

Исследование влияния асфальтобетонного подбалластного слоя на накопление остаточных деформаций в конструкции железнодорожного пути

УДК 625.041.2

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0015>

Номер статьи: C0015

Колос Алексей Федорович

д-р техн. наук, доцент,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, зав. кафедрой «Строительство дорог транспортного комплекса»

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 9591-6498

kolos2004@inbox.ru

Черняева Виктория Андреевна

к-т техн. наук, доцент,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, доцент кафедры «Железнодорожный путь»

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 6202-2098

chernyaeva@pgups.ru

Шехтман Евгений Иосифович

д-р воен. наук, профессор,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, профессор кафедры «Железнодорожный путь»

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 7185-9172

director@sptgt.ru

Соколов Леонид Константинович

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, аспирант кафедры «Железнодорожный путь»

Санкт-Петербург, Россия

leonid.sokolov.99@mail.ru

Статья получена: 30.10.2025. Одобрена: 26.11.2023. Опубликовано онлайн: 25.12.2025. © РИОР

Аннотация. Исследованию эффективности асфальтобетонного материала в конструкции железнодорожного пути посвящена серия публикаций. В данной статье рассмотрено влияние подбалластного слоя из асфальтобетона на накопление остаточных деформаций земляного полотна железнодорожного пути. Целью работы являлось определение деформаций земляного полотна на опытном участке Московской железной дороги, включающим в себя экспериментальный участок протяженностью 500 м, с уложенным асфальтобетонным слоем, и контрольный участок протяженностью 500 м, без устройства асфальтобетонного слоя. Проведен анализ первичных данных, полученных по результатам нивелировки грунтовых марок на опытном участке, определены абсолютные значения остаточных деформаций земляного полотна на участке устройства подбалластного асфальтобетонного слоя и на контрольном участке; проведена оценка

темпа накопления и неравномерность остаточных деформаций земляного полотна на каждом из участков за рассматриваемый период.

Ключевые слова: железная дорога, подбалластный слой, асфальтобетонный слой, земляное полотно, остаточные деформации, осадка земляного полотна, грунтовые марки.

Study of the Effect of Asphalt Concrete Subballast Layer on the Accumulation of Residual Deformations in the Railway Track Structure

Kolos Alexey

Dr. Technical Sciences, Associate Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Head of Department "Construction of roads of the transport complex"
St. Petersburg, Russia
kolos2004@inbox.ru

Chernyaeva Victoria

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Associate Professor of the Department "Railway Track"
St. Petersburg, Russia
chernyaeva@pgups.ru

Shekhtman Evgeny

Dr. Warrior Sciences, Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Professor of the Department "Railway Track"
St. Petersburg, Russia
director@sptgt.ru

Sokolov Leonid

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
graduate student of the Department "Railway Track"
St. Petersburg, Russia
leonid.sokolov.99@mail.ru

Abstract. A series of publications is devoted to the study of the effectiveness of asphalt concrete material in the design of the railway track. This article discusses the effect of the subballast layer of asphalt concrete on the accumulation of residual deformations of the roadbed of the railway track. The purpose of the work was to determine the deformations of the roadbed on the experimental section of the Moscow Railway, which includes an experimental section with a length of 500 m, with a laid asphalt concrete layer, and a control section with a length of 500 m, without the construction of an asphalt concrete layer. An analysis of the primary data obtained from the results of leveling soil grades at the experimental site was carried out, the absolute values of the residual deformations of the subgrade at the site of the sub-ballast asphalt concrete layer and at the control site were determined; the rate of accumulation and the unevenness of residual deformations of the subgrade in each of the sections for the period under review were assessed.

Keywords: railway, sub-ballast layer, asphalt concrete layer, subgrade, residual deformations, subgrade settlement, soil grades.

Введение

В зарубежных странах в течение последних нескольких десятилетий протяженность участков пути с конструкцией защитного слоя из асфальтобетона постоянно увеличивается. Эта технология применена при строительстве множества новых высокоскоростных пассажирских линий в Европе и Азии [1-4].

Теоретические аспекты эффективности применения подбалластного слоя из асфальтобетона в конструкциях пути, основанные на зарубежном опыте, подробно рассмотрены в работе авторов «Эффективность применения подбалластного слоя из асфальтобетона в конструкциях пути» [5].

