



ТАУ-КЕН ІСІ
ГОРНОЕ ДЕЛО
MINING

DOI 10.51885/1561-4212_2021_1_30
МРНТИ 52.13.04

Б. Апшикур¹, Т.Т. Ипалаков¹, М.М. Алимкулов², А.К. Капасов¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

E-mail: bake.ab@mail.ru

E-mail: Tpalakov@ektu.kz

¹*E-mail:* azamat040594@mail.ru*

²Академия логистики и транспорта, г. Алматы, Казахстан

E-mail: alimkulov_murat@mail.ru

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕРХА ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА,
УСИЛЕННОГО НЕТКАНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ, С УЧЕТОМ СЕЗОННОЙ
ИЗМЕНЧИВОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ**

**ТОПЫРАҚТЫҢ МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНІҢ МАУСЫМДЫҚ ӨЗГЕРГІШТІГІН
ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП, ТОҚЫМА ЕМЕС МАТЕРИАЛДАРМЕН КҮШЕЙТІЛГЕН ЖЕР
ТӨСЕМІНІҢ ЖОҒАРҒЫ ЖАҒЫНЫҢ КЕРНЕУЛІ-ДЕФОРМАЦИЯЛАНҒАН ЖАҒДАЙЫ**

**STRESS-STRAIN STATE OF THE TOP OF THE ROADBED REINFORCED WITH
NON-WOVEN MATERIALS, TAKING INTO ACCOUNT THE SEASONAL VARIABILITY
OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE SOIL**

Аннотация. Несмотря на существенные затраты АО «НК «ҚТЖ» по стабилизации земляного полотна, доля деформирующегося земляного полотна в общей длине дорог превышает 10 %. Это свидетельствует о системной причине сложившегося положения, когда почти повсеместно применяются одинаковые поперечные профили земляного полотна независимо ни от условий эксплуатации, ни от климатических условий региона, где построена железная дорога. Поэтому гипотеза исследования обеспечения стабильности основной площадки железнодорожного земляного полотна является весьма актуальной.

Целью данной работы является выдача рекомендаций по усилению верха железнодорожного земляного полотна неткаными материалами для обеспечения его стабильности для различных регионов Казахстана на основании исследования напряженно-деформированного состояния грунтов земляного полотна.

Методы исследований базируются на положениях теории упругости, механики грунтов, теории тепломассопереноса, математической статистики при обработке данных экспериментов и измерений. Для расчетов напряженно-деформируемого состояния верха земляного полотна рекомендуется использовать расчетную систему PLAXIS 3D, для упругого деформирования грунта – расчетную систему COSMOS/M.

Практическая и теоретическая значимость работы заключается в предложенных схемах усиления рабочей зоны железнодорожного земляного полотна неткаными материалами, разработанных для трех климатических зон Казахстана – Южной, Средней и Северной (по классификации А.Д. Омарова) с учетом интенсивности оттаивания и консолидации грунтов в весенний период, и в разработке рекомендаций по усилению в этих зонах основной площадки земляного полотна применением подбалластных слоев из дренирующих грунтов; научно установлены

условия стабильности основной площадки земляного полотна при сезонном оттаивании грунтов и оценено влияние нетканых материалов и георешеток на напряженно-деформированное состояние верха земляного полотна.

Ключевые слова: напряженно-деформированного состояния земляного полотна, метод конечных элементов, георешетка, геосетка, основная площадка земляного полотна.

Аңдатпа. «ҚТЖ «ҰК» АҚ Деформацияланатын жер төсемін тұрақтандыру бойынша елеулі шығындарына қарамастан, оның жолдардың жалпы ұзындығындағы үлесі 10 %-дан асады және бұл жер төсемінің пайдалану жағдайларына да, темір жол салынған өңірдің климаттық жағдайларына да қарамастан, жер төсемінің бірдей көлденең профилдері барлық жерде дерлік қолданылатын қалыптасқан жағдайдың жүйелі себебін көрсетеді, сондықтан темір жол жер төсемінің негізгі алаңының тұрақтылығын қамтамасыз етуді зерттеу гипотезасы өте өзекті болып табылады.

Осы жұмыстың мақсаты Қазақстанның әртүрлі өңірлері үшін тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін темір жол жер төсемінің жоғарғы жағын тоқыма емес материалдармен күшейту жөніндегі іс-шараларды есептеулермен және тәжірибелермен негіздеу болып табылады.

Зерттеу әдістері серпімділік теориясының, топырақ механикасының, жылу мен масса алмасу теориясының, эксперименттер мен өлшеулер деректерін өңдеудегі математикалық статистиканың ережелеріне негізделген. Жер төсемінің үстіңгі қабатының кернеулі-деформацияланған күйін есептеу үшін PLAXIS 3D есептеу жүйесін немесе топырақтың серпімді деформациясы үшін COSMOS/M есептеу жүйесін пайдалану ұсынылады.

Жұмыстың практикалық және теориялық маңыздылығы Қазақстанның үш климаттық аймағы – Оңтүстік, орта және Солтүстік (А.Д. Омаровтың классификациясы бойынша) үшін өзірленген нетканды материалдармен темір жол жер төсемінің жұмыс аймағын нығайтудың ұсынылған схемаларында жатыр. Көктемгі кезеңде топырақтың еруі мен консолидациясының қарқындылығын ескере отырып және осы аймақтарда жер төсемінің негізгі алаңының балласты қабаттарын құрғататын топырақтарды қолдану арқылы күшейту жөніндегі ұсыныстарды өзірлеуде топырақтың маусымдық еруі кезінде жер төсемінің негізгі алаңының тұрақтылық шарттары ғылыми түрде белгіленді және топырақ төсемінің үстіңгі қабатының кернеулі-деформацияланған жағдайына нетканды материалдар мен геосеткалардың әсері бағаланды.

Түйін сөздер: ер төсемінің кернеулі-деформацияланған күйі, соңғы элементтер әдісі, геотор, жер төсемінің негізгі алаңы.

Abstract. Despite the significant costs of JSC «NC «ҚТЖ» to stabilize the deforming roadbed, its share in the total length of roads exceeds 10% and this indicates the systemic reason for the current situation, when almost everywhere the same transverse profiles of the roadbed are used regardless of the operating conditions or the climatic conditions of the region where the railway is built, therefore, the hypothesis of the study of ensuring the stability of the main platform of the railway roadbed is very relevant.

The purpose of this work is to justify by calculations and experiments the stress-strain state of the soil of the roadbed measures to strengthen the top of the railway roadbed with non-woven materials to ensure its stability for various regions of Kazakhstan.

The research methods are based on the principles of the theory of elasticity, soil mechanics, the theory of heat and mass transfer, and mathematical statistics in the processing of experimental and measurement data. For calculations of the stress-strain state of the top of the roadbed, it is recommended to use the PLAXIS 3D calculation system or the COSMOS/M calculation system for elastic deformation of the ground.

The practical and theoretical significance of the work lies in the proposed schemes for strengthening the working area of the railway roadbed with non-woven materials, developed for three climatic zones of Kazakhstan – Southern, Middle and Northern (according to the classification of A.D. Omarov) Taking into account the intensity of thawing and consolidation of soils in the spring period and in the development of recommendations for strengthening the main area of the roadbed in these zones by using sub-ballast layers of draining soils, the conditions for the stability of the main area of the roadbed during seasonal thawing of soils are scientifically established and the influence of non-woven materials and geogrids on the stress-strain state of the top of the roadbed is estimated.

Keywords: stress-strain state of the roadbed, finite element method, geogrid, the main site of the roadbed.

Введение. Данная работа выполнена в соответствии с научно-технической проблемой «Исследовать напряженно-деформированное состояние сложноустроенных оснований автомобильных и железных дорог при воздействии подвижных нагрузок». В Послании Президента РК Н.А. Назарбаева «Казахстан-2030. Процветание, безопасность и улучшение благосостояния всех казахстанцев» одним из важнейших приоритетов определено совершенствование развития транспорта и связи. Стабильная работа железнодорожного транспорта прямо зависит от надежности железнодорожного пути и его нижнего строения – земляного полотна.

В последние годы на железных дорогах РК проведены значительные мероприятия по усилению верхнего строения пути. Почти повсеместно внедрен современный рельс типа Р65, а также широко внедряются железобетонные шпалы, упругие промежуточные рельсовые скрепления, щебеночный балласт. Увеличивается полигон бесстыкового пути. Известно, что рельсовая колея бесстыкового пути требует стабильности подрельсового основания – балластного слоя и земляного полотна.

