

временные исследования в сфере мБЛА сосредоточены на разработке высокопроизводительных батарей или развертывании роя дронов [1].

Достижения в области детекторных технологий создают возможность использования компактных (легких) высокоточных анализаторов (в качестве навесного оборудования), тем самым решая проблему ограниченной грузоподъемности. Тенденции технологического развития в этой сфере также направлены на улучшение недорогих детекторов/датчиков по параметрам чувствительности, селективности и времени отклика.

Перспективным научным направлением [2] использования мБЛА для мониторинга качества воздуха является разработка технологии повышенной функциональности (например, измерение не только концентрации загрязнителей, но и шума) навесного оборудования (детекторов/датчиков) при различных сценариях (режимах) эксплуатации, основанной на принципах неинвазивности, экономичности и геолокализованности.

### Литература

1. Jońca, J.; Pawnuk, M.; Bezyk, Y.; Arsen, A.; Sówka, I. Drone-Assisted Monitoring of Atmospheric Pollution – A Comprehensive Review. *Sustainability* 2022, 14, 11516. <https://doi.org/10.3390/su141811516>
2. De Fazio, R.; Dinoi, L.M.; De Vittorio, M.; Visconti, P. A Sensor-Based Drone for Pollutants Detection in Eco-Friendly Cities: Hardware Design and Data Analysis Application. *Electronics* 2022, 11, 52. <https://doi.org/10.3390/electronics11010052>

УДК 630\*383.6

**П.А. Лыщик, А.И. Наumenko**

Белорусский государственный технологический университет

### **УКРЕПЛЕНИЕ МЕСТНЫХ ГРУНТОВ КОМПЛЕКСНЫМ ВЯЖУЩИМ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ЛЕСНЫХ ДОРОГ**

Прочность структуры цементного камня определяется силами, возникающими в контактах между новообразованиями с чрезвычайно большими выходами дислокаций на их поверхность. Крупнокристаллические структуры внешних слоев зерен, заполняя поры в цементном камне, способствуют формированию прочности в начальный период до определенного предела, зависящего от скорости движения дислокаций. Для получения максимальной прочности цементного камня не-

обходимо увеличивать количество препятствий движению дислокаций в нем. Это может быть достигнуто путем повышения степени дисперсности структуры камня.

Поэтому рост прочности цементного камня связывают с образованием и ростом более мелких кристаллов.

Проявление вяжущих свойств другими минеральными материалами типа активных зол уноса и активных молотых шлаков в основном обусловлено содержанием в них в той или иной степени клинкероподобных минералов разной основности и строения (белит  $C_2S$ , монокальциевый силикат и алюминат  $CS$  и  $CA$ , алюминат кальция  $C_3A$ , алюмоферриты кальция), а также извести, гипсового ангидрита, кварца [1]. Структура затвердевшего камня подобных материалов, получаемая в поздние сроки твердения, по плотности и морфологическим особенностям напоминает структуру цементного камня.

Рассмотренные химические и физико-химические процессы, приводящие к образованию продуктов гидратации и развитию структурных связей кристаллизационного типа, наблюдаются как при твердении самих минеральных вяжущих, так и в зоне их контакта с поверхностью заполнителей. Причем крупные заполнители являются относительно инертными, что нельзя сказать о глинистых грунтах, содержащих тонкодисперсные, глинистые и коллоидные частицы. При укреплении таких грунтов минеральными вяжущими они оказывают весьма существенное влияние на процессы гидратации и твердения вяжущих благодаря способности глинистых частиц к активному химическому и физико-химическому взаимодействию с продуктами гидратации [2].

Исследование процесса формирования структурных связей в грунтах, обработанных неорганическими вяжущими, позволили выявить как качественные закономерности формирования, так и количественные параметры тех или иных структурных связей. Для выявления характера структурных связей было использовано основное их свойство – способность обратимо или необратимо восстанавливаться при механических воздействиях. В результате опытов, во время которых производили переменное формирование и разрушение образцов естественных грунтов и грунтов, обработанных цементом, установлено, что начальная прочность неукрепленных грунтов практически мало зависит от числа циклов разрушений структурных связей, так как после каждого разрушения и нового формирования образцов прочность их восстанавливается практически на начальном уровне. Эта прочность, характеризующая энергию восстанавливающихся коагуляционных связей, условно принята за прочность «гибких» структурных связей  $\sigma_{вц}$  в укрепленном и  $\sigma_{в}$  в неукрепленном грунтах [31].