В Российской Федерации в 2022 году начались исследования эффективности применения асфальтобетона в конструкции железнодорожного пути. Первый участок протяженностью 500 м был сооружен в 2024 году на Московской железной дороге. ФГБОУ ВО ПГУПС совместно с Ассоциацией «Р.О.С.Асфальт» осуществляет мониторинг за состоянием опытного участка железнодорожного пути. Исследованию эффективности асфальтобетонного материала в конструкции железнодорожного пути посвящена серия публикаций. В данной статье рассмотрено влияние подбалластного слоя из асфальтобетона на накопление остаточных деформаций земляного полотна железнодорожного пути.

Характеристика опытного участка

Объектом выполнения работ в рамках мониторинга является опытный участок, протяженностью 1000 м, включающий в себя участок железнодорожного пути с подбалластным слоем из асфальтобетона (экспериментальный участок) протяженностью 500 м и участок железнодорожного пути без подбалластного слоя из асфальтобетона (контрольный участок) протяженностью 500 м. Оба участка являются смежными (Рис. 1), располагаются в Рязанской области, Рыбновском районе и обладают одинаковыми эксплуатационными характеристиками:

- грузонапряженность участков 26,29 млн. тонн брутто / км;
- пропущенный тоннаж за период проведения исследований составил 18,31 млн. тонн брутто;
- земляное полотно представлено насыпью вне косогора максимальной высотой до 2 м.

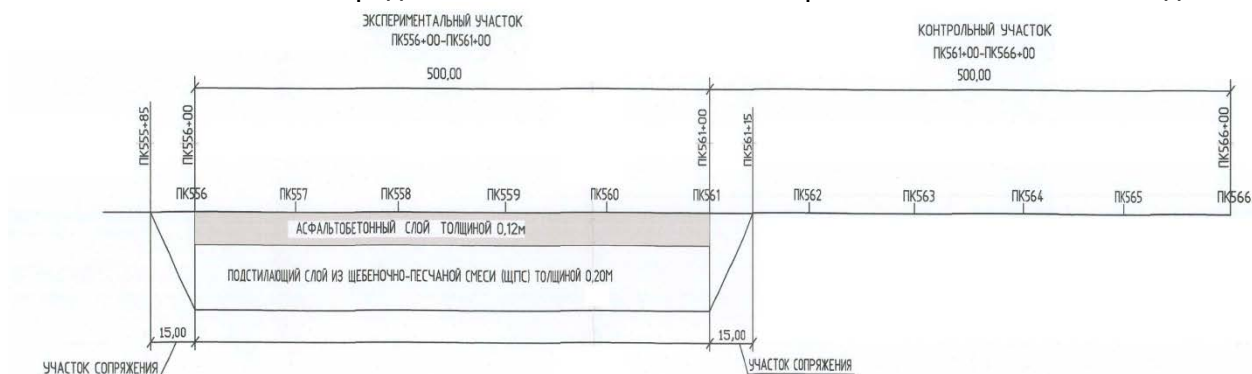


Рис. 1. Схема устройства подбалластного слоя на экспериментальном и контрольном участках

Конструкция железнодорожного пути в пределах экспериментального и контрольного участков приведена на Рис. 2, 3.

На основании выполненного комплекса лабораторных испытаний для проведения полевого эксперимента в качестве основного материала выбрана асфальтобетонная смесь А32Нт по ГОСТ Р 58406.2, уложенная в один слой толщиной 12 см с последующим уплотнением.