К сожалению, при строительстве и эксплуатации магистральных железных дорог недостаточно внимания уделяется усилению фундамента железнодорожного пути – земляному полотну. В настоящее время наибольшее число остаточных деформаций земляного полотна приходится на его основную площадку, которая непосредственно контактирует с балластным слоем верхнего строения пути.

На ряде участков при введении поездов с более высокими осевыми нагрузками или при существенном повышении скоростей движения железнодорожное земляное полотно подвергается интенсивным деформациям и нуждается в усилении. Традиционная нормативная база расчетов железнодорожного земляного полотна не учитывает изменение температурно-влажностного режима земляного полотна в течение года, не дифференцированы технические требования по устройству верха железнодорожного земляного полотна в разных климатических зонах РК.

Повышение осевой нагрузки, введение шести- и восьмиосных грузовых вагонов существенно повышают величину рабочей зоны земляного полотна. Термин «рабочая зона» земляного полотна является новым. Он отражает изменения в условиях эксплуатации железных дорог на современном этапе (повышение осевых нагрузок, скоростей движения, введение большегрузных вагонов, создание кольцевых железнодорожных маршрутов). Необходимо включение этого термина в нормативы проектирования железнодорожного земляного полотна.

Возникла практическая потребность в анализе напряженно-деформированного состояния грунтов «рабочей зоны», который позволил бы обосновать способы усиления верха земляного полотна для обеспечения стабильности его основной площадки. Несмотря на существенные затраты АО «НК «КТЖ», доля стабилизированного земляного полотна в общей длине дорог составляет около 10 %. Это свидетельствует о системной причине сложившегося положения, когда почти повсеместно применяются одинаковые поперечные профили земляного полотна независимо ни от условий эксплуатации, ни от климатических условий региона, где построена железная дорога. Поэтому гипотеза исследования обеспечения стабильности основной площадки железнодорожного земляного полотна является весьма актуальной.

Целью данной работы является выдача рекомендаций по усилению верха железнодорожного земляного полотна неткаными материалами для обеспечения его стабильности для различных регионов Казахстана на основании исследований напряженно-деформи-

рованного состояния грунтов земляного полотна.

Материалы и методы исследования. Для достижения поставленной цели рассмотрены и решены следующие задачи:

– анализ современного состояния верха земляного полотна магистральных железных дорог АО «НК «ҚТЖ» и основных причин повреждений основной площадки земляного полотна;

– расчетная оценка динамики изменения напряженно-деформированного состояния грунтов рабочей зоны земляного полотна при повышении осевой вагонной нагрузки;

– расчетная оценка напряженно-деформированного состояния нетканых материалов в теле земляного полотна;

– экспериментальное исследование теплофизических характеристик грунтов верха земляного полотна и расчетная оценка интенсивности оттаивания грунтов в регионах Казахстана;

– обоснование мер усиления верха земляного полотна железных дорог неткаными материалами с учетом сезонной изменчивости механических свойств грунтов и напряженно-деформированного состояния насыпей.

Методика исследований базируется на положениях теории упругости, механики грунтов, теории тепломассопереноса, математической статистики при обработке данных экспериментов и измерений. Для расчетов напряженно-деформируемого состояния верха земляного полотна рекомендуется использовать расчетную систему PLAXIS 3D, для упругого деформирования грунта – расчетную систему COSMOS/M.

Научная значимость работы заключается в следующем:

– дана количественная оценка влияния повышения осевых нагрузок, введения новых типов грузовых вагонов (шести- и восьмиосных) на величину рабочей зоны железнодорожного земляного полотна;

– показано, что увеличение осевой вагонной нагрузки меняет характер напряженно-деформированного состояния верха насыпи и при определенных условиях приводит к переходу от уплотнения грунтов ядра насыпи к образованию поверхностей разрушения верха насыпи;

– установлены условия стабильности основной площадки земляного полотна при сезонном оттаивании грунтов и оценено влияние нетканых материалов и георешеток на напряженно-деформированное состояние верха земляного полотна;

– разработаны технические и технологические рекомендации по усилению рабочей зоны земляного полотна с учетом климатических условий регионов Казахстана.

Практическая ценность работы заключается в предложенных схемах усиления рабочей зоны железнодорожного земляного полотна неткаными материалами, разработанных для трех климатических зон Казахстана – Южной, Средней и Северной (по классификации А.Д. Омарова) [1-2] с учетом интенсивности оттаивания и консолидации грунтов в весенний период, и в разработке рекомендаций по усилению в этих зонах основной площадки земляного полотна применением подбалластных слоев из дренирующих грунтов; научно установлены условия стабильности основной площадки земляного полотна при сезонном оттаивании грунтов и оценено влияние нетканых материалов и георешеток на напряженно-деформированное состояние верха земляного полотна.

Литературный обзор. Разработке методов усиления основной площадки уделялось и уделяется в настоящее время много внимания отечественных и зарубежных ученых и специалистов [1-16].

Анализ развития данной проблемы позволяет выделить следующие основные направ-

ления её решения:

- усиление верхнего строения пути для распределения поездных нагрузок на большее количество шпал и, следовательно, уменьшению их силовых воздействий на основную площадку;

- устройство плитного железобетонного подрельсового основания, позволяющего существенно (в 1,5-2 раза) уменьшить удельное давление на земляное полотно за счет ликвидации пиков давления и распределения давления на большую площадь;

- устройство подбалластных слоев из более прочного дренирующего грунта;

- устройство подбалластных слоев в комбинации с неткаными материалами.

Опыт эксплуатации первой в России железной дороги общего пользования, построенной без балластного слоя, убедительно показал, что между рельсошпальной решеткой и грунтом основной площадки земляного полотна необходим переходный балластный слой. Прочность материалов конструкции пути должна плавно убывать сверху вниз по мере распределения давления на большую площадь.

Применяемые в настоящее время мероприятия по усилению основной площадки земляного полотна сводятся к следующим:

- повышение прочности грунтов основной площадки земляного полотна или песчаного подбалласта различными добавками;

- усиление конструкции верхнего строения пути укладкой бетонных или железобетонных плит или устройство блочного основания пути;

- укрепление балластного слоя вяжущими;

- улучшение виброзащитных свойств пути укладкой упругих матов или прокладок под шпалы;

- уменьшение инфильтрации атмосферных осадков в грунты земляного полотна;

- укладка теплоизолирующих покрытий для устранения или уменьшения пучинообразования;

- укладка под балластным слоем ковра нетканых материалов совместно с георешетками;

- устройство водоотведения;

- укладка подбалластных плит;

- вырезка балластных углублений (балластных лож и корыт):

- замена глинистых грунтов верха земляного полотна дренирующими грунтами.

Степень изученности и разработанности этих методов различна.

Анализ эффективности применения способов ликвидации балластных углублений в основной площадке посредством устройства поперечных дренажей, прорезей, сплошной вырезкой балластных корыт или вырезкой бортов с заменой удаленного грунта дренирующим материалом, проведенный еще в 1965 г. Л.А. Смоляницким и И.И. Меркуловым [3], показал, что они являются малоэффективными и трудоемкими.

Большое число исследований выполнено по способам укрепления грунтов основной площадки земляного полотна или песчаного подбалласта с применением различных добавок: гашеной и негашеной извести, доменного гранулированного шлака с жидким стеклом [3], золы уноса [4]. Специалистами ДИИТа [5] испытывалась возможность цементации нижней части балластного слоя инъектированием. Для успешного нагнетания цементного раствора коэффициент фильтрации заполнителя балластных углублений должен быть не менее 100-150 м/сутки. Для омоноличивания балластных углублений с коэффициентом фильтрации 50-70 м/сутки было предложено использовать раствор лигносульфоната, который не содержит твердой фазы.

Для снижения неравномерного накопления остаточных деформаций основной площадки земляного полотна и ограничения горизонтальных деформаций балластной призмы [6] была предложена укладка на основную площадку земляного полотна по слою дренающего материала толщиной 10-15 см четырехметровой железобетонной плиты с бортами высотой 30-35 см. Внутри плиты на слое щебня толщиной 15 см размещалась рельсошпальная решетка с железобетонными шпалами.

В целях уменьшения интенсивности накопления остаточных деформаций балластного слоя и его засоряемости во ВНИИЖТе [7] проведены испытания по укреплению балластного слоя вяжущими материалами.

