

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПО ГЛУБИНЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ

К.А. Айтбаев

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник

Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт, г. Алматы, Казахстан

E-mail: aytbaev53@mail.ru

К.Б. Тілеу

PhD, Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт,

руководитель управления цифровизации, г. Астана, Казахстан

E-mail: tileu.kurmangazy@gmail.com

А. Бахытжан

Инженер-программист, Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт, г. Астана, Казахстан

E-mail: bakhytzhnamen@gmail.com

АННОТАЦИЯ

В статье приведены результаты исследования влияния изменчивости по вертикали влажности грунтового основания автомобильных дорог. Приведен обширный обзор научной литературы, посвященный данной тематике. Особенно полно охвачены труды зарубежных исследователей ученых дорожников. Приведены данные из натурного эксперимента, проведенного в зимний период 2021-2022 годов, выполненного учеными АО КаздорНИИ. Даны предложения по дальнейшему совершенствованию методов проведения подобных экспериментов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

дорожная одежда, грунтовое основание, температура, влажность, водно-тепловой режим, напряжения, деформаций, долговечность, надежность, модуль упругости, несущая способность

ВВЕДЕНИЕ

Напряженно-деформированное состояние (НДС) дорожной одежды напрямую зависит от многих характеристик грунтового основания, в числе которых в первую очередь можно назвать температуру и влажность. Особенно в регионах с неустойчивым водно-тепловым режимом и сезонными изменениями климата в грунтовом основании дорожной одежды эти характеристики изменяются в широких пределах, в том числе и по глубине.

Изменчивость показателя влажности по глубине основания вызывает неравномерное распределение напряжений и деформаций, что приводит к образованию дефектов и ускоренному износу дорожного покрытия. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения долговечности и надежности в эксплуатации автомобильных дорог.

Влияния изменчивости показателя влажности по глубине основания исследованы многими учеными дорожниками всего мира. Например, изменение модуля упругости и несущей способности грунтов исследовано С.А.Петровым и А.Б.Черновым (2013). А переходу грунтов в пластическое состояние посвящена работа А.П.Медведева и К.А.Николаева (2018).

В работе Казакова В.Г. (2013) показано, что наибольшее влияние на НДС оказывает градиент влажности по глубине основания, который меняется в зависимости от климатических условий и типа грунта.

В работах Чанга С. и Ли П. (2021) показано, что изменение влажности на разных глубинах вызывает локальные зоны слабости, что приводит к перераспределению напряжений и образованию трещин в покрытии. Особенно это проявляется при сезонных изменениях в результате замораживания-оттаивания [1].

Исследования изменчивости влажности на НДС проводились на реальных моделях и численными методами.

Конг Л. и Се С. (2024) разработали численные модели, показывающие, что градиенты влажности грунтового основания изменяют напряжения и в верхних слоях дорожной одежды, особенно в районах с пылевато-глинистыми грунтами [7].

Экспериментами Фэна С. и Вана Дж. (2023) показано, что неравномерное распределение влажности снижает модуль упругости грунта до 30–50% в зонах избыточного увлажнения [3].

В работах Мусаева И.Т. и Карасева И.А. (2020) показано, что влажность возрастает по глубине в период таяния, что приводит к просадкам дорожной одежды. В зимний период миграция влаги вверх может вызвать морозное пучение.

Естественно ожидать, что изменчивость влажности грунтов может изменить и эксплуатационные характеристики автомобильных дорог.

В работе Гнездиловой С.А. (2015) доказано, что при изменении влажности на 10–15% пучение грунтов увеличивается на 25–40%, что приводит к вертикальным и горизонтальным деформациям дорожной одежды.

Романов А.Н. (2015) исследовал перераспределение напряжений при градиенте влажности, ускоряющее разрушение покрытий из-за усталостных трещин.

Понятно, все это приводит к снижению несущей способности дорожной одежды.

Ким Е.В. и Ли Ю.С. (2020) показывают, что избыточная влажность снижает несущую способность грунта, а значит, усиливает напряжения в слоях покрытия, что требует применения компенсирующих мер при проектировании [6].

Конечно, во всем мире предпринимаются меры по стабилизации НДС при изменчивости влажности. Применение геосинтетических материалов позволяют стабилизировать НДС, распределяя нагрузки и предотвращая деформации (Мусаев И.Т., 2020).

Применяются и различные дренажные системы. Работы Иванова С.К. и Хачатурова Д.А. (2023) показали, что правильный дренаж снижает градиент влажности и улучшает НДС [5].