Закономерность изменения прочности цементогрунта в зависимости от количества цемента указывает наличие в нем как «гибких», так и «жестких» структурных связей. Прочность цементогрунта после первых циклов разрушения резко уменьшается, а затем при последующих циклах формирования и разрушения так же, как и в неукрепленных грунтах, устойчиво восстанавливается.

При обработке грунта известью или активной золой уноса характер зависимости сохраняется. Однако если разрушение «жестких» связей цементогрунтов происходит в основном при первом цикле, то в извести (зола)- грунтах интенсивное восстановление «жестких» связей отмечается при первых трех-четырёх циклах. Это указывает на меньшую чувствительность таких грунтов к разрушению первичных структурных связей жесткого типа.

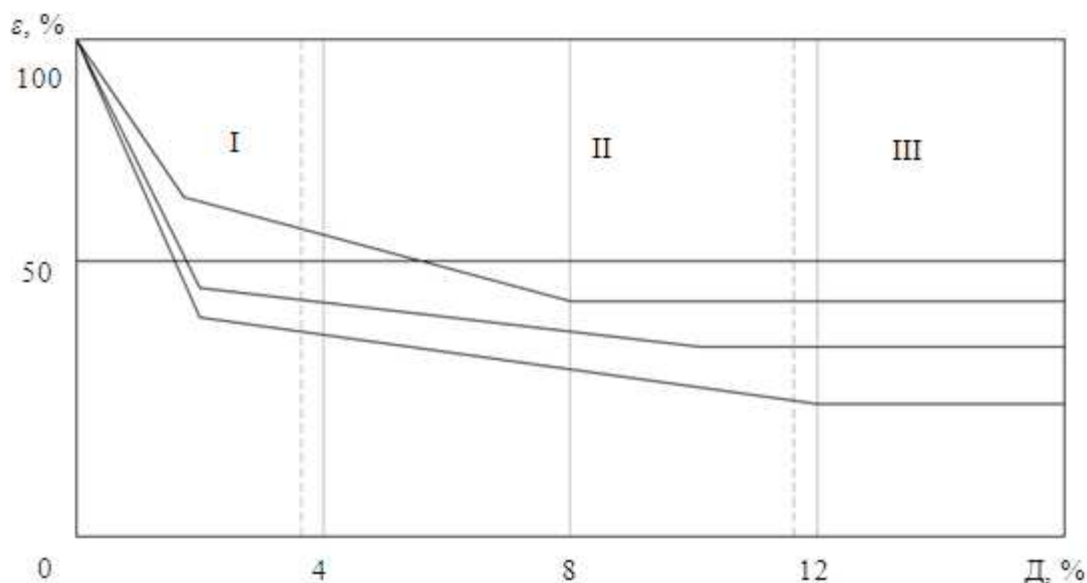
Упрочнение «гибких» структурных связей противодействует уменьшению их общего количества по мере агрегирования грунта жесткими связями. При определении количества цемента процесс уменьшения «гибких» связей будет превалировать над их упрочнением, что приведет к суммарному уменьшению прочности гибких связей. На основании опытных данных установлено количество цемента  $D_{кр}$ , соответствующее наибольшей прочности «гибких» структурных связей.

Значение  $D_{кр}$  зависит от исходного грунта, т. е. от содержания в нем глинистых частиц, оказывающих значительное влияние на течение процесса гидролиза и гидратации цемента. Прочность жестких кристаллизационных связей монотонно растет с увеличением количества цемента. Соотношение прочности «жестких» и «гибких» структурных связей в грунтах, укрепленных неорганическими вяжущими, определяет их деформативные свойства. Результаты опытов по измерению деформации цилиндрических образцов при сжатии в момент разрушения представлены на рисунке 1.