В 1986 г. В.Ф. Барабошиным и Н.И. Ананьевым исследовалась эффективность применения упругих прокладок различной толщины под подошвой шпал для уменьшения амплитуд колебаний шпал в балласте. Применение упругих резиновых прокладок позволяет уменьшить уровень динамических сил взаимодействия колес и рельсов и интенсивность накопления остаточных деформаций пути. Полученные зависимости накопления остаточных осадков шпал от пропущенного тоннажа позволили сделать вывод, что устройство дополнительной упругой связи по постели шпалы является существенным резервом повышения стабильности пути и было рекомендовано в зоне рельсовых стыков и уравнительных пролетов бесстыкового пути.

Предлагалась также укладка упругих матов между балластом и верхом земляного полотна, наклейка на подошву шпал упругих тонких плит из прессованной смеси каучука и полиуретана, устройство резиновой оболочки для шпал и другие способы, уменьшающие воздействие поездной нагрузки на грунты земляного полотна.

Несмотря на разработку большого числа способов усиления основной площадки земляного полотна, их применение пока не стало обязательным и они применялись в единичных случаях. К числу наиболее применимых методов относится укладка пенопластовых покрытий на основную площадку земляного полотна в целях ликвидации или уменьшения пучинообразования и повышения несущей способности в период оттаивания грунтов. Этот метод широко известен, разработаны технические указания по его применению [8].

Для отвода воды с основной площадки земляного полотна д.т.н. П.И. Дыдышко предложена и применяется на железных дорогах укладка нетканых материалов типа Дорнит. Если бы качество Дорнита было лучше (имеется в виду недостаточная сопротивляемость растяжению), этот материал мог бы стать эффективным решением проблемы осушения грунта основной площадки земляного полотна и повышения за счет этого его механических свойств.

Аналогичные меры повышения несущей способности основной площадки применяют на дорогах Германии, Франции, Англии, Италии и др. Важным отличием является более высокое сопротивление разрыву зарубежных нетканых материалов (примерно на порядок выше, чем у Дорнита) и одновременное применение георешеток, обеспечивающих восприятие поперечных сил на контакте балласта и земляного полотна.

За рубежом фирмой «Пляссер и Тойрер» был создан специальный поезд ПМ-200 для комплексного оздоровления основной площадки земляного полотна и балластного слоя, который состоит из нескольких вагонов и способен за 6-ти часовое окно выполнить работы на длине 150 м. Несмотря на большую энерговооруженность (машины и механизмы поезда имеют суммарную мощность более 3000 кВт), достигнутая поездом выработка невелика.

Аналогичную систему машин и механизмов желательно иметь и на железных дорогах Республики Казахстан, но с большей производительностью, так как в Казахстане много мест на пути, где необходим ремонт земляного полотна.

Анализ методов, позволяющих снизить интенсивность динамических воздействий на грунты основной площадки земляного полотна, показывает, что решение этой задачи возможно как за счет конструктивных изменений в верхнем строении пути в целях уменьшения динамических сил на контакте колеса и рельса, так и с помощью защитных слоев в балластном или подбалластном слое. Однако полностью избежать неравномерности нагрузки основной площадки земляного полотна только за счет конструкции верхнего строения пути затруднительно в связи с неравной жесткостью подбалластного основания как в поперечном сечении пути, так и вдоль него.

Удельный вес рельсошпальной решетки, балласта и земляного полотна в процентах в общей деформации пути для соответствующих модулей (табл. 1) по данным исследований проф., д.т.н. А.Я. Когана [9] представлен в табл. 1.

Таблица 1. Общие деформации для модулей пути

Модуль пути, МПа	Рельсошпальная решетка, %	Балласт, %	Земляное полотно, %
23	9	11	80
28	11	17	72
47	23	25	52

С уменьшением модуля упругости пути увеличивается доля участия земляного полотна в общей деформации пути. За счет этой деформации растут динамические нагрузки в контакте колеса и рельса. Очевидно, что решить проблему повышения скоростей движения поездов без усиления земляного полотна невозможно [10-16].

По результатам исследований д.т.н., проф. В.Н. Данилова и А.Я. Когана, жесткость пути в зоне рельсовых стыков в 1,5-2,0 раза меньше, чем в середине звена. По данным д.т.н., проф. Э.П. Исаенко [17], сила динамического воздействия колес в зоне стыка в 3-4 раза больше, чем в середине звена. Неплотное опирание шпал на балласт, наличие люфтов под стыковыми шпалами приводит к неравномерной передаче нагрузок на основную площадку земляного полотна.

Применение различных геотекстильных материалов в целях стабилизации основной площадки земляного полотна используется на практике, но в основном для обеспечения водоотведения. Их эффективность с точки зрения снижения динамического воздействия в зонах неравномерных остаточных и упругих осадок пути ранее не исследовалась, не было оценено влияние прочностных и деформативных свойств разных геотекстильных материалов, не изучалось влияние глубины укладки прослоек в балластном слое на напряженное состояние основной площадки.

Недостаточно связаны имеющиеся рекомендации по усилению грунтов основной площадки земляного полотна с механическими свойствами грунтов и их температурно-влажностным режимом.

Незамеченными остаются повышение вагонных осевых нагрузок, применение шести- и восьмиосных вагонов, увеличение скоростей движения поездов.

За рубежом при строительстве магистральных и скоростных железных дорог нормируется осадка рельса под движущимся поездом [16]. Так, например, в Германии считается, что при высокоскоростном движении осадка рельса не должна быть более 1 мм. Если следовать выводам д.т.н., проф. А.Я. Когана [9], в этом случае упругая осадка земляного полотна должна быть менее 0,5 мм. Такие величины упругих осадок возможны при модуле пути около 80-100 МПа и модуле деформации Земляного полотна 40-60 МПа. Однако известно, что глинистые грунты Казахстана (по данным д.т.н., проф. А.Д. Омарова [1-2])

имеют модуль упругости менее 32 МПа. В этом случае неизбежны конструктивные мероприятия по усилению верха земляного полотна при строительстве и эксплуатации железных дорог АО «НК «ҚТЖ».

Для выполнения прочностных и теплофизических расчетов, отражают климатические условия регионов Казахстана, необходим, анализ и исследование именно теплофизических свойств местных грунтов, так как механические характеристики грунтов оснований железных дорог Казахстана исследованы и приведены в работах д.т.н., проф. А.Д. Омарова [1-2] и д.т.н., проф. Е.А. Исаханова [18].

Необходимо выполнить расчеты напряженно-деформированного состояния грунтов верха земляного полотна с использованием современных численных методов [19-20].

Имея в виду, что стабильность железнодорожного земляного полотна определяется как механическими свойствами грунтов, так и их температурно-влажностным режимом, в данной работе решаются следующие научные задачи:

- расчетная оценка напряженно-деформированного состояния нетканых материалов в теле земляного полотна,
- экспериментальное исследование теплофизических характеристик грунтов верха земляного полотна и расчетная оценка интенсивности оттаивания грунтов в регионах Казахстана.
- обоснование мер усиления верха земляного полотна железных дорог неткаными материалами с учетом сезонной изменчивости механических свойств грунтов и напряженно-деформированного состояния насыпей.

Решение этих научных задач позволит рекомендовать конструктивные меры усиления верха земляного полотна в Южной, Средней и Северной зонах Республики Казахстан.

Большая протяженность территории Республики Казахстан с севера на юг и с запада на восток при резко-континентальном климате приводит к большим различиям в промерзании грунтов и в длительности зимнего периода с устойчивым снежным покровом. Это позволяет выделить на территории республики зоны, существенно отличающиеся глубиной промерзания грунтов, количеством осадков за год и продолжительностью отрицательных температур воздуха.

Известно районирование территории Республики Казахстан по глубине промерзания грунтов, предложенное д.т.н., проф. А.Д. Омаровым [1] выделены территории с глубиной промерзания до 1 м – южная зона, до 2 м – средняя зона и более 2 м – северная зона (рис. 1).



Рисунок 1. Деление территории Казахстана по А.Д. Омарову:

- I – территория с глубиной промерзания до 1 м, II – территория с глубиной промерзания до 2 м,
III – территория с глубиной промерзания более 2 м

В северной зоне Казахстана глубина промерзания грунтов достигает 2,2-2,45 м, а длительность морозного периода достигает 5 месяцев, в то время как на юге Казахстана есть территории, на которых промерзание грунтов зимой менее 0,5 м.

