

УДК 630.383

## ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ЗАКРЕПЛЕНИЯ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЛЕСНЫХ ДОРОГ

<sup>1</sup>Бургутдинов А.М., <sup>2</sup>Бурмистрова О.Н., <sup>2</sup>Тимохова О.М.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Пермский научно-исследовательский политехнический университет», Пермь;

<sup>2</sup>ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет»,  
Ухта, e-mail: chonochka@mail.ru

В статье приведено описание способа электрохимической инъекции математическими моделями, которая принципиально отличается от других методов борьбы с морозобойными трещинами. При данном методе одновременно создается возможность передачи на закрепленный глинистый грунт высокого давления, превышающего на порядок давление, которое воспринимал грунт до закрепления. Сочетание небольшой длины электрода (инъектора) и высокой несущей способности закрепленного грунта, а также устойчивость против морозного выпучивания делают рекомендуемый способ эффективным в сравнении с другими методами борьбы с морозобойными трещинами на автомобильных дорогах. Полученные результаты исследований позволяют рассчитать упрочнение глинистого грунта в основании дороги методом электрохимического закрепления, что в свое время позволит увеличить срок службы дорожных конструкций и устранить образование морозобойных трещин на асфальтобетонных покрытиях лесовозных автомобильных дорог в местах сопряжений насыпей с выемками. Данная методика возможна к применению при разработке рабочих проектов на строительство и ремонт лесовозных автомобильных дорог.

**Ключевые слова:** электрохимическое закрепление, водонасыщенность глинистых грунтов, лесные дороги, электрод-инъектор

## MODEL VALIDATION ELECTROCHEMICAL INDURATION WATER-SATURATED CLAY SUBGRADE SOIL FOREST ROAD

<sup>1</sup>Burgutdinov A.M., <sup>2</sup>Burmistrova O.N., <sup>2</sup>Timokhova O.M.

<sup>1</sup>FGBOU VPO «Perm Research Polytechnic University», Perm;

<sup>2</sup>FGBOU VPO «Ukhta State Technical University», Ukhta, e-mail: chonochka@mail.ru

The article describes a method of electrochemical injection mathematical model that is fundamentally different from other methods of struggle against frost cracks. In this method, at the same time creates the possibility of transferring to the fixed clayey soil high pressure greater than the pressure on the order, which is perceived to secure the ground. The combination of a small electrode length (Injector) and high load-bearing capacity grouting, as well as resistance against frost buckling – the recommended way to do effective in comparison with other methods of struggle against frost cracks on the roads. The results obtained allow us to calculate hardening clay soil at the base of the road by electrochemical fix that in time will increase the life of road constructions and eliminate the formation of frost cracks in the asphalt concrete pavement of logging roads at the junction of embankments with recesses. This technique is possible to use in the development of a working project for the construction and repair of forest roads.

**Keywords:** electrochemical binding, water saturation of clay soil, forest roads, the electrode-injector

При промораживании земляного полотна глинистые грунты приобретают особую криогенную текстуру. Режим промораживания создает наилучшие условия для миграции влаги и дает наибольшее вертикальное пучение, вследствие чего происходит разрушение всей конструкции дорожной одежды и образование морозобойных трещин. Эти же условия позволяют эффективно использовать метод электрохимического закрепления глинистых грунтов в нулевых отметках в период капитального ремонта или реконструкции участка автомобильной дороги.

Задержка фронта промерзания в зонах сопряжений насыпей с выемками (нулевые отметки продольного профиля дороги) дает возможность накопиться миграционной влаге. Слоистая текстура активного слоя грунта выемки наиболее характерна для

низких горизонтов зоны промерзания, где чаще наблюдается задержка фронта замерзания. Исследования показали, что утолщение прослоек льда с глубиной увеличивается после полного замерзания грунта на границе нулевых отметок, что подтверждалось и в лабораторных условиях

Описание способа электрохимической инъекции математическими моделями принципиально отличается от других методов борьбы с морозобойными трещинами. При данном методе одновременно создается возможность передачи на закрепленный глинистый грунт высокого давления, превышающего на порядок давление, которое воспринимал грунт до закрепления. Сочетание небольшой длины электрода (инъектора) и высокой несущей способности закрепленного грунта, а также устойчивость

против морозного выпучивания делают рекомендуемый способ эффективным в сравнении с другими методами борьбы с морозобойными трещинами на автомобильных дорогах.