Широко применяются и методы численного моделирования. Например, Конг Л. и Се С. (2024) предложили алгоритмы для учета изменчивости влажности при проектировании дорог в условиях изменчивого сезонного климата [7].

МЕТОДОЛОГИЯ

В 2021 году Акционерным обществом «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт» выполнен научно-исследовательский проект по теме: Экспериментальное исследование распределения температуры и влажности в дорожной одежде и земляном полотне автомобильных дорог в различных регионах Казахстана.

Целью данного проекта было изучение закономерностей изменения водно-теплового режима в дорожной одежде и земляном полотне автомобильных дорог Республики Казахстан в течение 2021–2023 годов.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального изучения закономерностей изменения температуры в точках земляного полотна на участке автомобильной дороги «Карабутак-Костанай-Екатеринбург-Алматы, г. Костанай», КМ 1.

На рисунке 1 приведены внешний вид передающей антенны измерительной станции вблизи г. Костанай и схематически вид дорожной конструкции с указанием размеров конструктивных слоев многослойной дорожной конструкции и глубин расположения датчиков температуры и влажности.

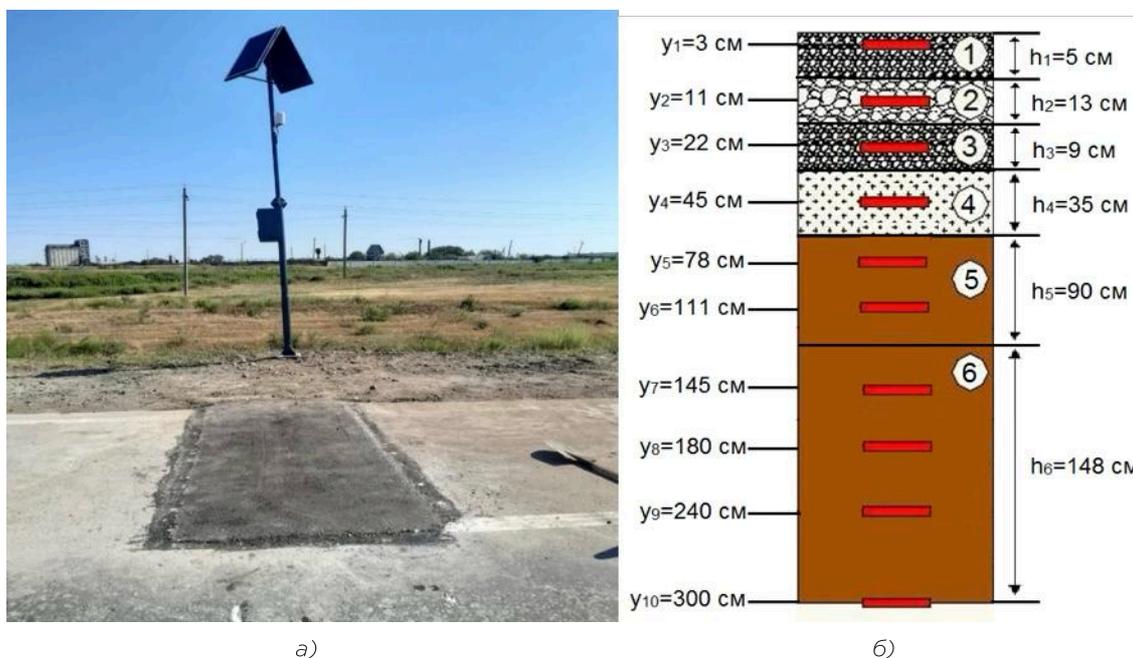


Рисунок 1 – Внешний вид передающей антенны вблизи г. Костанай а) и схематический вид дорожной конструкции б)

Таблица 1 – Географические координаты измерительной станции на участке автомобильной дороги «Карабутақ-Костанай-Екатеринбург-Алматы, г. Костанай», КМ 1.

