

УДК 624.138.232

С. А. Чудинов

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТОГРУНТОВ

*Рассмотрены основные технологические факторы, влияющие на качество и срок службы дорожных одежд из укрепленных грунтов. Приведены результаты и анализ исследований влияния технологических факторов на прочность глинистого грунта, укрепленного портландцементом с добавкой полиэлектrolита.*

**Ключевые слова:** цементогрунт, укрепленный грунт, полиэлектrolит, комплексное вяжущее, технологические факторы.

**Введение.** Проблема повышения объемов и качества строительства автомобильных дорог всегда была актуальной для России. В настоящее время эта задача стоит особенно остро в связи с резким сокращением финансирования дорожной отрасли. В данных условиях приоритетными являются такие методы строительства, которые могут не только снизить затраты на строительство и содержание дорог, но и обеспечить дорожному полотну повышенное качество и долговечность. Одним из таких методов является использование имеющихся грунтов в качестве строительных материалов путем их укрепления.

Традиционным и одним из самых распространенных видов минеральных вяжущих, используемых для укрепления грунтов, является портландцемент. «Именно в цементе заложены те потенциальные вяжущие свойства, при максимальной реализации которых обеспечивается коренное изменение первоначальных свойств, присущих грунту, с приданием ему новых качеств: постоянной и необратимой прочности, связности (монолитности), морозостойкости и др.» [1]. Однако при укреплении глинистых грунтов важно их всегда рассматривать как весьма активную среду, а не инертный заполнитель, существенно влияющую на процессы гидролиза и твердения портландцемента и вступающую в химическое и физико-химическое взаимодействие с продуктами гидратации. Данные реакции связаны в первую очередь с активными сорбционными и ионообменными процессами на поверхности глинистых частиц, способных существенно снижать эффективность минерального вяжущего и ограничивать области его применения [2].

**Цель работы:** установление условий эффективного применения портландцемента и формирования и твердения кристаллизационной структуры укрепленного грунта.

**Пути решения поставленной задачи:** желаемый эффект может достигаться введением в цементогрунтовую смесь активных добавок: гашеной и молотой негашеной извести, хлористого кальция, силиката натрия, сернокислого магния, каустической соды, хлорного железа, золы уноса, жидкого битума, органических поверхностно-активных веществ и т. д. Однако использовать многие вещества нецелесообразно в силу их высокой стоимости или технологических особенностей.

Для решения вышеуказанных проблем при изучении состава и свойств различных продуктов химической промышленности как потенциальных активных добавок при укреплении глинистых грунтов портландцементом наше внимание было остановлено на полиэлектrolите, получаемом из отходов химической промышленности. Данный поли-

электролит – это высокомолекулярный сильноосновной катионный полимер линейно-циклической структуры. При введении в глинистый грунт раствора этого вещества происходит его диссоциация с образованием сложного полимерного органического катиона, который активно взаимодействует с ацидоидами глинистого грунта. Действие полиэлектролита направлено на изменение электрических свойств глинистых коллоидов и обусловлено их нейтрализацией с уменьшением общего  $\zeta$  – потенциала, а также одновременным сжатием двойного диффузного слоя. В результате происходит сокращение или даже полное исчезновение слоя сорбционной воды вокруг глинистых коллоидов, снижается емкость обменного поглощения и становится дисперсной, однородной и гомогенной структура глинистого грунта. На основании проведенных автором теоретических и лабораторных исследований было доказано, что данные процессы способствуют значительному повышению морозостойкости, прочностных и деформационных показателей цементогрунта.

Однако, как показывает анализ [3], влияние на качество и срок службы дорожных одежд факторов различного характера (конструктивного, технологического, эксплуатационного) по величине сопоставимо друг с другом. Поэтому исходное состояние укрепленного грунта определяется не только составом компонентов вяжущего, но и способом и технологией укрепления. На основании проведенного анализа были выявлены основные технологические факторы: исходная влажность укрепляемого грунта, длительность технологического разрыва между перемешиванием цементогрунтовой смеси и уплотнением, очередности введения вяжущих материалов и степени уплотнения цементогрунта. Исследование влияния указанных технологических факторов на прочность глинистого грунта, укрепленного портландцементом с добавкой полиэлектролита, и послужило целью данной работы.

Известно, что эффективность укрепления грунтов в первую очередь зависит от правильного увлажнения смеси. Оптимальная влажность цементогрунта при уплотнении позволяет достигнуть максимальной плотности при относительной малой затрате энергии, а также наиболее благоприятные условия для последующего взаимодействия с грунтом продуктов гидратации и гидролиза портландцемента.