Под воздействием постоянного электрического тока в глинистом грунте происходит перераспределение поровой воды, причём у анода возникает зона уплотнения грунта, граница которого по мере развития процесса передвигается в сторону катода (рис. 1).

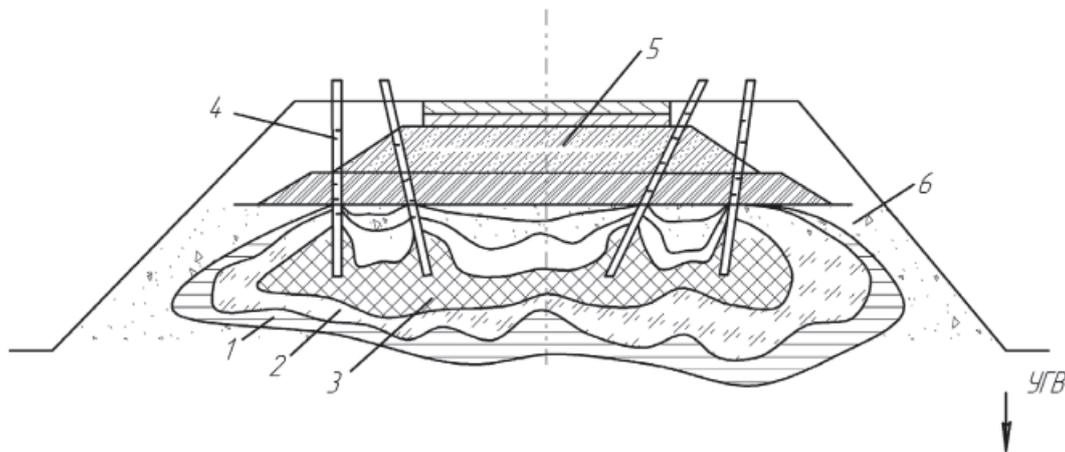


Рис. 1. Использование метода электрохимического закрепления водонасыщенного глинистого грунта в основании дорожной конструкции: 1–3 – зоны упрочнения; 4 – электроды; 5 – дорожная одежда; 6 – земляное полотно

Дифференциальные уравнения, описывающие этот процесс, можно составить исходя из следующих ограничений: источники и стоки внутри грунтовой массы отсутствуют.

Изменение количества влаги в элементе объёма  $dV$  за время  $dt$  можно записать в виде [1, 2, 3]

$$c \cdot \gamma_v \cdot \frac{\partial W}{\partial t} \cdot dV \cdot dt, \quad (1)$$

где  $c$  – удельная влагёмкость среды;  $\gamma_v$  – объёмный вес воды.

С другой стороны, для количества влаги, уходящей (приходящей) в единицу времени из объёма  $dV$  через элемент поверхности  $df$  этого объёма, можно написать уравнение, связывающее интеграл по замкнутому контуру с зависимостью Гаусса – Остроградского:

$$-K \cdot \text{div}(\text{grad} \cdot W) \cdot dV = -K \cdot \nabla^2 \cdot W \cdot dV \cdot df, \quad (2)$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от природы и физического состояния среды.

Из (1) и (2) получим уравнение

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{K}{\gamma_v \cdot c} \cdot \nabla^2 \cdot W. \quad (3)$$

Обозначим

$$\frac{K}{\gamma_v \cdot c} = \alpha.$$

Тогда (3) запишется в виде

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \alpha \cdot \nabla^2 \cdot W. \quad (4)$$

Полученное уравнение (4) совпадает с уравнением теплопроводности (1).