Название измерительной станции	Географическая широта	Географическая долгота
Карабутақ-Костанай-Екатеринбург-Алматы, г. Костанай», КМ 1	53,139900	63,551765

Таблица 2 – Конструкция дорожной одежды

	Толщины слоев
1. асфальтобетон, тип Б	$h_1=5$ см
2. крупнозернистый пористый асфальтобетон	$h_2=13$ см
3. крупнозернистый высокопористый асфальтобетон	$h_3=9$ см
4. смесь С-4	$h_4=35$ см
5. грунт песок	$h_5=90$ см
6. грунт чернозем	$h_6=148$ см

Таблица 3 – Глубины закладки датчиков

Вертикальные координаты места закладки датчиков	У1	У2	У3	У4	У5	У6	У7	У8	У9	У10
Числовые значения, см	3	11	22	45	78	111	145	180	240	300

В таблицах 1-3 приведены данные о материальном составе слоев многослойной дорожной конструкции и геометрических характеристиках измерительной станции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Измерительная станция оснащена датчиками 11 температуры и влажности, проводящих измерения через каждый час и работающих в автоматическом режиме. Спаренные датчики расположены на различных глубинах у1 - у10. Одна пара датчиков расположена на высоте 2 метра от поверхности земли. Полученные результаты будут передаваться через интернет наземному сотруднику, где им будет формироваться база данных.



Рисунок 2 – Картина изменения температуры на глубинах 1-45 см, 2-78 см, 3-111 см и 4-145 см в течение 196 суток, с 1 ноября 2021 года по 15 мая 2022 года



Рисунок 3 – Картина изменения влажности на глубинах 1-45 см, 2-78 см, 3-111 см и 4-145 см в течение 196 суток, с 1 ноября 2021 года по 15 мая 2022 года

На рисунке 2 приведена картина изменения температуры на глубинах $y=45$ см, $y=78$ см, $y=111$ см и $y=145$ см в течение 196 суток с 1 ноября 2021 года по 15 мая 2022 года. Итого, для каждой глубины накапливается 4704 единиц информации с учетом того, что информация, поступает через 1 час. Чтобы предотвратить чрезмерное уплотнение информации на одном рисунке, на рисунке 2 приведены данные, соответствующие экстремальному (минимальному) значению температуры, возникающей на каждой глубине в течение одних суток.

На рисунке 3 приведена картина изменения влажности на глубинах 1-45 см, 2-78 см, 3-111 см и 4-145 см в течение 196 суток, с 1 ноября 2021 года по 15 мая 2022 года. Сравнительный анализ содержания рисунков 2 и 3 указывает на тесную связь между ними. Например, резкое понижение температуры в верхних слоях земляного полотна приводит к резкому снижению содержания влаги в этих слоях. Значит, произошло льдообразование в грунтовой среде. Влага в виде льда не фиксируется датчиками, и происходит мнимое осушение грунта. Причем это повышение происходит скачкообразно, которое достигнув некоторого характерного значения сохраняет свой уровень вплоть до начала процесса оттаивания. С началом таяния, что связано с значительным повышением температуры в верхних слоях, происходит скачкообразное повышение показателя влажности в этих же слоях, что вполне понятно. Более детальный анализ приведет нас к пониманию сложных процессов явлений энергетического характера, как фазовый переход влаги в твердое состояние и обратно. Однако в рамках данной работы такая задача не ставилась.

Более скромная картина изменения температуры и влажности представлена на рисунках 2 и 3, где на относительно больших глубинах изменения во времени обоих показателей происходит спокойно, монотонно. Приведем их на рисунках 4 и 5.

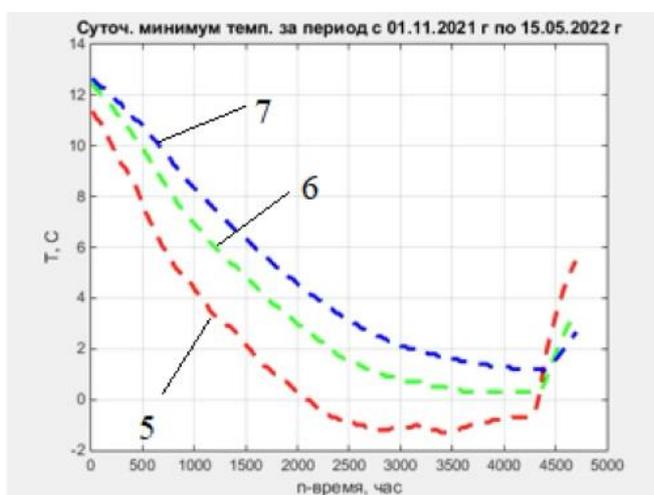


Рисунок 4 – Картина изменения температуры на глубинах 5-180 см, 6-240 см и 7-300 см в течение 196 суток, с 1 ноября 2021 года по 15 мая 2022 года

