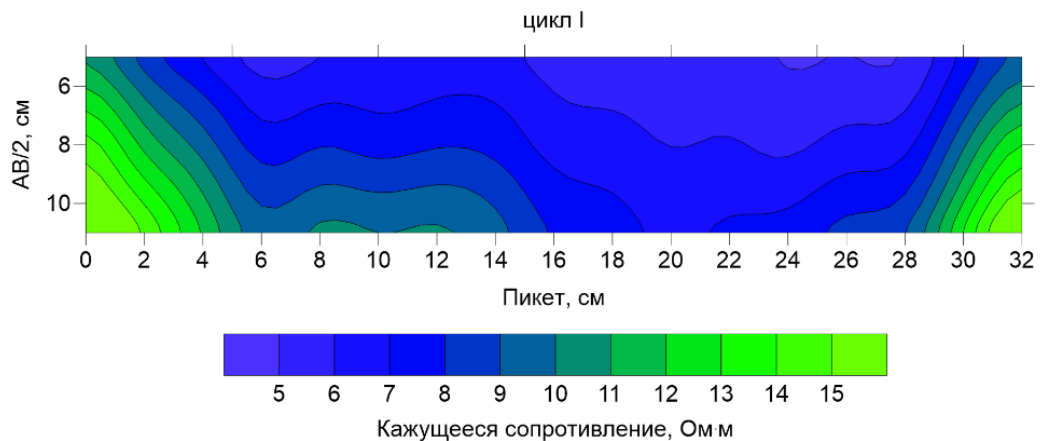


Рис. 17. Разрез кажущегося сопротивления для I цикла измерений (0 суток).

Для выделения процессов, развивающихся во времени, были рассчитаны относительные изменения КС (D) для всех циклов относительно опорного цикла I. Изменения сопротивления D (%) были рассчитаны по формуле:

$$D = \frac{(КС_i - КС_I)}{КС_I} \cdot 100\% \quad (15)$$

где  $КС_I$  – значения кажущегося сопротивления в I цикле;  $КС_i$  – значения в последующих циклах (II, III, IV, V). На рисунке 18 представлены разностные разрезы D для всех циклов относительно опорного цикла I.