Преобладающим типом грунтов в рассматриваемых зонах являются сероземы, пески и почвы горных районов (за исключением территории песчаных пустынь). Сероземы макропористы, отличаются высоким содержанием пылеватых частиц, преобладанием легких пылеватых суглинков и тяжелых пылеватых супесей. Они относятся к пучинистым и сильно пучинистым грунтам, легко размокают при увлажнении. При замерзании в них интенсивно проявляются мерзлотные процессы с переносом поровой влаги к границе промерзания. При оттаивании они резко снижают свою прочность (до 7 и более раз по сравнению с непромерзшим грунтом). В процессе оттаивания этих грунтов идет их консолидация и упрочнение, и к лету грунт вновь набирает утраченную весной прочность. В разных зонах Казахстана эти процессы захватывают разные по толщине слои грунта (в соответствии с глубиной сезонного промерзания).

В течение зимы-весны промерзание-оттаивание избыточно увлажненного грунта верха земляного полотна сопровождается морозным пучением грунта и образованием балластных лож и местных сплывов откосов в весеннее время. Повышенное увлажнение балластных лож (рис. 2) в просадочных грунтах приводит к формированию в верхней части земляного полотна грязевых мешков, серьезно осложняющих эксплуатацию железнодорожного пути.

Как правило, сплывы грунта откосов возникают при глубине оттаивания 0,3-0,8 м по плоскостям раздела оттаявшего и мерзлого грунта. При высоте насыпей до 4,0 м, отсыпанных на прочное основание, весной обычно местных сплывов грунтов откосов не происходит. Чаще всего они наблюдаются на насыпях высотой более 4-6 м.

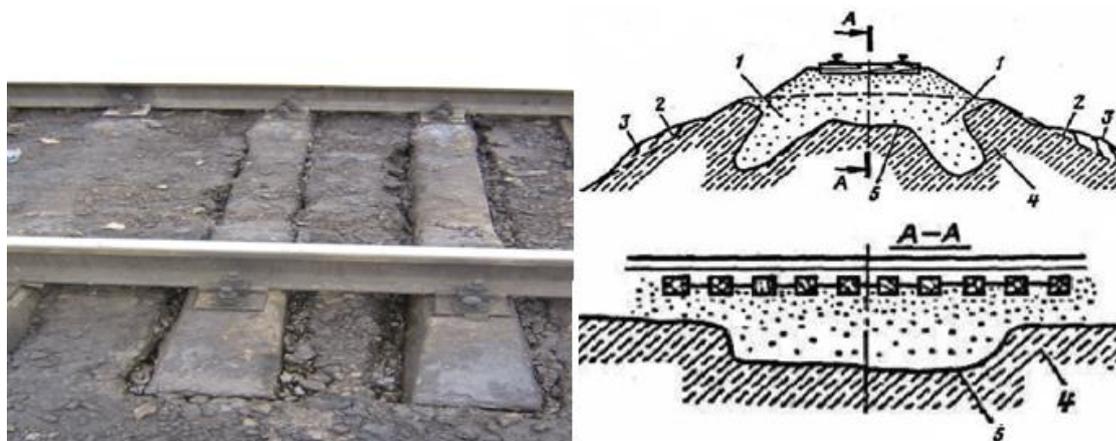


Рисунок 2. Повышенное увлажнение балластных лож: 1 – балластный мешок; 2 – построечный поперечный профиль; 3 – выпор грунта вследствие образования балластного мешка; 4 – глинистые грунты; 5 – контакт балласта и глинистых грунтов

При проектировании земляного полотна новых железных дорог Казахстана и усилении существующего «большого» земляного полотна необходимо учитывать как характеристики прочности местных грунтов, так и глубину их промерзания и высоту насыпей. При высоте насыпей из глинистых грунтов более 6 м целесообразны проверочные расчеты их прочности и устойчивости. Для новых железных дорог Казахстана актуальна разработка зональных поперечных профилей земляного полотна из глинистых грунтов для выше приведенных трех зон. В прошлом необходимость более детального учета грунтовых и климатических условий предлагалась рядом специалистов, но до последнего времени для территории Республики Казахстан проблема обеспечения стабильности земляного полотна железных дорог остается нерешенной.

В начале железнодорожного строительства в России (середина XIX века) техническими требованиями по строительству железных дорог определялось, что «высота балластной призмы должна быть не менее 1 аршина (72 см), чтобы исключить отпечатки шпал по верху земляного полотна». В настоящее время высота балластной призмы составляет 0,5-0,65 м. С учетом утвержденных нормативов ширины земляного полотна железных дорог по верху балластная призма не может значительно увеличиваться по высоте и проблема должна решаться за счет усиления верха земляного полотна.

На железных дорогах Европы, где глубина сезонного промерзания грунтов преимущественно менее 1 м, техническими требованиями определены меры, предотвращающие образование весной слабых прослоек грунта насыпей. Для этого ниже балластной призмы (по высоте близкой к 0,6 м) устраиваются из специальной дренирующей грунтовой смеси подбалластные слои толщиной 0,3-0,5 м, ниже которых может находиться глинистый грунт насыпи. Этот грунт под шпалой не промерзает зимой и не создает проблем с резкими просадками рельсовой колеи весной. Защитные слои под балластом выравнивают и снижают удельное давление от поездной нагрузки, защищают от дождевых осадков, от проникновения мелких пылеватых и глинистых частиц грунта в балласт, снижают амплитуды вибраций грунта при движении подвижного состава. Механические характеристики подбалластных слоев нормируются.

В странах Европы нормируется прочность подбалластных слоев, в России введены только нормы уплотнения грунтов в предположении, что эти грунты достаточно проч-

ные. Однако повышение осевых нагрузок и скоростей движения требует более определенного подхода для обеспечения стабильности насыпей: расчета их напряженно-деформируемого состояния и регламентации прочности применяемых грунтов. Если же местные грунты не имеют достаточной прочности, как, например, суглинки с модулем упругости 25-30 МПа, то необходимо их упрочнение или усиление самой конструкции железнодорожного земляного полотна.

На железных дорогах Германии для скоростей движения поездов выше 100 км/ч учитывается показатель качества – динамическая стабильность подшпального основания: V_{ef} (мм/с) – скорость колебаний материалов; K_{dyn} – динамический показатель, равный отношению значения динамической части нагрузки при заданной скорости к ее значению при скорости $V = 100$ км/ч.

Для эксплуатируемых дорог Европейской части СССР Аверочкиной М.В., Абрамовым Л.Т., Кочеровой Н.Д. (ВНИИЖТ) было установлено, что при суммарной толщине слоя балластных материалов 1,2-1,4 м от верха балластной призмы весенних пучинных просадок пути не наблюдается. Практически одновременно с указанными работами в ЦНИИСе было доказано, что при сооружении насыпей из тугопластичных глинистых грунтов под балластным слоем необходима укладка противодеформационных песчаных подушек толщиной 0,8-1,0 м в зависимости от крупности песка.

Реализация этих параметров для действующих линий за рубежом осуществляется при их капитальном ремонте или реконструкции пути. В качестве материала защитных слоев используются искусственно подобранные песчано-гравийные смеси. В последние годы начали широко применять синтетические материалы, разделяющие балластную призму и земляное полотно: ковры из нетканого материала, плиты из пенополистирола. Они препятствуют свободному увлажнению верха земляного полотна, загрязнению балласта снизу и служат теплоизоляторами (плиты пенополистирола и др.).

В России строительными нормами СТН Ц 01 95 и СНиП 32 01 95 регламентировано усиление балластной конструкции укладкой защитного слоя из дренирующего грунта, в том числе совместно с геотекстилем (нетканым материалом) и плитами пенополистирола. Толщина этого слоя должна назначаться расчетом, но не менее 0,8-1,0 м для суглинков и глин и 0,5-0,7 м для супесей.

Критической расчетной зоной является не только «новая» основная площадка, служащая основанием для верхнего строения пути и в наибольшей степени воспринимающая воздействия от поездной нагрузки, но и граница раздела дренирующих грунтов и глинистых грунтов собственно земляного полотна. На новых линиях это нижняя граница защитного слоя, а на существующих – положение деформированной первоначальной основной площадки земляного полотна. Расчетные методы должны предусматривать как недопущение пластических деформаций глинистого грунта земляного полотна, так и ограничение величины деформаций под воздействием морозного пучения.