**Методика исследований, проведение опытов и их результаты.** Учитывая существенное влияние влажности цементогрунтовой смеси на прочность получаемого материала, с целью установления зависимости предела прочности при сжатии цементогрунта от исходной влажности смеси были проведены лабораторные испытания образцов из тяжелого суглинка (число пластичности  $I_p = 14$ ). Образцы укреплялись 6% портландцемента с добавкой 0,3% полиэлектролита от массы грунта и испытывались в возрасте семи суток твердения в водонасыщенном состоянии по стандартной методике ГОСТ 10180. Контрольные образцы укреплялись одним цементом с той же дозировкой. Оптимальная влажность укрепляемого грунта составила 18%, влажность смеси изменялась от 16 до 26% от массы сухого грунта. Результаты исследований представлены на рис. 1.

Из представленных данных видно, что исходная влажность при укреплении глинистых грунтов играет существенную роль. При комплексном укреплении портландцементом с добавкой полиэлектролита оптимальное количество влаги колеблется в пределах 18–22% от массы сухого грунта, а при укреплении одним минеральным вяжущим оптимальный диапазон сокращается до 18–20%.

Исследование показало, что недостаток влаги в большей степени снижает предел прочности при сжатии водонасыщенных образцов, чем ее избыточность. Например, у образцов, укрепленных портландцементом с добавкой полиэлектролита, уменьшение

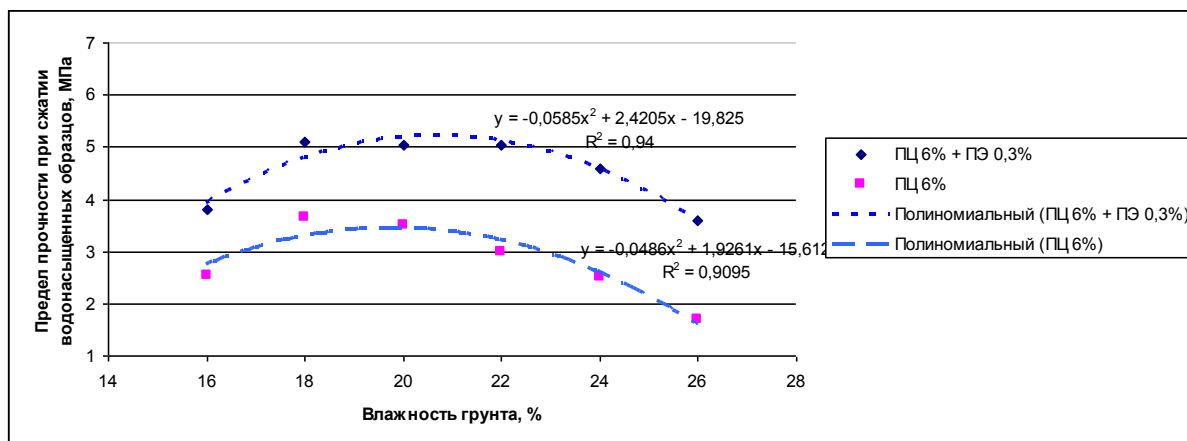


Рис. 1. Изменение предела прочности при сжатии цементогрунта в зависимости от влажности укрепляемого грунта

влажности на 11% от оптимальной приводит к снижению предела прочности при сжатии на 25%. Примерно такое же понижение прочности наблюдается при увеличении исходной влажности грунта на 44%. Данный эффект доказывает активное действие добавки полиэлектролита по освобождению слоя сорбционной воды вокруг глинистых коллоидов, в результате чего при уплотнении излишняя влага способна отжиматься из цементогрунта, обеспечивая максимальную плотность материала. Это имеет большое практическое значение в строительстве лесовозных автомобильных дорог из укрепленных грунтов, где преобладают переувлажненные грунты.

Как известно, сразу после перемешивания и увлажнения цементогрунтовой смеси в течение короткого времени (1–2 часа) в ней преобладает коагуляционная структура, самовосстанавливающаяся после механического разрушения [4]. В этот период цементогрунтовая смесь наиболее пластична, удобоукладываема и способна к наибольшему уплотнению. Увеличение времени между увлажнением и уплотнением смесей приводит к снижению пластичности, плохой уплотняемости и в конечном итоге к пониженной прочности цементогрунта.