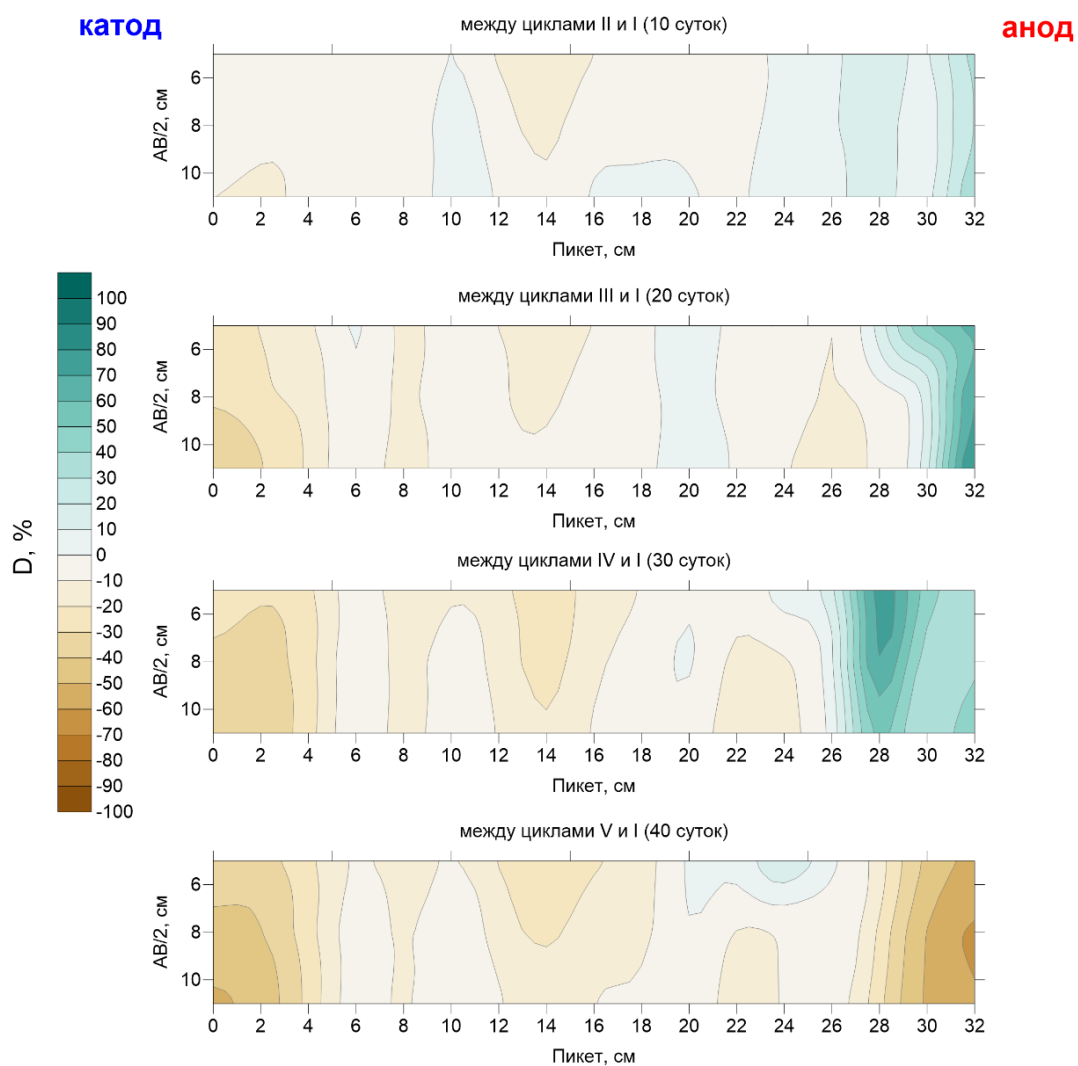


Рис. 18. Изменение кажущегося сопротивления  $D$  в ходе поляризации образца.

Расчет разностных разрезов позволил устранить постоянную составляющую разреза, связанную с геометрией образца при расположении электроразведочной установки в начале и в конце профиля вблизи анода и катода и на максимальных разносах питающих электродов вблизи боковых граней образца. Оставшиеся аномалии на разрезах интерпретировались, как изменения электрического сопротивления разреза во времени в процессе эксперимента.

В средней части профиля отмечается постепенное общее уменьшение КС от I цикла к V циклу, достигающее 20%. Основные изменения касаются локальных областей в области катода и анода. С I цикла до IV цикла наблюдается снижение КС, достигающее 50% на пикетах 0-4 профиля, т.е. на участке, непосредственно примыкающем к катоду. При этом на участке профиля, примыкающем к аноду, наблюдается повышение КС, составляющее выше 60%.

Качественное изменение разреза происходит на V цикле измерений, когда при продолжающемся снижении значений кажущегося сопротивления в области катода происходит резкое снижение КС и в области анода. Визуально это сопровождалось коррозионным разрушением анодного электрода на контакте с образцом, что стало причиной завершения поляризации образца.

Таким образом, физическое моделирование показало, что в результате катодной поляризации наблюдается значительное уменьшение значений удельного электрического сопротивления глинистых грунтов, что увеличивает их коррозионную агрессивность.

#### **3.4. Анализ изменения физического состояния и механических свойств грунта**

Для определения физико-механических свойств были отобраны образцы нарушенного и ненарушенного сложения из исходного грунта и измененного в процессе проведения эксперимента. Монолит грунта, подвергшийся поляризации (рис. 19) был условно разделен на катодную и анодную зоны, которые были отделены для проведения исследований физико-механических свойств (рис. 20). В рамках данной работы исследовался только грунт катодной зоны.



Рис. 19. Монолит кембрийской глины после поляризации постоянным током.