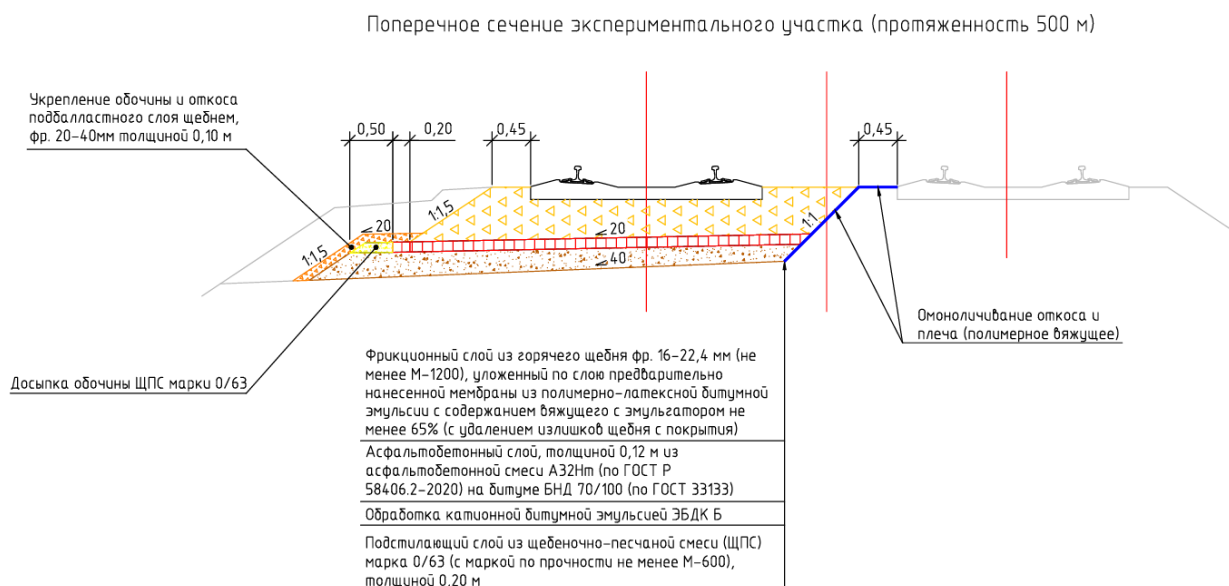


Рис. 2. Поперечное сечение экспериментального участка с асфальтобетонным подбалластным слоем

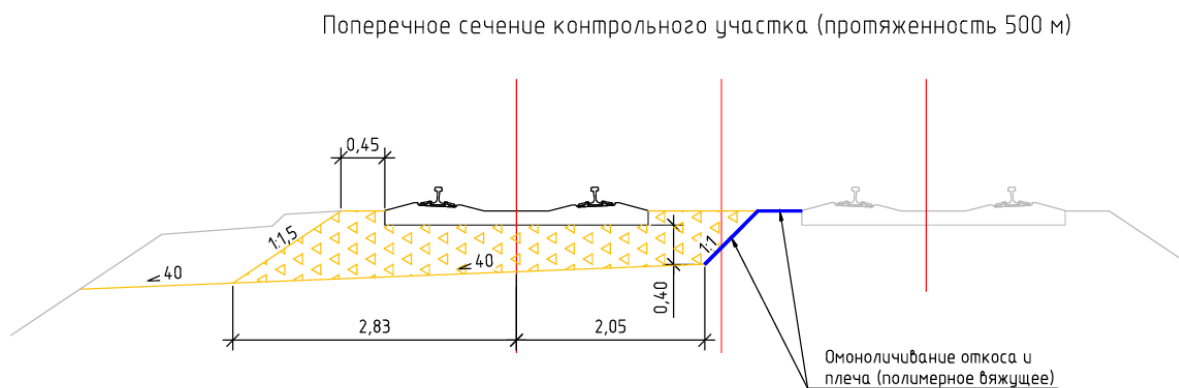


Рис. 3. Поперечное сечение контрольного участка

Инженерно-геологические условия

Основанием для подбалластного слоя асфальтобетона являются легкие, полутвердые глины с прослоями глины твердой, обладающие тиксотропными свойствами, суглинки тугопластичной консистенции с прослоями водонасыщенного песка с природной влажностью 20 %.

На период изысканий (август 2024 г), до глубины бурения 10,0 м, было установлено наличие вод спорадического распространения.

С целью оценки степени пучинистости глинистых грунтов, попадающих в зону сезонного промерзания, проведены расчеты соответствующего параметра. Согласно полученным результатам выявлены грунты, которые относятся к сильнопучинистым (суглинок мягкопластичный) и являются основанием подбалластного слоя из асфальтобетона на экспериментальном участке и балластного слоя на контрольном участке.

Согласно СП 22.13330.2016 по сложности инженерно-геологических условий участок исследования относится к II (средней) категории.

Методика проведения исследования

Для определения деформаций земляного полотна на опытном участке Московской железной дороги была создана высотная опорная геодезическая основа, состоящая из трех грунтовых реперов, заложенных в центре экспериментального участка в пределах полосы

отвода железной дороги, определение высот производилось методом геометрического нивелирования в условной системе высот. Данный метод успешно применяется специалистами ПГУПС при решении различных задач по оценке деформируемости конструкции железнодорожного пути [6].

Грунтовыми реперам была присвоена нумерация: Rp1, Rp2, Rp3.

Нивелирование выполнялось по замкнутому ходу цифровыми нивелирами с использованием инварных реек по программе III класса точности.

С целью контроля устойчивости грунтовых реперов перед каждым циклом контроля осадок производится проложение контрольного хода по этим реперам. По результатам анализа выбирается стабильный репер для данного цикла измерений абсолютных осадок.