Кривые этой зависимости могут быть условно разделены на три зоны, которые характеризуются разным влиянием цемента на величину предельной деформации материала при разрушении. В пределах I зоны происходит интенсивное уменьшение деформативной способности укрепленного грунта. Эта зона соответствует небольшому содержанию цемента – до 2–4%. II зона – переходная и соответствует содержанию цемента от 3–5 до 10–12%, III зона характеризуется практически постоянной деформацией разрушений. Увеличение количества цемента мало влияет на деформацию цементогрунта в III зоне.

Можно полагать, что свойства цементогрунта и прежде всего его деформативность в I зоне в основном определяют «гибкие» упрочненные структурные связи, во II зоне преобладают «жесткие»

структурные связи при наличии упрочненных «гибких» связей и в III зоне свойства материала определяются «жесткими» структурными связями.



I – III зоны; 1 – в грунтах содержится 17% глинистых частиц; 2 – то же 26%; 3 – то же 38%

**Рисунок 1 – Зависимость деформации суглинистого грунта  $\varepsilon$ , укрепленного цементом, от количества цемента Д**

Полученные закономерности позволили разработать следующую классификацию укрепленных грунтов, природа структурных связей которых, зависящих от содержания неорганических вяжущих и в конечном итоге определяет прочностные и деформативные свойства укрепленных материалов (рисунок 2).

I тип – грунт влажный неукрепленный (в том числе и не имеющий природных цементирующих веществ), в котором все структурные связи гибкие (рисунок 2, а):

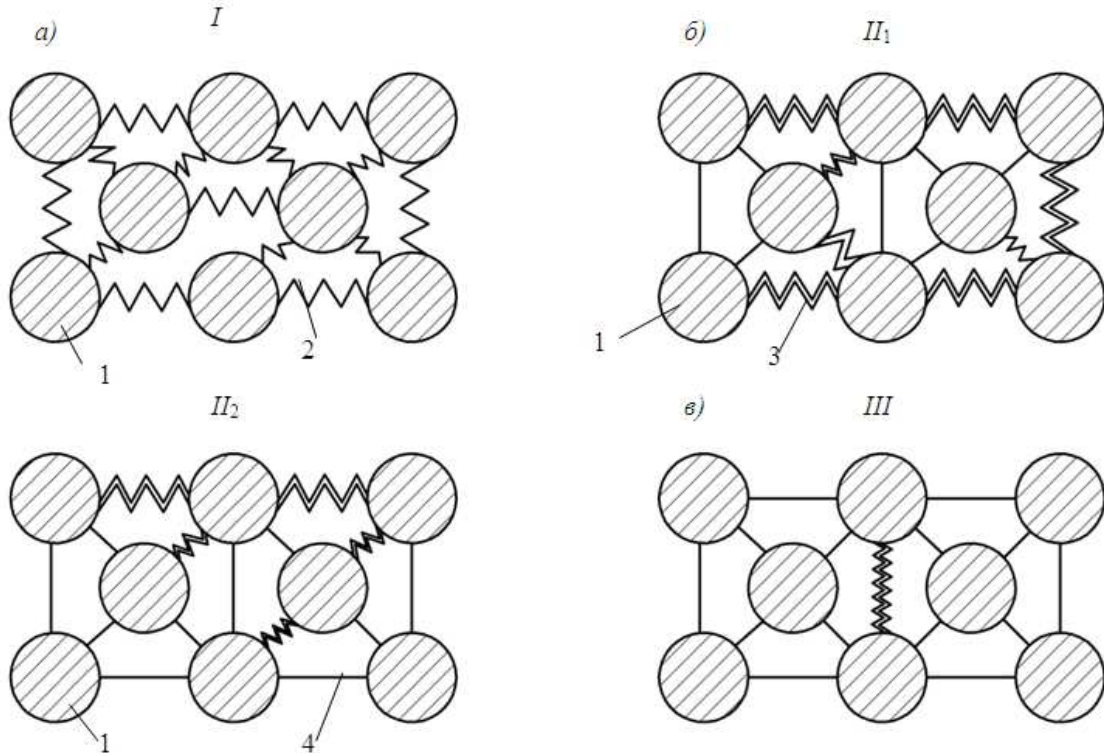
II тип – грунт, укрепленный неорганическими вяжущими, с насыщенностью системой, имеющей прерывистый структурный каркас из «жестких» структурных связей (рисунок 2, б).