Рис. 20. Подготовка образца для исследований физико-механических.

Были определены следующие характеристики: гранулометрический состав, плотность ( $\rho$ , г/см<sup>3</sup>), влажность ( $W$ , %), плотность твердых частиц грунта ( $\rho_s$ , г/см<sup>3</sup>), плотность сухого грунта ( $\rho_d$ , г/см<sup>3</sup>), пористость ( $n$ , %), коэффициент пористости ( $e$ ), показатели пластичности и консистенции, содержание органического вещества ( $I_r$ , %), угол внутреннего трения ( $\phi$ , °), сцепление ( $C$ , кПа), а также водородный показатель (рН). Результаты исследований представлены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4

Гранулометрический состав грунта

Размер частиц, мм										
Галька, щебень	Гравий, дресва		Песок					Пыль		Глина
	>10	10-5	5-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	
Исходный грунт										
-	-	-	-	0,6	0,6	0,7	2,9	25,1	26,7	43,4
После окончания эксперимента (катодная зона)										
-	-	-	-	2,9	3,0	4,4	4,1	28,7	27,7	29,2

## Физико-механические свойства грунта

Характеристики	Исходный грунт	После эксперимента (катодная зона)
Плотность грунта ( $\rho$ , г/см <sup>3</sup> )	2,10	1,91
Влажность ( $W$ , %)	22	27
Плотность тв. частиц грунта ( $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup> )	2,76	2,77
Плотность сухого грунта ( $\rho_d$ , г/см <sup>3</sup> )	1,72	1,50
Пористость ( $n$ , %)	37,7	45,8
Коэффициент пористости ( $e$ )	0,605	0,847
Водородный показатель (рН)	8	10
Нижний предел пластичности ( $W_p$ , %)	26	32
Верхний предел пластичности ( $W_L$ , %)	47	61
Число пластичности ( $I_p$ )	21	29
Показатель консистенции ( $I_L$ )	-0,19	-0,24
Содержание органического вещества, ( $I_r$ , %)	3,6	4,2
Угол внутреннего трения ( $\varphi$ , °)	8	15
Сцепление ( $C$ , кПа)	52,57	65,53

Анализ результатов показывает, что свойства грунта в катодной зоне существенно изменились.

*Гранулометрический состав* исследуемого грунта был определен ареометрическим и ситовым методами (ГОСТ 12536-2014). Этот показатель претерпел сильные изменения: уменьшилось содержание глинистой фракции на 14,18% (примерно, в 1,5 раза по сравнению с исходным образцом), в то время как содержание песчаной фракции увеличилось на 9,58%, а пылевой, примерно, на 5%. Такие резкие изменения могут быть следствием процесса электрокоагуляции. Электрокоагуляцией называют процесс ускорения коагуляции осадков дисперсных частиц в поле постоянного электрического тока за счет электродных процессов и увеличения при этом в растворе концентрации многовалентных ионов металлов, слагающих электроды и вызывающих эту коагуляцию. Большую роль в этом процессе играет электрофорез, под действием которого усиливается соударение частиц и образование агрегатов (Королев, 2015). В процессе коагуляции выделяют две стадии: сближение первоначально удаленных друг от друга частиц и их взаимодействие (слипание) на малых расстояниях. При наложении внешнего электрического поля обе стадии изменяются: за счет электрофореза частицы сближаются у одного из электродов, что создает условия для протекания второй стадии – их активной коагуляции (Королев, 2015). В результате часть глинистых частиц коагулировала и превратилась в агрегаты большего размера, что отразилось на итоговом гранулометрическом составе грунта.

*Влажность* грунта определялась методом высушивания до постоянной массы (ГОСТ 5180-2015). Она увеличилась с 22 до 27%. Это увеличивает коррозионную активность грунта, так как повышение влажности уменьшает величину удельного электрического сопротивления. Также диффузия ионов  $Fe^{2+}$  от анодных участков металлических сооружений во влажной почве будет происходить более интенсивно, что также активизирует коррозию.