Система высот опорных реперов – условная, при этом в качестве исходного принят репер Rp1 с высотой 10,000 м.

Опытный участок оборудован деформационными марками, установленными на подбалластный асфальтобетонный слой или основную площадку земляного полотна. Общий вид деформационной марки приведен на Рис. 4. Глубина установки марок составила 45 см под подошвой шпалы. Для установки деформационных марок были вырыты шурфы.



Рис. 4. Общий вид деформационной марки, устанавливаемой на основную площадку земляного полотна

Марки установлены как в продольном, так и в поперечном оси пути направлении. Общая схема установки деформационных марок на основную площадку земляного полотна представлена на Рис. 5, 6.

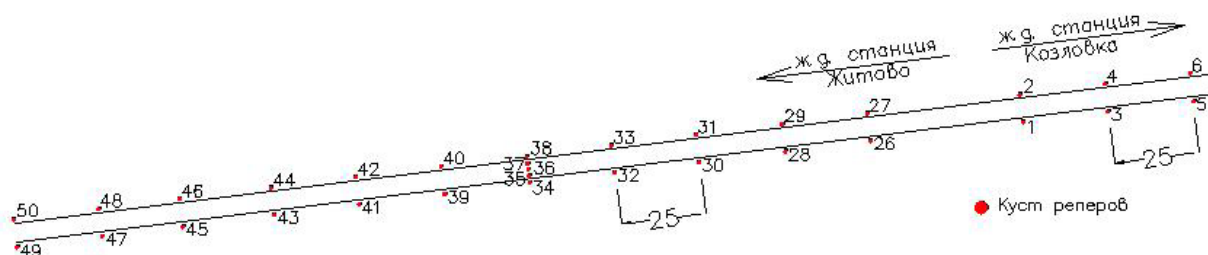


Рис. 5. Схема установки грунтовых марок на контрольном участке (левая сторона)

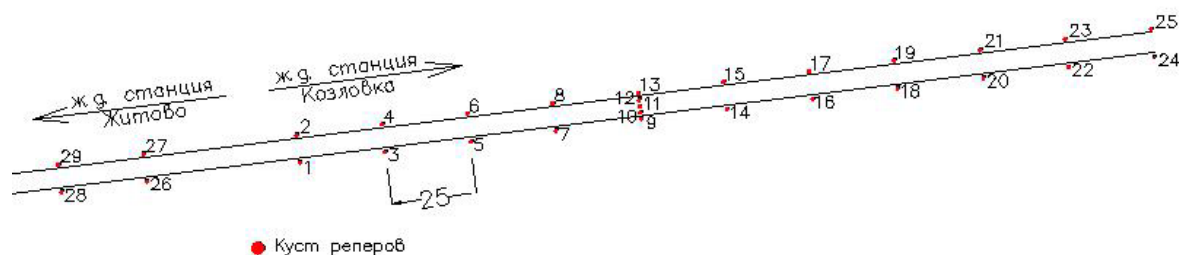


Рис. 6. Схема установки грунтовых марок на экспериментальном участке (правая сторона)

Целью нивелирования грунтовых марок является измерение остаточных деформации в уровне верха подбалластного асфальтобетонного слоя / основной площадки земляного полотна (контрольный участок).

Данная схема установки марок позволяет решить следующие задачи:

- определить абсолютные значения остаточных деформаций земляного полотна на участке устройства подбалластного асфальтобетонного слоя и на контрольном участке;
- оценить темп накопления остаточных деформаций на каждом из участков за рассматриваемый период;
- оценить неравномерность остаточных деформаций земляного полотна в продольном и поперечном оси пути направлении;
- оценить влияние слоя асфальтобетона на изменение темпа накопления остаточных деформаций земляного полотна.

Результаты измерений

В период с января по май 2025 года проведено 9 циклов геодезического контроля деформаций основной площадки земляного полотна, первый из которых является нулевым (Таблица 1).