Для расчетов напряженно-деформируемого состояния верха земляного полотна рекомендуется использовать расчетную систему PLAXIS 3D, для упругого деформирования грунта – расчетную систему COSMOS/M [17].

Рассмотрим в качестве примера распределение напряжений в рабочей зоне земляного полотна, обращая особое внимание на зону контакта балластного слоя и верха земляного полотна (рис. 4 и 5). На рис. 3 показана конечно-элементная модель железнодорожной насыпи, отсыпанной из суглинка, на рис. 6-8 приведено распределение вертикальных и поперечных напряжений и деформаций от подвижного состава при осевой нагрузке 23,5 тс и скорости движения 90 км/ч. Под слоем балласта по оси пути возник-

кают растягивающие напряжения величиной более 0,8 кг/см². В этой зоне неизбежны деформации грунта в направлении оси X и поэтому требуется укладка слоя геотекстиля, который воспримет растягивающие напряжения на контакте балласта и верха земляного полотна.

Интересно, что по оси пути в зоне контакта балласта и верха земляного полотна напряжения по оси X превышают вертикальные напряжения (по оси Y). Как показали расчеты, в контактной зоне между песчаной подушкой и верхом земляного полотна из глинистых грунтов возможно перемещение грунта от оси пути к обочине. Чтобы обеспечить стабильность грунта, под балластной призмой необходима укладка слоя нетканного материала (геотекстиля).

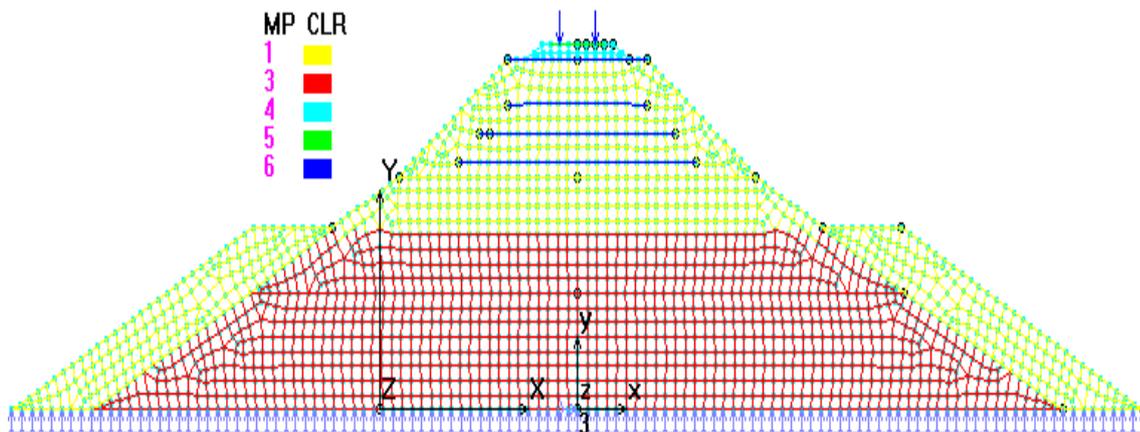
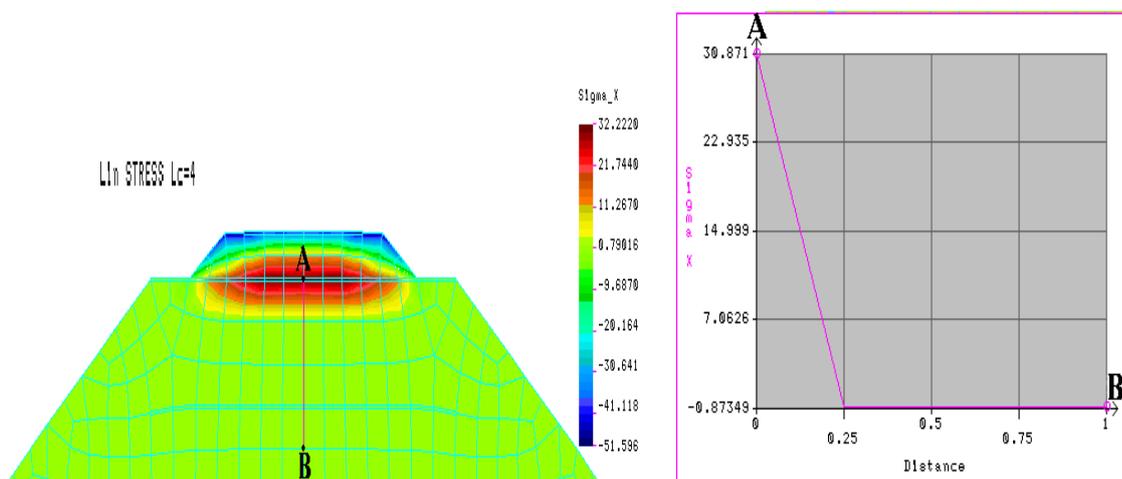


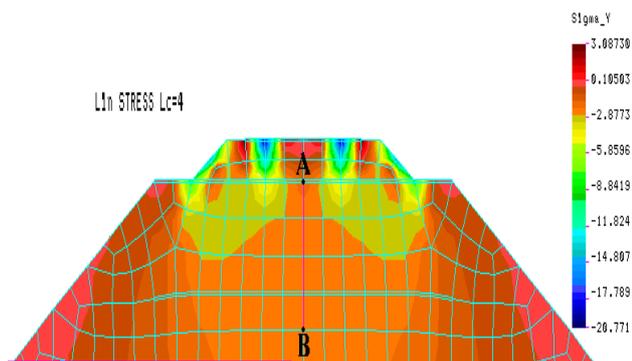
Рисунок 3. Конечно-элементная схема железнодорожного пути