*Плотность* и *пористость* грунта также довольно заметно изменились. Плотность уменьшилась с 2,10 до 1,91 г/см<sup>3</sup>, а пористость возросла с 37,7 до 44,8%. Эти изменения являются результатом процесса электроосмотического увлажнения грунта в катодной зоне, который вызвал структурные преобразования грунта и, как следствие, его разуплотнение (см. главу 2). За счет миграции электроосмотического потока воды формируется более рыхлая микроструктура, появляются более крупные поры (на что также может влиять и электрокоагуляция), занятые водой (Королев, 2015). Такие изменения плотности и пористости влияют на коррозионную агрессивность грунта. Чем меньше плотность сложения и выше пористость, тем сильнее повышается воздухопроницаемость таких грунтов. Повышение воздухопроницаемости обычно ускоряет коррозионный процесс, так как облегчается протекание катодного процесса деполяризации. Также в результате неравномерного проникновения воздуха к различным участкам подземного металлического сооружения возникают гальванические пары (см. главу 1). Плотность грунта определялась методом режущего кольца (ГОСТ 5180-2015).

Увеличение *водородного показателя pH* с 8 до 10 (от слабощелочной к щелочной среде) скорее всего обусловлено катодной реакцией восстановления кислорода с превращением его в ион гидроксидов, носящей название кислородной деполяризации (формула 5) (см. главу 1), а также, в большей степени, диссоциацией молекул воды при катодной поляризации (Антропов, 1984). За счет увеличения концентрации гидроксильных групп наблюдается общее повышение pH.

Согласно диаграмме Пурбе для железа (рис. 21), такое повышение pH сказывается на коррозионной активности грунта.



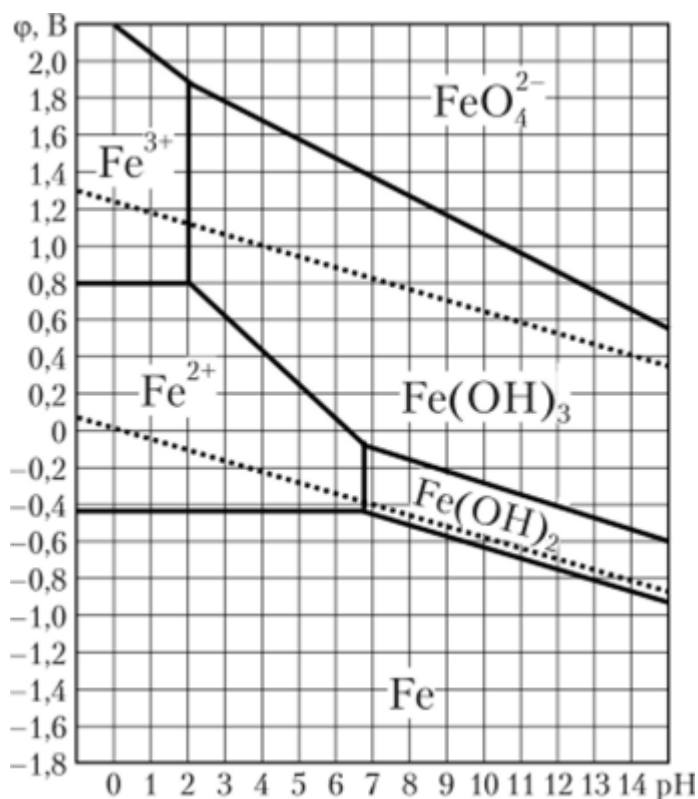


Рис. 21. Диаграмма Пурбе зависимости потенциала  $\phi$  (В) от водородного показателя рН для системы железо-вода.

Для сохранения железа в кристаллической решетке металла и предотвращения его перехода в различные соединения при рН равном 10 нужно приложить больший потенциал, чем при рН равном 8. Поэтому увеличение рН грунта увеличивает его коррозионную активность.