Таблица 1

График геодезической съемки грунтовых марок

| Цикл | Дата | Пропущенный тоннаж, млн. тонн брутто |
|--------|------------|---|
| Цикл 0 | 16.01.2025 | 9,695 |
| Цикл 1 | 31.01.2025 | 10,79 |
| Цикл 2 | 20.02.2025 | 12,25 |
| Цикл 3 | 27.02.2025 | 12,98 |
| Цикл 4 | 11.03.2025 | 13,783 |
| Цикл 5 | 25.03.2025 | 14,805 |
| Цикл 6 | 15.04.2025 | 16,265 |
| Цикл 7 | 22.04.2025 | 16,776 |
| Цикл 8 | 13.05.2025 | 18,309 |

Остаточную деформацию основной площадки земляного полотна в месте установки грунтовой марки в момент времени t определяют по формуле:

$$\Delta S_t = A_B - A_t$$

где ΔS_t — остаточная деформация основной площадки земляного полотна, мм; A_B — базовая абсолютная высотная отметка верха грунтовой марки, м; A_t — абсолютная высотная отметка верха грунтовой марки в момент времени t .

Полученные данные являются основанием для определения темпа накопления остаточных деформаций земляного полотна. Для этих целей в каждой точке створа строят зависимость развития остаточной деформации от пропущенного тоннажа.

На основе результатов исследований сопоставлены остаточные деформации земляного полотна и темпы их накопления (Рис. 7–10).

В качестве показателя, отражающего равномерность остаточной деформации, принимают следующие показатели: среднеквадратическое отклонение остаточной деформации основной площадки земляного полотна от средней величины в пределах рассматриваемого экспериментального участка, коэффициент вариации. Данные параметры вычисляются на основе статистической обработки результатов измерений по известным в математической статистике формулам (Таблица 2).



Рис. 7. Накопление остаточной деформации на контрольном участке



Рис. 8. Накопление остаточной деформации на экспериментальном участке

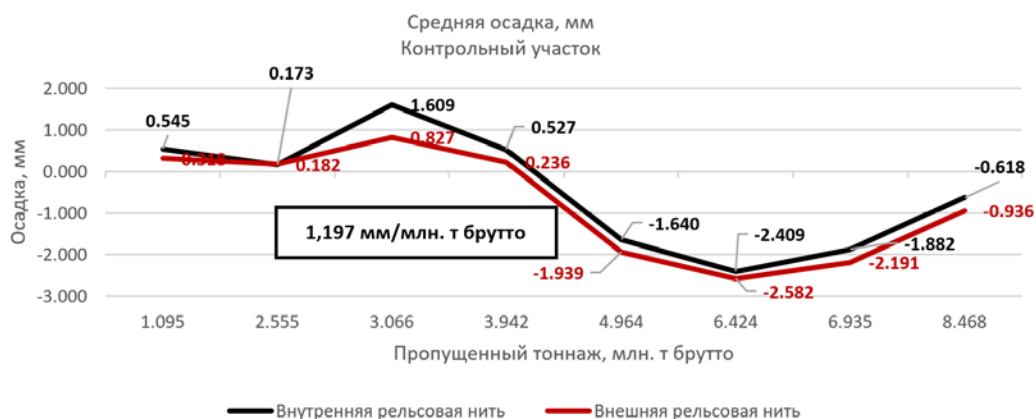


Рис. 9. Интенсивность накопление остаточной деформации на контрольном участке

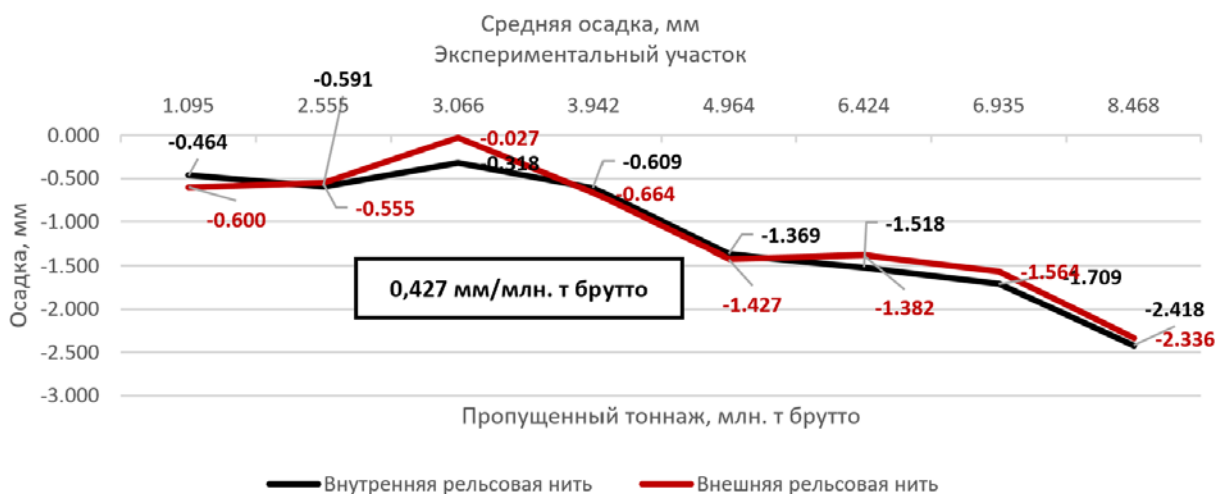


Рис. 10. Интенсивность накопление остаточной деформации на экспериментальном участке