Учитывая важность вышеизложенного, нами было изучено влияние активной добавки – полиэлектролита на допустимый технологический разрыв во времени между окончательным перемешиванием цементогрунтовой смеси и ее уплотнением. При исследованиях тяжелый суглинок (число пластичности  $I_p = 14$ ) укреплялся 6% портландцемента с добавкой 0,3% полиэлектролита от массы грунта. Контрольные образцы укреплялись одним портландцементом с той же дозировкой. Приготовленные цементогрунтовые смеси выдерживались определенный промежуток времени (от 0 до 6 часов), а затем из них изготавливались образцы – цилиндры  $50 \times 50$  мм.

На рис. 2 по ординате отложены отношения показателей прочности, полученных при различной продолжительности технологического процесса к пределам прочности водонасыщенных образцов, изготовленных сразу после приготовления смеси.

Полученные данные свидетельствуют, что введение полиэлектролита позволяет существенно увеличивать допустимое время выдержки смеси между перемешиванием и ее уплотнением. Например, уплотнение грунтовой смеси, укрепленной одним портландцементом, через два часа приводит к снижению прочности на 20%, такая же потеря прочности достигается при выдержке перед уплотнением грунтовой смеси, укрепленной портландцементом с добавкой полиэлектролита в течение четырех часов.

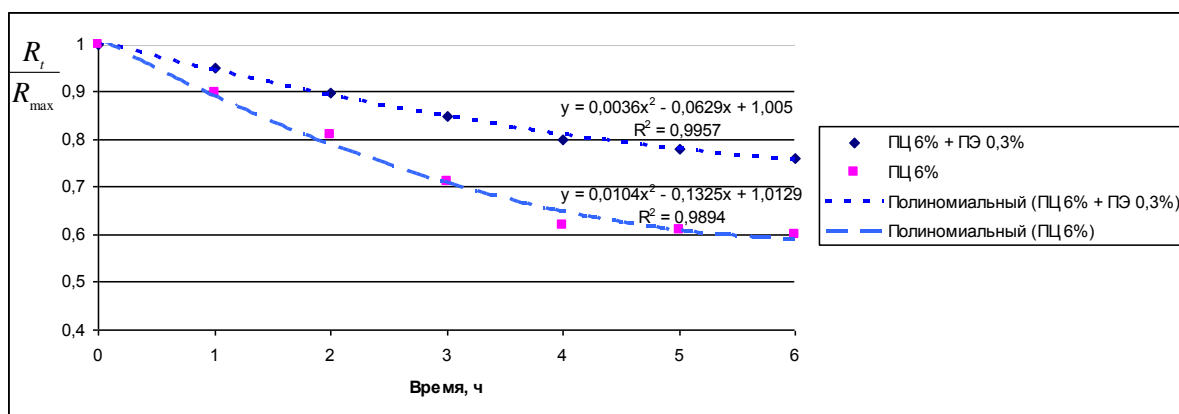


Рис. 2. Влияние длительности технологического процесса на прочность цементогрунтов

Данный эффект доказывает активное влияние полиэлектролита на структуру и свойства грунтовой воды в целом. Это влияние обусловлено взаимодействием электромагнитных полей катионов полиэлектролита и окружающих их диполей и изменением вследствие этого условий трансляционного движения последних вблизи катионов [5]. При положительной гидратации вблизи катиона упорядочиваются диполи воды, они становятся менее подвижными и активными, что оказывает замедляющее действие на процесс схватывания портландцемента.

Существенное увеличение длительности допустимого технологического разрыва между перемешиванием смеси и ее уплотнением в условиях строительства лесовозных дорог имеет большое значение, так как позволит получить цементогрунт с более высокой прочностью, водо- и морозостойкостью при использовании простейших машин для приготовления цементогрунтовых смесей на дороге (дорожных фрез) и обычной недостаточно четкой работе потока машин при малых объемах дорожно-строительных работ.

При комплексном укреплении грунтов очередность внесения вяжущих материалов может оказывать существенное влияние на прочность укрепленного грунта [1]. Для оценки влияния этого фактора на глинистый грунт, укрепленный портландцементом с добавкой полиэлектролита, нами были проведены соответствующие эксперименты.

Тяжелый суглинок (число пластичности  $I_p = 14$ ) укреплялся 6% портландцемента с добавкой 0,3% полиэлектролита от массы грунта. Смеси приготавливались в следующем порядке:

– в навеску грунта вводилось оптимальное количество воды, смесь тщательно перемешивалась;

– затем вводилось вяжущее по следующим вариантам:

1) вводился портландцемент и перемешивался с увлажненным грунтом. Затем смесь выдерживалась определенное количество часов (от 0 до 3 часов), после чего вводился раствор полиэлектролита в количестве 2% от массы грунта, и смесь снова тщательно перемешивалась;

2) сначала вводился раствор полиэлектролита в количестве 2% от массы грунта и перемешивался с подготовленным грунтом. Затем смесь выдерживалась от 0 до 5 часов, после чего вводился портландцемент и тщательно перемешивался. Результаты исследований представлены в табл.