Необходимо отметить, что значения *показателей пластичности* также заметно изменились. Так, влажность нижнего и верхнего пределов пластичности грунта, отобранного из катодной зоны, возросли на 6 и 14% соответственно, а число пластичности – на 8%. Показатели пластичности определялись согласно ГОСТ 5180-2015.

Можно предположить, что на такие серьезные изменения показателей пластичности повлияло изменение *содержания органического вещества* (ГОСТ 23740-2016) в исследуемом грунте с 3,6 до 4,2%, и увеличение рН грунта. Примесь органических веществ оказывает пластифицирующее действие на глинистые грунты, а увеличение щелочности среды повышает емкость катионного обмена, что, в свою очередь, увеличивает толщину гидратных оболочек грунтовых частиц (Лысенко, 1980; Королев, 2015). Более подробное изучение причин изменения показателей пластичности и содержания органического является предметом дальнейших исследований.

*Прочностные свойства* определялись методом одноплоскостного среза (ГОСТ 12248-2010). Анализ результатов изменения прочностных свойств грунта показал увеличение значений угла внутреннего трения с  $8^\circ$  до  $15^\circ$  и увеличение сцепления с 52,57 до 65,53 кПа после поляризации в катодной зоне. Скорее всего, такое значительное увеличение значений угла внутреннего трения связано с увеличением количества песчаной фракции в катодной зоне.

### **Выводы к главе 3**

1. С целью оценки изменения физико-механических свойств дисперсных грунтов под влиянием токов катодной защиты было выполнено физическое моделирование на образце нижнекембрийских «синих» глин. Нижнекембрийские глины были выбраны в качестве объекта исследований из-за доступности для отбора, сравнительной однородности строения, гранулометрического и минерального состава и высокого содержания глинистых частиц;

2. Была проведена поляризация образца постоянным электрическим током в течение 44 суток, которая сопровождалась мониторинговыми измерениями удельного электрического сопротивления грунта. Результаты измерений показали уменьшение удельного электрического сопротивления исследуемого грунта в катодной зоне, что повышает его коррозионную активность;

3. Для определения физико-механических свойств были отобраны образцы нарушенного и ненарушенного сложения из исходного и измененного в процессе проведения эксперимента грунта. Определялись следующие характеристики: гранулометрический состав, плотность, влажность, плотность твердых частиц грунта; плотность сухого грунта, пористость, коэффициент пористости, показатели пластичности и консистенции, содержание органического вещества, угол внутреннего трения, сцепление, а также водородный показатель pH.

4. Анализ результатов показывает, что свойства исследуемого грунта после эксперимента существенно изменились, а изменение таких характеристик как влажность, плотность пористость и водородный показатель pH увеличивает коррозионную активность грунта.

## Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Для подавления процесса подземной электрохимической коррозии используют установки катодной защиты, которые обеспечивают протекание электрического тока в грунте большой плотности.

2. Под действием электрического тока в грунте возникает ряд электроповерхностных процессов и явлений, в т.ч. такие электрокинетические явления как электроосмос и электрофорез, которые обусловлены наличием двойного электрического слоя (ДЭС) на границе раздела твердой и жидкой фаз в глинистом грунте.

3. В результате влияния электрокинетических явлений и обусловленного ими процесса электрокоагуляции происходит изменение структуры и физико-механических свойств глинистых грунтов.

4. С целью оценки изменения физико-механических свойств дисперсных грунтов было выполнено физическое моделирование на образце нижнекембрийских «синих» глин, которое заключалось в поляризации образца постоянным электрическим током, сопровождаемой мониторинговыми измерениями удельного электрического сопротивления грунта.

5. После проведения поляризации свойства исследуемого грунта существенно изменились. Изменение таких характеристик как влажность, удельное электрическое сопротивление, плотность, пористость и водородный показатель рН увеличивает коррозионную агрессивность грунта.