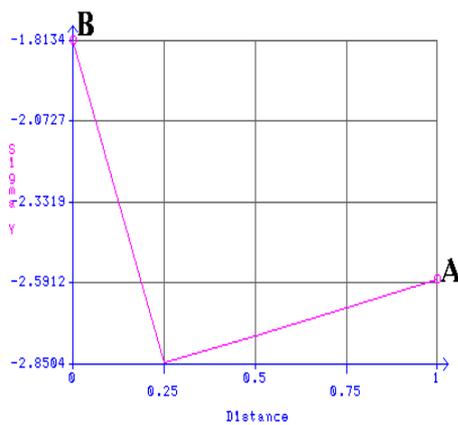
Распределение напряжений по оси X

Распределение напряжений по линии А-В

Рисунок 4. Распределение напряжений в рабочей зоне земляного полотна



Распределение напряжений по оси Y



Распределение напряжений по линии А-В

Рисунок 5. Напряженное состояние верха земляного полотна от поездной нагрузки

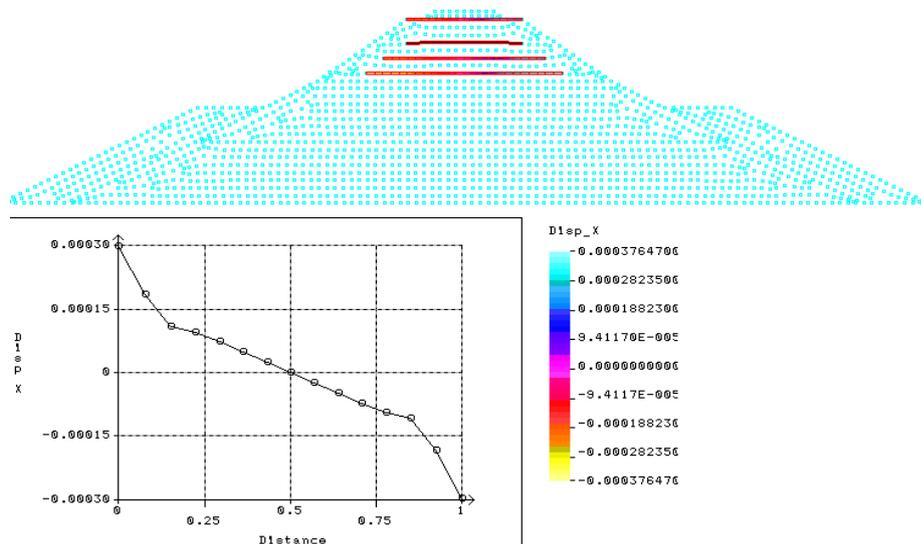


Рисунок 6. Растяжение второго слоя нетканого материала, уложенного на геосетку

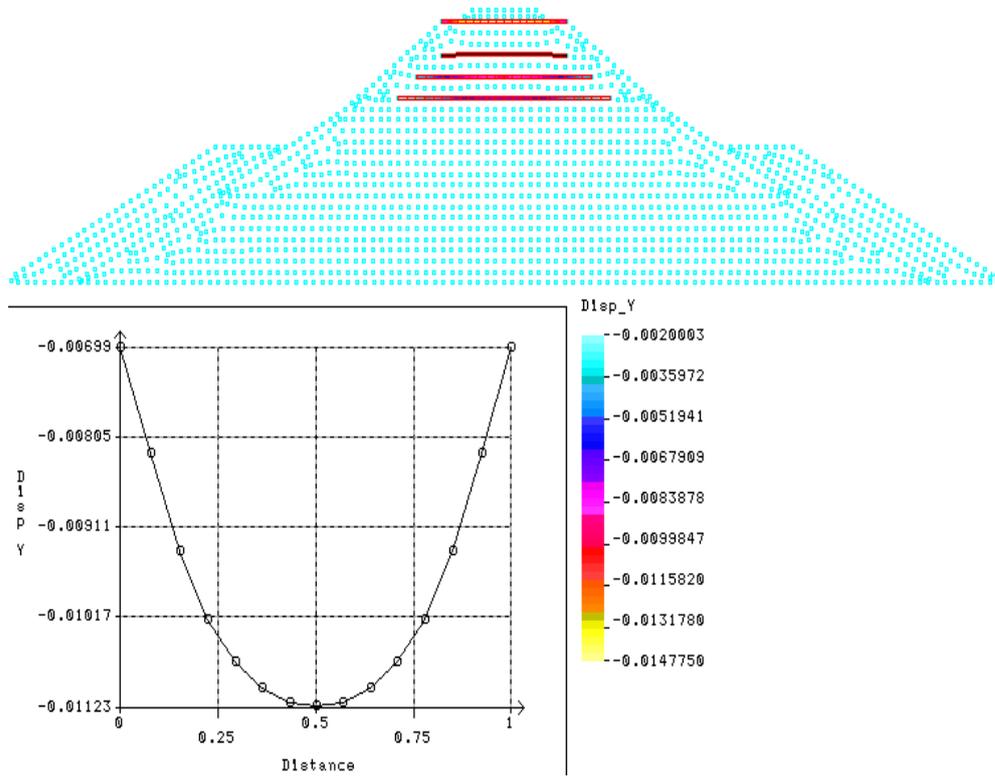


Рисунок 7. Вертикальное перемещение второго слоя геотекстиля

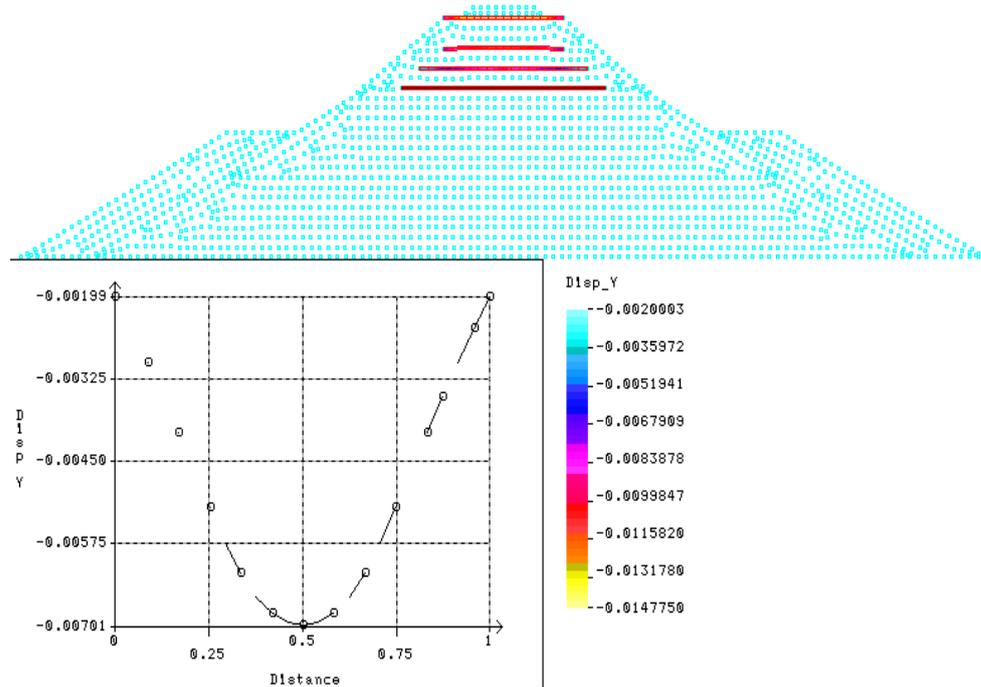


Рисунок 8. Вертикальное перемещение четвертого слоя геотекстиля

При модуле упругости местного грунта менее 40 МПа, необходимо также укладывать слои нетканого материала через 1,5 м по высоте. На рис. 9-12 показано изменение расчетных поперечных смещений грунта рабочей зоны насыпи при укладке разного числа слоев нетканого материала.

L1n DISP Lc=4

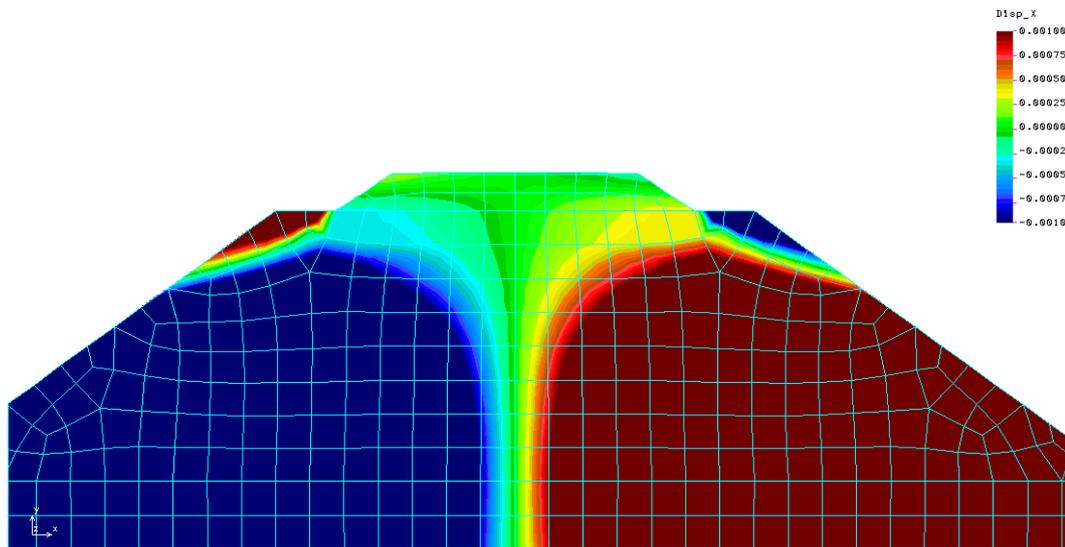


Рисунок 9. Распределение поперечных деформаций грунта насыпи, не имеющей слоя геотекстиля под балластной призмой

L1n DISP Lc=4

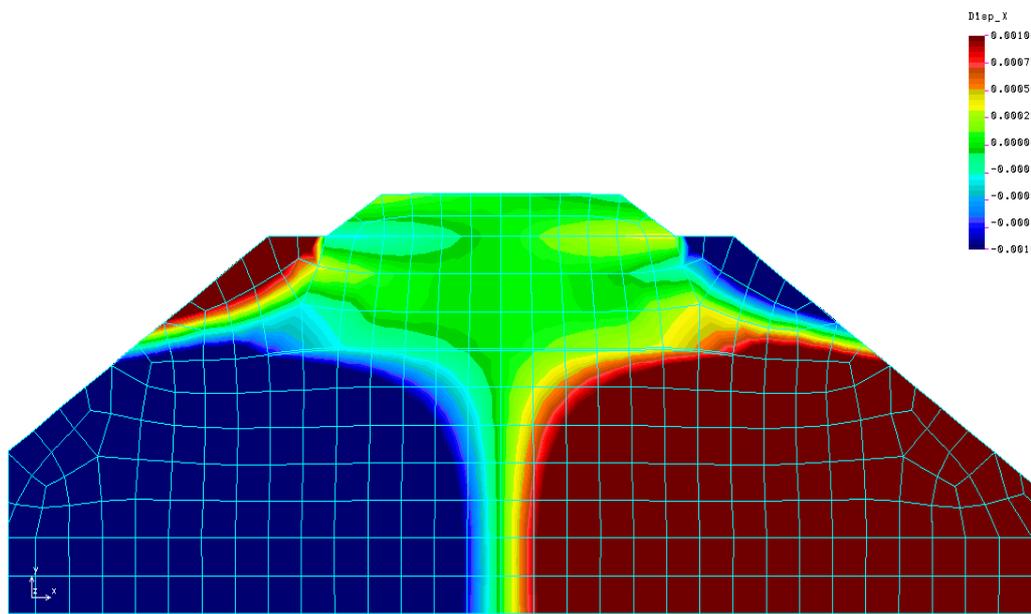


Рисунок 10. Уложено два ряда геотекстиля (под балластной призмой и через 1,5 м ниже)