Анализ результатов по оценке остаточных деформаций грунтовых марок также показывает формирование явления морозного пучения грунтов:

- на контрольном участке в период с января по март наблюдается пучение грунта (накопленная деформация достигает значений +5,2 мм); после 25 марта 2025 года наблюдаются попеременные процессы: осадки (до -4,11 мм и вспучивания грунта до 0,9 мм);
- на экспериментальном участке в период с января по февраль наблюдается незначительное пучение грунта (накопленная деформация достигает значений +0,9 мм); после 27 февраля 2025 года процессы пучения не зафиксированы.

В поперечном направлении:

- на контрольном участке зафиксировано поднятие отметки грунта до +4,3 мм;
- на экспериментальном участке процессы пучения не зафиксированы.

На Рис. 11 приведены значения остаточных деформаций деформационных марок между четвертым и пятым циклами измерений, что соответствует периоду 11.03.2025 – 25.03.2025. В процессе анализа результатов накопления остаточной деформации учитывались погодные условия на участке в период испытаний. График изменения температуры воздуха, количества осадков на период наблюдений приведены на Рис. 12. Согласно полученным данным в период между четвертым и пятым циклами измерений происходит сезонные процессы оттаивания – промерзания грунтов. Проведенный анализ показывает меньшее влияние природно-климатических факторов на накопление остаточных деформаций, в частности пучения грунтов земляного полотна, при наличии в конструкции асфальтобетонного слоя.

**Оценка равномерности остаточной деформации
(по внешней рельсовой нити)**

| <i>Участок / цикл</i> | <i>Средняя величина остаточной деформации, мм</i> | <i>Среднеквадратическое отклонение остаточной деформации от средней величины</i> | <i>Коэффициент вариации</i> |
|---------------------------|---|--|-----------------------------|
| Контрольный участок | | | |
| Цикл 1 | 0.32 | 0,53 | 1,66 |
| Цикл 2 | 0.18 | 1,58 | 5,26 |
| Цикл 3 | 0.83 | 2,00 | 1,98 |
| Цикл 4 | 0.24 | 1,33 | 4,6 |
| Цикл 5 | -1.94 | 1,13 | 0,58 |
| Цикл 6 | -2.58 | 1,17 | 0,46 |
| Цикл 7 | -2.19 | 1,06 | 0,47 |
| Цикл 8 | -0.94 | 0,81 | 0,87 |
| Экспериментальный участок | | | |
| Цикл 1 | -0.6 | 0,45 | 0,75 |
| Цикл 2 | -0.55 | 0,45 | 0,80 |
| Цикл 3 | -0.33 | 0,36 | 1,11 |
| Цикл 4 | -0.66 | 0,29 | 0,44 |
| Цикл 5 | -1.43 | 1,03 | 0,72 |
| Цикл 6 | -1.38 | 0,95 | 0,69 |
| Цикл 7 | -1.56 | 0,50 | 0,32 |
| Цикл 8 | -2.34 | 0,96 | 0,41 |

Заключение

Абсолютные значения остаточных деформаций земляного полотна составили:

- на участке устройства подбалластного асфальтобетонного слоя – (-4,9 мм);
- на контрольном участке – (-3,6 мм).

Темп накопления остаточных деформаций составил:

- на участке устройства подбалластного асфальтобетонного слоя – 0,427 мм / млн. тонн брутто пропущенного тоннажа;
- на контрольном участке – 1,197 мм / млн. тонн брутто пропущенного тоннажа.

Неравномерность остаточных деформаций земляного полотна:

- на участке устройства подбалластного асфальтобетонного слоя коэффициент вариации находится в диапазоне 0,32...1,11;
- на контрольном участке коэффициент вариации находится в диапазоне 0,47...5,26.

На участке с асфальтобетоном процессы пучения грунтов земляного полотна практически отсутствуют, в продольном направлении наблюдается стабильное положение рельсовых нитей.