6. Таким образом, долговременное воздействие на грунты постоянного тока, например в процессе работы систем защиты от коррозии, способствует формированию инженерно-геологического элемента техногенно-измененных грунтов, который обладает повышенной коррозионной агрессивностью, и значительно отличается по физико-механическим свойствам от исходных грунтов. Формирование подобных техногенно-измененных грунтов и их свойства необходимо учитывать как при расчете систем защиты от коррозии, так и при оценке инженерно-геологических условий территории.

## Список литературы

1. Антропов Л. И. Теоретическая электрохимия. М.: – Высшая школа, 1984. – 519 с.
2. Бэкман В., Швенк В. Катодная защита от коррозии. Справочник: Пер. с нем. / Под ред. А. В. Стрижевского. – М.: Металлургия, 1984. – 496 с.
3. Геология СССР. Том I. Ленинградская, Псковская и Новгородская области. Геологическое описание. под редакцией А. В. Сидоренко – М. Недра, 1971 г. 504 с.
4. ГОСТ 12248-2010 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
5. ГОСТ 12536-2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.
6. ГОСТ 23740-2016 Грунты. Методы определения содержания органических веществ
7. ГОСТ 5180-2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.
8. ГОСТ 9.005-72 Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Металлы, сплавы, металлические и неметаллические неорганические покрытия. Допустимые и недопустимые контакты с металлами и неметаллами.
9. ГОСТ 9.602.2016 Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии
10. ГОСТ Р 51164-98 Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии
11. Грунтоведение / Трофимов В. Т., Королев В. А., Вознесенский Е. А., Голодковская Г. А., Васильчук Ю. К., Зиангиров Р. С., Под ред. В. Т. Трофимова. – М.: Издательство МГУ, 2005. 1024 с.
12. Дашко, Р.Э. Геотехническая диагностика коренных глин Санкт-Петербургского региона (на примере нижнекембрийской глинистой толщи). / Р. Э. Дашко // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2000. - № 1. - С. 95-100.
13. Дашко, Р.Э. Геотехнические аспекты исследований нижнекембрийских синих глин Санкт-Петербурга как основания сооружений./ Р.Э. Дашко, А.А. Коробко // Жилищное строительство.- 2014. - №9. – С.19-22.
14. Жук Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов. – М.: Металлургия, 1976. – 472 с.
15. Злочевская Р. И., Королев В. А. Электроповерхностные явления в глинистых породах. – М.: Издательство МГУ, 1988. – 177 с.
16. Королёв В. А. Теория электроповерхностных явлений в грунтах и их применение. – М.: Издательство МГУ, 2015. 468 с.

17. Красноярский В. В., Цикерман Л. Я. Коррозия и защита подземных металлических сооружений. – М.: Высшая школа, 1968. 296 с.
18. Кузнецов С.С. О возможной структуре в долине реки Тосна у с. Никольского. - Л.: Вестник ЛГУ, 1974, № 6, вып. 1. - С. 42 - 46.
19. Ломтадзе, В.Д. Физико-механические свойства нижнекембрийских глин Северо-Западной окраины Русской платформы / В.Д. Ломтадзе // Записки Горного Института. – 1958 г., Т. 34, Вып. 2. – С.154-188.
20. Лысенко М. П. Состав и физико-механические свойства грунтов. – М.: Недра, 1980. – 272 с.
21. Подгорный А. А. Защита подземных металлических трубопроводов от коррозии. – К.: Будівельник, 1988. – 176 с.
22. Притула В. В. Подземная коррозия трубопроводов и резервуаров. – М.: Акела, 2003. – 225 с.
23. Улиг Г. Г., Ревы Р. У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику: Пер. с англ. / Под ред. А. М. Сухотина. – Л.: Химия, 1989. – Пер. изд., США, 1985. – 456 с.
24. Яблучанский П. А. Обоснование мероприятий по защите подземных нефтегазопроводов от коррозионного воздействия высоковольтных линий электропередачи переменного тока. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Санкт-Петербург, 2014.
25. Lars Nielsen DGC.FAUGT.10 AC/DC interference corrosion in pipelines. Summary Report, MetriCorr, 25.04.2006. – 46 p.