L1n DISP Lc=4

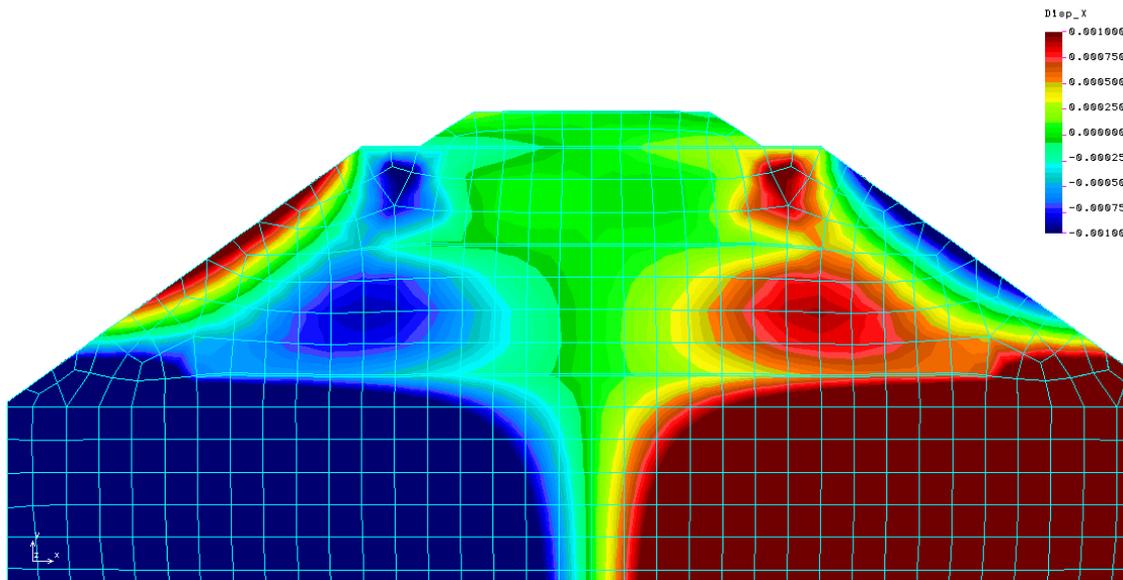


Рисунок 11. Уложено три ряда геотекстиля
(под балластной призмой и затем через 1,5 м ниже)

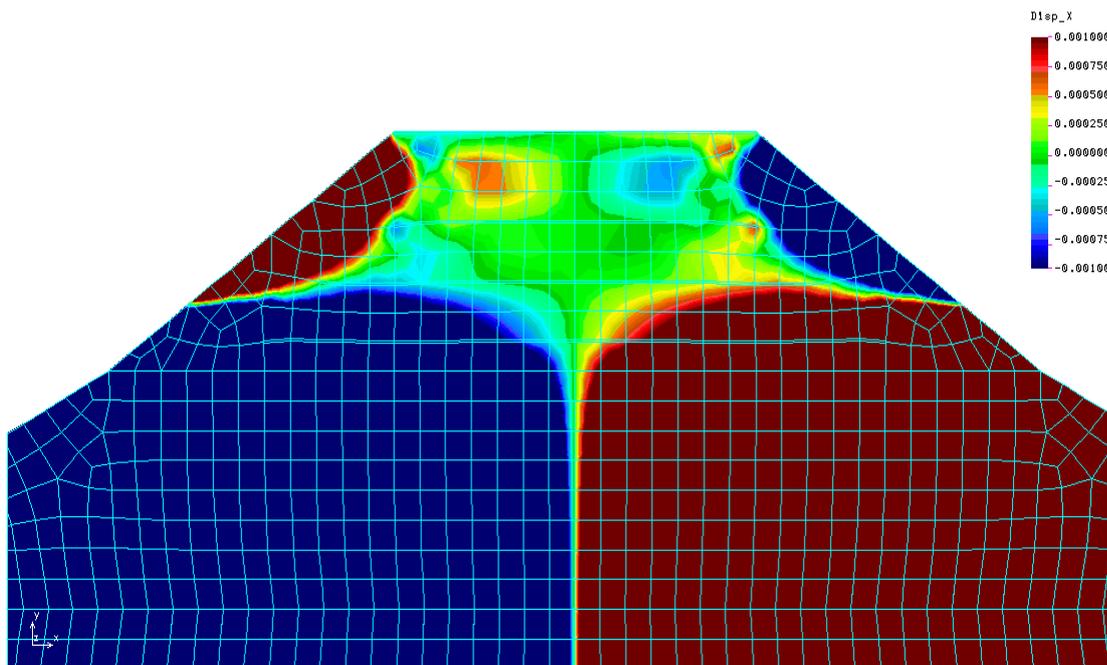


Рисунок 12. Уложено четыре ряда геотекстиля
(под балластной призмой и три слоя через 1,5 м ниже)

Как следует из анализа напряженно-деформированного состояния верха земляного полотна и результатов расчетов модуля упругости грунтов верхнего слоя насыпи устройство четырех слоев геотекстиля (нижний слой примерно на 1 м ниже рабочей зоны зем-

ляного полотна) неэффективно, так как на уровне 4 слоя уже нет растягивающих напряжений от подвижного состава, которые мог бы воспринять слой геотекстиля. Для Северного региона необходимо устройство трех слоев геотекстиля для предотвращения выдавливания оттаявшего весной, но не успевшего консолидироваться слоя грунта толщиной около 0,30 м. Для среднего региона эту функцию возьмут на себя предлагаемые два слоя геотекстиля (рис. 10).

Результаты и их обсуждения. Выводы и предложения:

1. Анализ расчетов напряженно-деформированного состояния верха земляного полотна численными методами показал, что повышение осевой нагрузки до 23,5 тс вызывает существенные вертикальные напряжения верха земляного полотна, которые хотя и менее 0,8 кг/см² (предельный норматив), но более прочности оттаявшего, но не консолидированного глинистого грунта. Поэтому и в Южной зоне Казахстана необходимо устраивать подбалластный слой толщиной не менее 0,3 м, под которым должен укладываться слой геотекстиля для восприятия напряжений по оси X и для усиления верха земляного полотна;

2. Для средней и северной зон вместо мощного подбалластного слоя толщиной 1,5-2,0 м возможно решение с укладкой геотекстиля через 1,5 м. Так как откосная часть насыпи на толщину 1-1,5 м будет консолидирована, она будет сопротивляться перемещению к откосу грунта средней части насыпи – оттаявшего, но не консолидированного непрочного слоя толщиной 0,25-0,3 м;

3. До выполнения работ по усилению верха земляного полотна необходимо в период консолидации оттаявшего глинистого грунта ограничивать скорости движения поездов до расчетного безопасного уровня.

Заключение:

1. Причины высокой дефектности земляного полотна определяются:

– сложными инженерно-геологическими и суровыми климатическими условиями регионов Республики Казахстан,

– многофакторностью и недостаточной изученностью процессов, происходящих в земляном полотне при воздействии на него поездной нагрузки,

– повсеместным применением типовых поперечных профилей железнодорожного земляного полотна, хотя местные грунты для сооружения земляного полотна отличаются большим разнообразием и широким спектром механических свойств,

– недостаточной научно-технической и технологической обеспеченностью принятия проектных решений по лечению земляного полотна.