Этот тип подразделяется на два подтипа:

$II_1$  – преобладают «гибкие» упрочненные структурные связи при наличии «жестких» ( $0 \leq \frac{\sigma_k}{\sigma_{вц}} \leq 1$ ):

$II_2$  – преобладают «жесткие» структурные связи при наличии гибких связей [ $1 \leq \frac{\sigma_k}{\sigma_{вц}} \leq (3-4)$ ];

III тип – грунт, укрепленный неорганическими вяжущими, с насыщенной системой, имеющей сплошной каркас (рисунок 2, в) здесь в основном все структурные связи «жесткие» [ $\frac{\sigma_k}{\sigma_{вц}} \approx (3-4)$ ].



1 – минеральные частицы грунта; 2 – «гибкие» связи  $\sigma_{в}$ ; 3 – «гибкие» упрочненные связи  $\sigma_{вц}$ ; 4 – «жесткие» связи  $\sigma_k$

Рисунок 2 – Схема структуры грунтов и структурных связей в них

Такое разделение грунтов, обработанных цементом и другими неорганическими вяжущими, на две основные группы по характеру их структуры позволяет обоснованно подойти к разработке требований к их прочности в зависимости от конструкций дорожной одежды. Так, например, цементогрунт III типа со сплошным структурным каркасом и «жесткими» структурными связями обладает повышенной жесткостью и низкой трещиностойкостью. Поэтому такой материал целесообразно применять только в нижних слоях основания дорожных одежд. Наиболее целесообразно устройство оснований из укрепленных материалов структурного типа II<sub>2</sub>, который при достаточной прочности и морозостойкости обладает повышенной деформативной способностью (в 1,5 раза большей, чем цементогрунт III типа). В этом случае наименьшая толщина слоев из асфальтобетонных смесей над таким основанием может быть снижена на 20–30%.



Цементогрунты структурного типа  $II_1$  могут быть использованы при устройстве нижних слоев оснований дорожных одежд, морозозащитных слоев и для укрепленных верхнего слоя земляного полотна [3, 4].

### Литература

1. Лыщик П. А., Науменко А. И., Синяк С. А. Конструкции лесных автомобильных дорог на основе арматурного каркаса «георешетка-цементогрунт» // Труды БГТУ. 2016. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 79–82.

2. Лыщик П. А., Бавбель Е. И., Науменко А. И. Состав минерального вяжущего для укрепления дорожных грунтов // Труды БГТУ. 2014. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 33–36.

3. Дорожная конструкция из арматурного каркаса «георешетка-цементогрунт»: патент Респ. Беларусь на полезную модель, МПК E 01 C 7/00 / П. А. Лыщик, Е. И. Бавбель, С. В. Красковский, А. И. Науменко; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. № и 20150100; заявл. 19.03.2015; опубл. 30.10.2016. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2016. № 5. с. 143-144.

4. Композиционный цемент: патент Респ. Беларусь, МПК C 04 B 7/04, C 04 B 28/5204, C 04 B 18/12, C 04 B 718/16, C 04 B 7/52 / П. А. Лыщик, С. В. Плышевский, А. И. Науменко; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. № а 20121705; заявл. 06.12.12; опубл. 30.05.2015 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2015. № 4. С. 82.

УДК 630\*383.4

**П.А. Лыщик, Е.И. Бавбель, А.И. Науменко**

Белорусский государственный технологический университет

### **ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛЕСНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ НА ОСНОВЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ**

При проектировании транспортного освоения лесных массивов возникает задача по определению очередности строительства лесных дорог. От правильности ее решения зависит ритмичность работы предприятий, динамика освоения инвестиций и в конечном итоге эффективность лесозаготовительного производства [1-2].

При решении данной задачи предварительно определено на перспективу множество всех допустимых звеньев сети (конфигурация транспортной сети), в которое включаются как существующие участки автомобильных лесных дорог, так вероятные новые трассы.