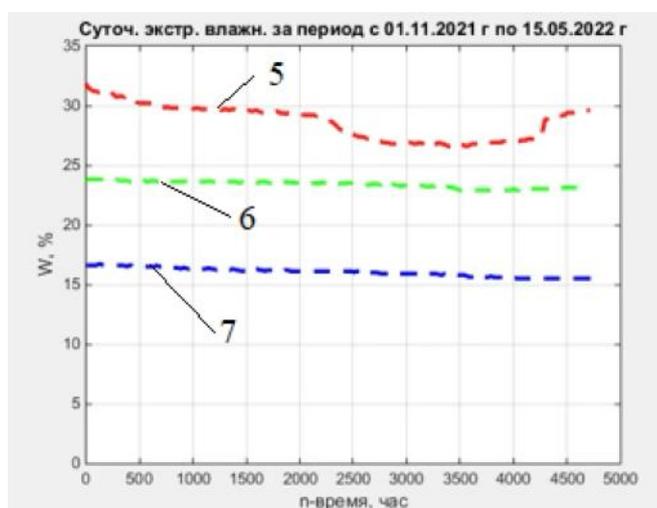


Рисунок 5 – Картина изменения влажности на глубинах 5-180 см, 6-240 см и 7-300 см в течение 196 суток, с 1 ноября 2021 года по 15 мая 2022 года

Из сравнительного анализа данных рисунков 4 и 5 получаем вполне ожидаемый результат. Промерзание земляного полотна на данном участке дороги фиксируется только до глубины 240 см. Этот факт подтверждается небольшим снижением влажности на графике, соответствующем глубине 180 см, а на глубине 240 см заметного снижения влажности уже нет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменчивость влажности грунтового основания по глубине является важным фактором, влияющим на напряженно-деформированное состояние дорожной одежды. Градиенты влажности приводят к локальным деформациям, снижению несущей способности и ускоренному разрушению покрытия. Современные методы моделирования и экспериментальные исследования позволяют прогнозировать эти изменения и разрабатывать меры по стабилизации НДС, включая использование дренажных систем, геосинтетиков и численных методов оптимизации конструкции дорожной одежды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чанг С., Ли П. (2021). Численное моделирование процессов замерзания и оттаивания грунтов в основаниях дорог при экстремальных климатических условиях. *Наука и технологии холодных регионов*, 185, 103222. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103222>
2. Чен Л., Чжан В. (2024). Инновационные методы контроля влажности грунтов основания автомобильных дорог в холодном климате. *Инженерия холодных регионов*, 40(2), 240–258. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CR.1943-5495.0000190](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000190)
3. Фэн С., Ван Дж. (2023). Влияние циклов замораживания-оттаивания на содержание влаги в грунтах и эксплуатационные характеристики дорог. *Журнал гражданского строительства*, 58(4), 456–470. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-1245-8>
4. Гарин А.В., Попов Н.М. (2022). Моделирование динамики изменения влажности в процессе сезонного оттаивания. *Гидротехническое строительство*, 23(3), 67–79.
5. Иванов С.К., Хачатуров Д.А. (2023). Эффективность дренажных систем для снижения влажности грунтов в зимний период. *Дорожные инновации*, 14(3), 88–101.
6. Ким Е.В., Ли Ю.С. (2020). Современные методы мониторинга влажности грунтов оснований автомобильных дорог. *Журнал геотехнической инженерии*, 46(3), 205–217. <https://doi.org/10.1016/j.jgeoeng.2020.03.007>
7. Конг Л., Се С. (2024). Экспериментальный и численный анализ морозного пучения в основаниях дорог. *Геотехника транспорта*, 51, 100895. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.100895>
8. Мусаев И.Т., Карасев И.А. (2020). Применение геосинтетиков для стабилизации водонасыщенных оснований автомобильных дорог. *Геотехника строительства*, 34(1), 15–27.
9. Сорокин Е.А., Степанов А.П. (2022). Инновационные технологии борьбы с морозным пучением оснований автомобильных дорог. *Строительная наука и практика*, 17(3), 178–190.
10. У П., Чен З. (2023). Динамика содержания влаги в грунтах при отрицательных температурах: экспериментальные исследования. *Экологическая геотехника*, 22(4), 512–526.
11. Чжан Л., Чен У. (2024). Характеристики замерзания мелкозернистых грунтов в основаниях автомобильных дорог. *Геотехническая и геологическая инженерия*, 58(3), 302–317.
12. Болдин А.В., Аксенов П.И. (2021). Анализ методов стабилизации влажных грунтов с учетом сезонного промерзания. *Геотехнический инженерный журнал*.