Обеспечивается стабильность земляного полотна и балластного слоя за счет снижения величины накопленной остаточной деформации основной площадки земляного полотна.

Из всего выше сказанного следует, что устройство подбалластного слоя из асфальтобетона обеспечивает гидроизоляцию подстилающих грунтов земляного полотна,

соответственно, практически сводит к минимуму риски появления деформаций морозного пучения, улучшает влажностный режим подстилающих грунтов, минимизирует снижение их прочностных и деформационных свойств в годовом цикле, обеспечивая тем самым повышение несущей способности, устойчивости земляного полотна и обеспечение стабильности рельсовой колеи с наработкой тоннажа.

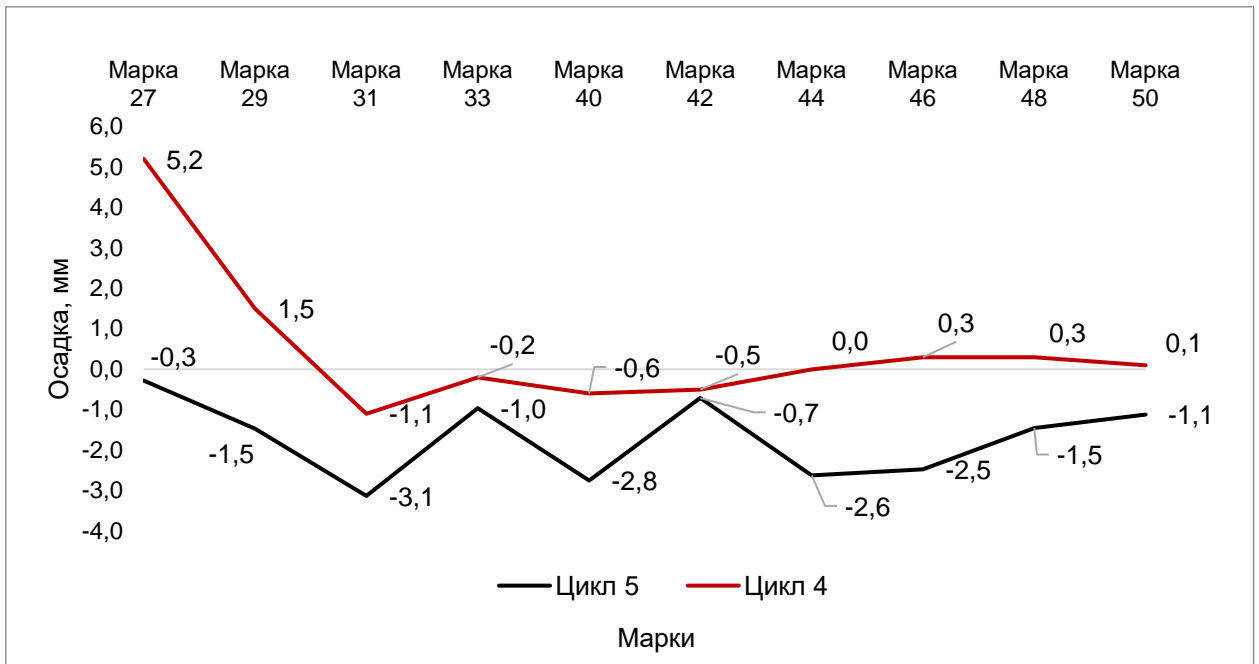


Рис. 11. Процесс сезонного пучения грунтов на контрольном участке

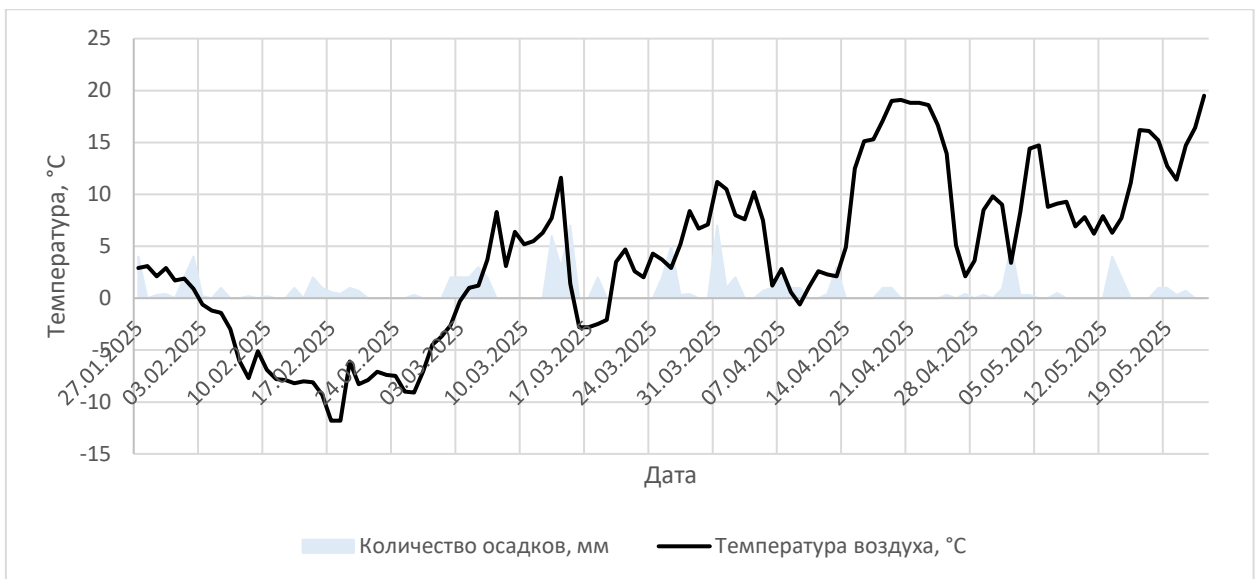


Рис. 12. График изменения температуры воздуха, количества осадков на период наблюдений

Список литературы

1. Cao Taiping. Study on Frost Heave Deformation Characteristics of Railway Subgrade in Seasonal Frozen Soil Region // Railway Investigation and Surveying. 2019. 45(01). P. 59-62. (in Chinese).
2. CAI De-gou. Test on Frost Heaving Spatial-Temporal Distribution of High Speed Railway Subgrade in Seasonal Frozen Soil Region // China Railway Science. 2016. 37(03). P. 16-21. (in Chinese).

3. Luo Qinglin. Frost Heave Prevention Technology of Lanzhou-Xinjiang Passenger Dedicated Line // High Speed Railway Technology. 2017. 8(S1). P. 132-139. (in Chinese).
4. Li, D., Rose J. G., LoPresti J. Test of hot-mix asphalt trackbed over soft subgrade under heavy axle loads // Technology Digest – Timely Technology Transfer. 2001. Vol. 01. P. 9.