**Влияние очередности введения вяжущих материалов  
на прочность цементогрунта**

№ п/п	Последовательность внесения вяжущих материалов в грунт				Выдержка смеси перед внесением последнего компонента, ч	$R_{сж}$ , МПа
1 вариант						
1	грунт +	вода +	цемент +	полиэлект-ролит	0	5,1
2	-//-	-//-	-//-	-//-	1	5,6
3	-//-	-//-	-//-	-//-	2	5,0
4	-//-	-//-	-//-	-//-	3	4,1
2 вариант						
5	грунт +	вода +	полиэлект-ролит +	цемент	0	5,4
6	-//-	-//-	-//-	-//-	1	5,9
7	-//-	-//-	-//-	-//-	3	5,8
8	-//-	-//-	-//-	-//-	5	5,8

Как видно из опытных данных, очередность введения вяжущих материалов, при различном времени выдержки между их введением, оказывает существенное влияние на предел прочности при сжатии ( $R_{сж}$ ) водонасыщенных образцов. При этом видно, что после введения портландцемента необходимо в конце первого часа вводить в цементогрунтовую смесь добавку полиэлектролита, так как дальнейшее увеличение технологического разрыва между введением компонентов приводит к снижению  $R_{сж}$ . Это объясняется тем, что в цементогрунтовой смеси после одного часа начинаются процессы кристаллообразования и введение в этот момент полиэлектролита приводит к нарушению структуры цементогрунта, а значит к снижению его прочности. Наличие оптимума в варианте 1 объясняется тем, что в первый час после введения портландцемента происходит слабая гидратация частиц цемента, что приводит к образованию ионов кальция, которые взаимодействуют с глинистыми агрегатами и частицами. Тем самым повышается водостойкость и прочность последних. Однако в дальнейшем (после одного часа) процесс гидратации портландцемента активизируется, что ведет к более интенсивному взаимодействию катионов кальция с грунтом. При этом происходит обеднение раствора ионами кальция, что ведет к образованию менее прочной структуры цементогрунта. Введение полиэлектролита в конце первого часа позволяет нейтрализовать поверхностный заряд глинистых частиц и тем самым прекратить все ионообменные процессы, в том числе и взаимодействие катионов кальция с грунтом, что создает благоприятные условия для процессов структурообразования цементогрунта. Лучшие результаты были получены в варианте 2 при введении портландцемента в смесь из грунта и полиэлектролита после выдерживания последней в течение одного часа. Увеличение времени выдержки смеси до пяти часов не привело к значимым изменениям  $R_{сж}$ . Данный факт объясняется активным структурирующим действием полиэлектролита при его введении в глинистый грунт. При этом грунт становится более дисперсным, что способствует равномерному распределению в его объеме портландцемента. Кроме того, все реакции по изменению электрических свойств глинистых коллоидов носят необратимый характер и не зависят от продолжительности технологических операций.

Для исследования влияния активной добавки полиэлектролита на плотность цементогрунта изготавливались смеси из тяжелого суглинка (число пластичности  $I_p = 14$ ), укрепленного 6% портландцемента и 6% портландцемента с добавкой 0,3% полиэлектролита от массы грунта. Из приготовленных цементогрунтовых смесей изготавливались образцы, при этом удельная нагрузка уплотнения изменялась от 3,0 до 27,0 МПа.

Результаты исследований (рис. 3) подтверждают действие полиэлектролита как пластификатора, позволяющего освобождать сорбционную воду с поверхностей глинистых частиц и отжимать ее при уплотнении. Благодаря данному эффекту при одной и той же работе уплотнения возможно получить более высокую прочность, чем при укреплении одним портландцементом.