В нашем случае уравнение (4) может быть записано для двух зон: упрочнения ( $0 \leq x \leq \eta$ ); неупрочнения ( $\eta \leq x < \infty$ ).

$$(x < \eta), \quad \frac{\partial W_1}{\partial t} = \alpha_1 \cdot \frac{\partial^2 \cdot W_1}{\partial \cdot x^2}; \quad (5)$$

$$(x > \eta), \quad \frac{\partial W_2}{\partial t} = \alpha_2 \cdot \frac{\partial^2 \cdot W_2}{\partial \cdot x^2}, \quad (6)$$

где  $x$  – ордината, отсчитываемая от анода;  $\eta$  – переменный отрезок на оси  $x$  (от анода до границы упрочнения);  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты влагопроводности (получены для наших условий расчётом),  $\alpha_1 = 2,95 \cdot 10^{-4}$ ;  $\alpha_2 = 21,2 \cdot 10^{-5}$ .

Полученные результаты математически позволяют рассчитать упрочнение глинистого грунта в основании дороги методом электрохимического закрепления, что позволит увеличить срок службы дорожных конструкций и устранить образование морозобойных трещин на асфальтобетонных покрытиях лесовозных автомобильных дорог в местах сопряжений насыпей с выемками.

Данная методика возможна к применению при разработке рабочих проектов на строительство и ремонт лесовозных автомобильных дорог.

Результаты исследований показывают, что силы морозного пучения, возникающие в грунте земляного полотна дорог в осенне-зимний и зимне-весенний периоды, возможно устранить методом электрохимической обработки.

Долговечность предложенного электрохимического метода обработки глинистого грунта мы проверяли многократным замораживанием и оттаиванием глинистого грунта. Было произведено 10 циклов замораживания и оттаивания обработанного грунта и было замечено, что исследуемый грунт не изменил приобретенных при электрохимической обработке свойств.

Определение характеристик исследуемого грунта с автомобильных дорог в естественных условиях (декабрь) показало, что

– влажность составила

$$W = 100 (0,066 - 0,06) / (0,06 - 0,028) = 18,75 \%;$$

– граница текучести

$$W_T = 100 (0,044 - 0,042) / (0,042 - 0,02) = 9,09 \%;$$

– граница раскатывания

$$W_p = 100 (0,042 - 0,04) / (0,04 - 0,022) = 11,1 \%.$$

После электрохимического закрепления 20% раствором  $MgSO_4$  были получены следующие значения: влажность – 12,5%; граница текучести – 28,5%; граница раскатывания – 14,3%.

Через 45 суток получили следующие данные: влажность составила 12,5%; граница текучести – 33,3%; граница раскатывания – 14,3%.

Полученные результаты отражают традиционную картину морозного пучения, которое происходит в теле земляного полотна, что в дальнейшем вызывает появление морозобойных трещин на асфальтобетонном покрытии дороги на участках сопряжений насыпей с выемками.

В качестве глинистого материала использовалась глина темно-коричневая, туго-мягкопластичной консистенции. Были получены данные о свойствах исходного грунта.

По завершении исследований были получены данные по физическим и химическим свойствам обработанного глинистого грунта. Ввиду того, что анализ полученных зависимостей в лабораторных и полевых условиях даже с учетом сделанных допуще-

ний затруднен, был использован численный метод моделирования на ЭВМ. Ниже проведены расчеты электроосмотических фильтрационных полей с помощью программ раздела PDE – библиотеки MATLAB, реализующих метод конечных элементов для анализа электростатических полей. Была рассмотрена стационарная плоская задача расчета электрического поля пары электродов-инъекторов, установленных в однородном полупространстве (граница сред соответствовала  $Z = z_0$ ).

Обработка результатов расчетов состояла в построении графиков изменения относительной скорости фильтрации  $V/k_3$  в различных направлениях. Для оценки неравномерности электроосмотической фильтрации, обусловленной неоднородностью электрического поля, создаваемого электродами-инъекторами, были построены графики изменения параметра  $V/k_3$  на различных расстояниях от основного электрода в горизонтальных, продольных и поперечных вертикальных плоскостях.