5. Колос, А.Ф. Эффективность применения подбалластного слоя из асфальтобетона в конструкциях пути / А.Ф. Колос, Е.Н. Симчук, Н.В. Быстров, Е.И. Шехтман, В.А. Черняева, Я.В. Мельник, С. Ван // Путь и путевое хозяйство. 2023. № 12. С. 23-26.
6. Афонин Д.А., Богомолова Н.Н., Брын М.Я., Никитчин А.А. Опыт геодезического контроля деформаций железнодорожных насыпей при испытаниях тяжеловесных вагонов // Инженерные изыскания. 2019. Т. 13. № 4. С. 60-68.

References

1. Cao Taiping. Study on Frost Heave Deformation Characteristics of Railway Subgrade in Seasonal Frozen Soil Region / Cao Taiping // Railway Investigation and Surveying. 2019. 45(01). P. 59-62. (in Chinese).
2. CAI De-gou. Test on Frost Heaving Spatial-Temporal Distribution of High Speed Railway Subgrade in Seasonal Frozen Soil Region / CAI De-gou // China Railway Science. 2016. 37(03). P. 16-21. (in Chinese).
3. Luo Qinglin. Frost Heave Prevention Technology of Lanzhou-Xinjiang Passenger Dedicated Line / Luo Qinglin // High Speed Railway Technology. 2017. 8(S1). P. 132-139. (in Chinese).
4. Li, D., Rose J. G., LoPresti J. Test of hot-mix asphalt trackbed over soft subgrade under heavy axle loads // Technology Digest – Timely Technology Transfer. 2001. Vol. 01. P. 9.
5. Kolos, A.F. et. al. The effectiveness of using a ballast layer of asphalt concrete in track structures / A.F. Kolos, E.N. Simchuk, N.V. Bystrov, E.I. Shekhtman, V.A. Chernyaeva, Ya.V. Melnik, S. Van Track and track management. 2023. No. 12. pp. 23-26.
6. Afonin D.A., Bogomolova N.N., Bryn M.Ya., Nikitchin A.A. Experience of geodetic control of railway embankment deformations during testing of heavy wagons // Engineering surveys. 2019. Vol. 13. No. 4. pp. 60-68.