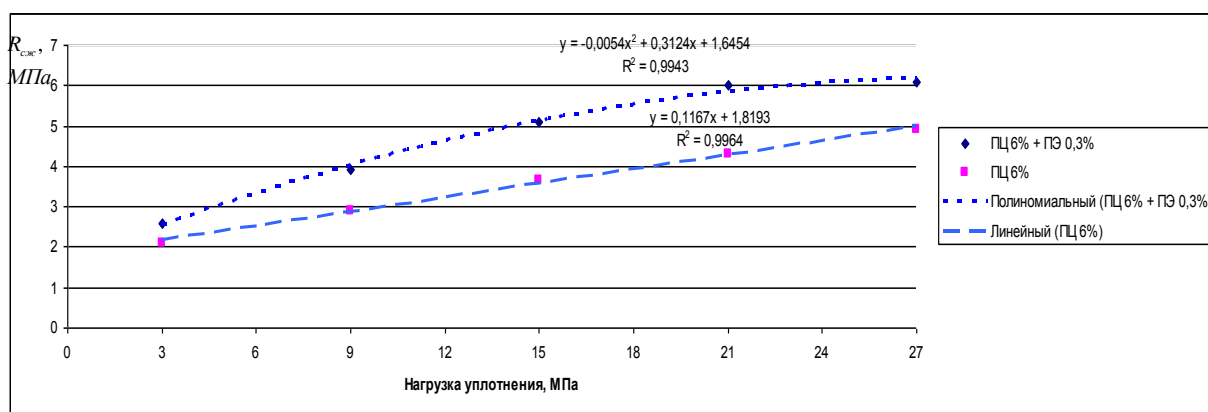


Рис. 3. Изменение прочности при сжатии цементогрунта в зависимости от удельной нагрузки уплотнения

Из графика видно, что при всех значениях удельных нагрузок предел прочности при сжатии водонасыщенных образцов при комплексном укреплении грунтов портландцементом с добавкой полиэлектролита несколько выше, чем при укреплении одним портландцементом. Максимальная разница наблюдается при  $p = 21$  МПа. Дальнейшее увеличение удельной нагрузки уплотнения не дает существенного увеличения  $R_{сж}$ , в то время как при укреплении грунта одним портландцементом существует прямолинейная зависимость между удельной нагрузкой уплотнения и пределом прочности при сжатии водонасыщенных образцов.

Таким образом, проведенные исследования подтверждают существенное влияние технологических факторов на прочность цементогрунта, а также положительное действие полиэлектролита как комплексной добавки. На основании проведенной работы можно сделать следующие **выводы**:

- недостаток влаги в укрепляемом грунте в большей степени снижает его прочность, чем ее избыточность. Добавка полиэлектролита позволяет увеличивать диапазон оптимальной влажности укрепляемого грунта;
- введение полиэлектролита способствует существенному увеличению допустимого времени выдержки смеси между перемешиванием и ее уплотнением;
- введение в глинистый грунт сначала раствора полиэлектролита, а затем портландцемента позволяет достигать наибольшей прочности цементогрунта;
- добавка полиэлектролита обладает пластифицирующим действием и способствует при одной и той же нагрузке уплотнения получать более высокую прочность цементогрунта, чем при укреплении одним портландцементом.

*Список литературы*

1. Безрук, В. М. Укрепленные грунты. (Свойства и применение в дорожном и аэродромном строительстве) / В. М. Безрук, И. Л. Гурячков, Т. М. Луканина и др. – М.: Транспорт, 1982. – 231 с.
2. Кауричев, И. С. Почвоведение / И. С. Кауричев, Л. Н. Александрова, Н. П. Панов и др. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 1982. – 496 с.
3. Радовский, Б. С. Определение нормативных сроков службы транспортных сооружений при проектировании / Б. С. Радовский, А. Е. Мерзликин // Наука и техника в дорожной отрасли. – 1998. – № 3. – С. 9–12.
4. Волженский, А. В. Минеральные вяжущие вещества: учеб. для вузов / А. В. Волженский. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1986. – 464 с.
5. Пшеничный, Г. Н. Исследование процесса схватывания портландцемента и действия добавок-электролитов / Г. Н. Пшеничный // Приволжский научный журнал. – 2008. – № 2 (июнь). – С. 30–37.

Статья поступила в редакцию 02.03.10.

*S. A. Chudinov*

**RESEARCH OF INFLUENCE OF TECHNOLOGY FACTORS  
ON SOIL CEMENT DURABILITY**

*Some basic technology factors, influencing the quality and service life of road revetment from the strengthened soils, are considered. The Results and the analysis of the research of influence of technology factors on a clay soil durability strengthened with Portland cement with addition of polyelectrolyte are presented.*

**Key words:** *soil cement, strengthened soil, polyelectrolyte, complex binding, technology factors.*

---

*ЧУДИНОВ Сергей Александрович* – аспирант кафедры транспорта и дорожного строительства Уральского государственного лесотехнического университета (УГЛТУ). Область научных интересов – укрепление грунтов с использованием полимерных добавок. Автор девяти печатных работ. E-mail: serg-chudinov@yandex.ru