В качестве интегральной характеристики неравномерности фильтрации предложено использовать коэффициент

$$K_H = \frac{(V/k_3)_{\max}}{(V/k_3)_{\min}}, \quad (7)$$

где  $(V/k_3)_{\max}$ ,  $(V/k_3)_{\min}$  – соответственно максимальное и минимальное значения относительной скорости фильтрации в соответствующем направлении в пределах зоны обработки.

В первые часы проведения опыта наблюдается снижение насыпной плотности грунта в насыпи. Это можно объяснить тем, что идет процесс разрушения естественной структуры грунта за счет осмотического движения воды, при этом возрастает пористость грунта, что и вызывает снижение насыпной плотности. Известно, что ионы железа Fe (II) обладают коагулирующей способностью, что в данном случае способствует структуризации грунта и, как следствие, увеличению насыпной плотности грунта.

Через 6–8 часов происходит снижение значений насыпной плотности, что можно объяснить торможением процессов окисления анода в результате образования на его поверхности оксидной или гидроксидной пленки. Наибольшее уплотнение грунта наблюдается в средней зоне. Оно достигается как за счет осмотического движения воды, так и за счет проникновения ионов магния (II) и железа (II), химически скрепляющих грунт. Подтверждением описанных процессов являются результаты изменения

насыпной плотности обработанного грунта (рис. 2).

В тесной связи с насыпной плотностью находится такой показатель, как гигроскопичная влажность грунта. При этом при уменьшении плотности увеличивается влажность за счет накопления воды в порах агрегатов грунта. Кроме того, происходит связывание грунта в сольватных оболочках коллоидных частиц, которые образуются при электролитическом растворении железного анода и ряда других реакций.

Уплотнение при введении сульфата магния наблюдалось в большей степени, чем при введении хлорида кальция. При этом при более длительном протекании тока плотность грунта будет увеличиваться постепенно по всему объему (рис. 3).

Введение сульфата магния понизило гигроскопичную влажность грунта, в то время как введение хлорида кальция, наоборот, увеличило её (рис. 3). Такой феномен можно также объяснить тем, что коррозионное

действие сульфат-иона выражено в значительно меньшей степени, чем у хлорид-иона. При длительном пропускании тока величина гигроскопичной влажности грунта уменьшится вместе с уменьшением пористости грунта.

При уменьшении гигроскопичной влажности уменьшается набухаемость грунта, но возрастет коэффициент фильтрации. Это положительно отразится на устойчивости глинистого грунта к морозобойному раскрекиванию.

При пропускании постоянного тока увеличивается количество воды в катодном пространстве и уменьшается ее объем в анодном. Наибольшим электроосмотическим эффектом обладает напряжение 100 В, при этом максимальное выделение воды наблюдалось при протекании тока в течение 5 ч. Возможно, снижение количества выделяемой воды обусловлено тем, что при протекании тока более 5 ч выделяющиеся на аноде ионы железа связывают часть воды.

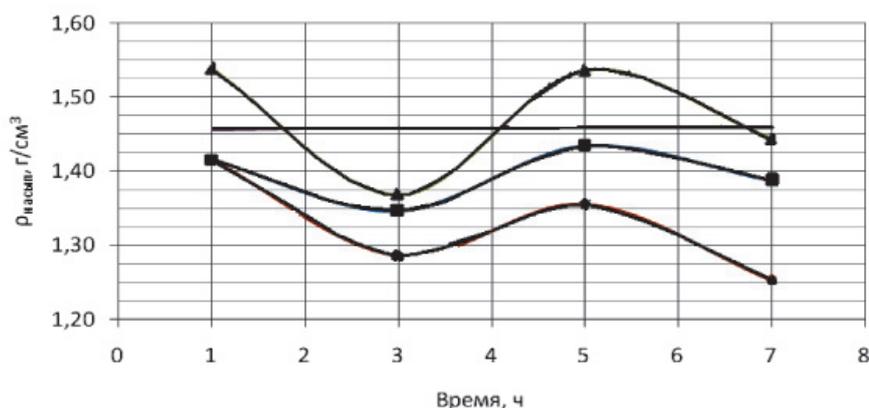


Рис. 2. Изменение насыпной плотности обработанного при  $U = 100$  В грунта во времени [28]:

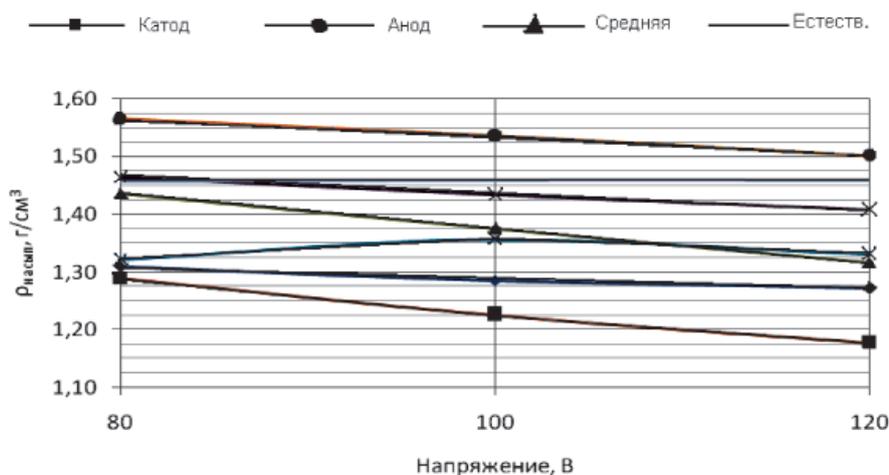


Рис. 3. Изменение насыпной плотности обработанного грунта через 5 часов в зависимости от напряжения и реагента:

—●— KCa —■— A Ca —▲— C Ca —×— K Mg —\*— A Mg —◆— C Mg — Естествен.

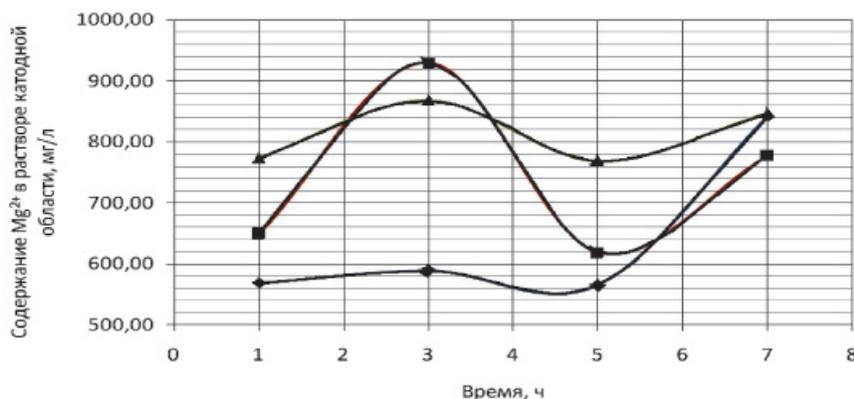
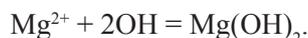


Рис. 4. Изменение содержания Mg<sup>2+</sup> в растворе катодной области во времени:

◆ 80В ■ 100В ▲ 120В

При осмотическом движении воды происходит перенос ионов магния вместе с потоком жидкости через слой грунта. Поэтому в растворе катодного пространства постепенно происходит накопление ионов магния (рис. 4). При этом при 5-часовом опыте содержание ионов магния несколько понизилось.

Объяснить подобное явление можно тем, что ионы магния вступают в химические реакции и задерживаются в грунте или переходят в нерастворимое состояние при взаимодействии с выделяющимися на катоде при электролизе воды ионами OH<sup>-</sup>:



По эффективности закрепления водонасыщенных глинистых грунтов введение иона магния не уступает введению иона кальция, а в чем-то даже превосходит. Но сульфат-ионы, содержащиеся в составе магниевых агента, в значительно меньшей степени обладают коррозионным действием на материал анода, чем хлорид-ионы. Тем не менее сульфат-ион сам может служить связующим агентом для кальция или тяжелых металлов, содержащихся в грунте. При правильном подборе условий проведения закрепления грунта сульфат магния можно будет использовать в качестве закрепляющего агента как альтернативу хлориду кальция, который нашёл применение в дорожном строительстве.

#### Список литературы

1. Бурмистрова О.Н. Анализ существующего состояния вопросов планирования ремонтных работ и управления качеством дорожных покрытий // Вестник Московского государственного университета леса. Лесной вестник. Препринт № 145, научно-информационный журнал. – Мытищи, МГУЛ, 2006. – С. 2–5.
2. Быков Н.И. Вечная мерзлота и строительство на ней / Н.И. Быков, П.Н. Каптерев. – М.: Трансжелдориздат, 1940.
3. Вайнштейн В.М. Метод определения деформации асфальтобетонных образцов при повышенных температурах покрытия и установления времени прогноза образования колеи / В.М. Вайнштейн, Е.В. Ванштейн // Актуальные

проблемы строительного и дорожного комплексов – 2007: межвуз. сб. науч. статей. – Йошкар-Ола: Изд-во МарГТУ, 2008. – С. 209–212.

4. Жинкин Г.Н. Электрохимическая обработка глинистых грунтов в основаниях сооружений / Г.Н. Жинкин, В.Ф. Калганов. – М.: Стройиздат, 1980. – 164 с.
5. Соколов В.Е. Химическое закрепление грунтов / В.Е. Соколов. – М.: Стройиздат, 1980. – 195 с.
6. Юшков Б.С. Повышение прочности и работоспособности конструкций дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог: монография / Б.С. Юшков, А.М. Бургонудинов, О.Н. Бурмистрова. – Ухта: УГТУ, 2011. – 173 с.: ил.

#### References

1. Burmistrova O.N. Analiz sushhestvujushhego sostojanija voprosov planirovanija remonnyh rabot i upravlenija kachestvom dorozhnyh pokrytij // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa. Lesnoj vestnik. Preprint no. 145, nauchno-informacionnyj zhurnal. Mytishhi, MGUL, 2006. pp. 2–5.
2. Bykov N.I. Vechnaja merzlota i stroitelstvo na nej / N.I. Bykov, P.N. Kapterev. M.: Transzheldorizdat, 1940.
3. Vajnshtejn V.M. Metod opredelenija deformacii asfaltobetonnih obrazcov pri povyshennyh temperaturah pokrytija i ustanovlenija vremeni prognoza obrazovanija kolei / V.M. Vajnshtejn, E.V. Vanshtejn // Aktualnye problemy stroitel'nogo i dorozhnogo kompleksov 2007: mezhd. sb. nauch. statej. Jshkar-Ola: Izd-vo MarGTU, 2008. pp. 209–212.
4. Zhinkin G.N. Jelektrohimičeskaja obrabotka glinistyh gruntov v osnovanijah sooruzhenij / G.N. Zhinkin, V.F. Kalganov. M.: Strojizdat, 1980. 164 p.
5. Sokolov V.E. Himičeskoe zakreplenie gruntov / V.E. Sokolov. M.: Strojizdat, 1980. 195 p.
6. Jushkov B.S. Povyshenie prochnosti i rabotosposobnosti konstrukcij dorozhnyh odezhd lesovoznyh avtomobilnyh dorog: monografija / B.S. Jushkov, A.M. Burgonudinov, O.N. Burmistrova. Uhta: UGTU, 2011. 173 p.: il.

#### Рецензенты:

Сушков С.И., д.т.н., профессор кафедры технологии и машин лесозаготовок, ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта;

Павлов А.И., д.т.н., профессор кафедры лесных, деревообрабатывающих машин и материаловедения, ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта.

Работа поступила в редакцию 18.03.2015.