2. В связи с существенным изменением условий эксплуатации железных дорог (повышением осевых вагонных нагрузок, скоростей движения поездов и внедрении новых типов подвижного состава) необходима более полная постановка задачи о напряженно-деформированном состоянии грунтов земляного полотна и отказ от традиционных допущений при постановке плоской задачи расчета изотропного земляного полотна. Наиболее полное соответствие математических моделей натуре при описании земляного полотна возможно лишь при использовании виртуальных объемных моделей, в которых все механические параметры грунтов соответствуют природным.

3. Сравнение результатов расчетов напряженно-деформированного состояния грунтов основной площадки с данными исследований ВНИИЖТ показывает их хорошую сходимость, что убеждает в адекватности виртуальных математических моделей земляного полотна натуре и возможности их применения для оценок величин рабочей зоны земляного полотна. Вывод о возможности применения зависимостей теории упругости к расчетам

железнодорожного земляного полотна впервые сделан профессором М.Ф. Вериго при анализе данных экспериментальных исследований.

4. Для стабилизации грунтов основной площадки рекомендуются следующие меры усиления верха земляного полотна:

- доведение толщины балластной призмы до 50-60 см,
- применение плит пенополистирола между балластом и верхом земляного полотна,
- укладка по верху земляного полотна слоев нетканого материала совместно с геосетками для предотвращения поперечных деформаций балластного слоя,
- укладка по верху земляного полотна кироминеральных слоев толщиной 12-15 см.

Выбор конкретного способа лечения основной площадки земляного полотна определяется местными условиями (шириной земляного полотна и габаритными ограничениями) и технико-экономическим сравнением вариантов.

5. В регионах Казахстана профессором А.Д. Омаровым выделены по глубине промерзания три климатические зоны – Южная, Средняя и Северная. Для этих зон в диссертации предложены схемы усиления основной площадки и рабочей зоны земляного полотна слоями нетканого материала.

6. Расчеты напряженно-деформированного состояния слоев нетканого материала показали, что близко к откосу насыпи ковер нетканого материала испытывает сжатие (происходит защемление ковра грунтом), а по оси насыпи ковер растянут из-за относительно больших вертикальных деформаций грунта насыпи по оси насыпи в сравнении с ее откосной частью. Поэтому нецелесообразны предусмотренные нормативами изгибы ковра к верху насыпи и защемление следующим слоем грунта. Так как изгибы ковра мешают поперечному стоку фильтрующей из насыпи весной и осенью после дождей воды, в работе рекомендуется их отменить, сохранив лишь 3-4 % поперечный уклон ковра нетканых материалов.

7. Анализ результатов выполненных расчетов весеннего оттаивания грунта насыпи в регионах Казахстана позволяет утверждать, что мощность оттаявшего за трое суток слоя грунта под балластом не превосходит 0,15 м. Эту величину слоя, не консолидировавшегося грунта основной площадки, рекомендуется использовать в расчетах стабильности основной площадки земляного полотна железных дорог Республики Казахстан. Анализ результатов расчетов перемещений грунта консолидирующегося слоя показал, что консолидирующийся слой в насыпи испытывает повышенное сжатие в весенний период, что приводит к ускоренному накоплению остаточных деформаций верха земляного полотна и вынуждает пополнять балластную призму при выправках пути. Отказ от усиления основной площадки приводит к повышенным расходам на эксплуатацию пути и на балластный материал и снижает уровень безопасности движения поездов.

8. Для усиления основной площадки земляного полотна из обыкновенных грунтов необходимо включить в нормативные документы по проектированию и строительству земляного полотна железных дорог Республики Казахстан новые технические требования, учитывающие сезонную изменчивость механических свойств грунтов и нагрузки от современных высокоскоростных поездов.

Таким образом, установлены условия стабильности основной площадки земляного полотна при сезонном оттаивании грунтов и оценено влияние нетканых материалов на напряженно-деформированное состояние верха земляного полотна, разработаны технические и технологические рекомендации по усилению рабочей зоны земляного полотна с учетом климатических условий регионов Казахстана.

Список литературы

1. Омаров А.Д. Земляное полотно железных дорог Казахстана. – Алматы: Бастау, 2000. – 208 с.
2. Закиров Р.С., Омаров А.Д. Проблемы повышения работоспособности подшпального основания и основания балластного слоя при введении скоростного движения поездов / Под ред. Р.С. Закирова. – Алматы: Бастау, 2001. – Ч. I. – 198 с.
3. Смоляницкий Л.А., Меркулов И.И. Об эффективности некоторых методов лечения балластных корыт. // Вопросы геотехники. – № 9. – 1965. – С. 94-95.
4. Жинкин Г.Н., Великотный В.П. Применение золы уноса для укрепления верхнего слоя земляного полотна из глинистых грунтов // Механика земляного полотна и оснований: Межв. Сб. научн. трудов. – Днепропетровск: ДИИТ. – 1986. – С. 32-35.
5. Архипов А.И. Исследование моделированием распределения напряжений в земляном полотне от поездной нагрузки при наличии в основной площадке силикатной подбалластной плиты // Вопросы земляного полотна и геотехники на железнодорожном транспорте. – Вып. 208/29. – Изд. ДИИТа, Днепропетровск, 1980. – С. 53-58.
6. Архипов А.И. Эффективность метода силикатизации для повышения несущей способности подбалластного основания // Вопросы земляного полотна и геотехники на железнодорожном транспорте. – Вып. 208/29. – Изд. ДИИТа, Днепропетровск, 1980. – С. 32-41.
7. Шиладжян А.А. Разработка способов повышения устойчивости балластной призмы за счет обработки щебеночного слоя вяжущими материалами // Новые исследования в области подвижного состава и пути: Тр. ВНИИЖТ. – М., Транспорт, 1977. – 89-90.
8. Технические указания по применению нетканых материалов для усиления земляного полотна: ЦП-4591. – М.: Транспорт, 1989. – 48 с.
9. Коган А.Я. Исследование распределения напряжений на моделях насыпей // Исследование работы грунта в железнодорожных сооружениях: Сб. статей НИИ пути и строительства НКПС. – М., Трансжелдориздат, 1940. – С. 65-71.
10. Skempton A. Effective stress in soils, concrete and rocks // Conference on pore pressure. Londres, 1960.
11. Stryczek J., Banaś M., Krawczyk J., Marciniak L., Stryczek P. The Fluid Power Elements and Systems Made of Plastics // ProcediaEngineering 176 (2017). 600-609. Published by Elsevier Ltd., www.elsevier.com/locate/procedia.
12. Torue T., Hajasari M., Kitahara J. Dynamic deformation and failure characteristics of rockfill material subjected to cyclic shear loading under vertical vibration. Soils and Foundations // Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 1980. – Vol. 20. – N 4. – P. 1-17 (in Eng.).
13. Bojko A., Fedotov A.I., Khalezov W.P., Młyńczak M. Analysis of brake testing methods in vehicle safety. Safety and Reliability: Methodology and Applications – Proceedings of the European Safety and Reliability Conference, ESREL, 2014.
14. Wang Y., Wu H.C., Li V.C. Concrete reinforcement with recycled fibers // Journal of Materials in Civil Engineering, 2000; 12: 314-319. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2000\)12:4\(314\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:4(314)).
15. Porevski R., Ponagelis I. Evaluation of variability in sulgrade loads // J. Civ. Eng. and Manag. – 2003. – Vol. 9. – N 1. – P. 16-19.
16. Habib P. La resistance an cisaillement des sols, Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, Sixieme Année, N 61 (Sds et Fondations No. 12). – Paris, 1-40 (1953-a).
17. Исаенко Э.П., Безруков М.В., Иванов С.Ю., Шайдуллин Ш.Н., Васильев С.П. Расчеты железнодорожного пути с использованием конечно-элементных моделей: Учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: «Нижегородский печатник», 2002. – 215 с.
18. Айтиалиев Ш.М., Исаханов Е.А., Телтаев Б.Б. Исследование напряженно-деформированного состояния дорожной насыпи с учетом ползучести грунта // Вестн. КазАТК. – 2000. – № 1. – С. 40-45.
19. Doudkin, M.V., Apshikur, B., Kim, A.I., ...Mlynczak, M., Tungushbayeva, Z.K. Development of mathematical models describing the processes occurring in the railway track construction as a whole, or in the work of its individual elements // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences, 2019, 5(437). – С. 6-15.
20. Doudkin, M.V., Apshikur, B., Kim, A.I., ...Asangaliyev, E.A., Mlynczak, M. Development of an installation for shear ground testing in the railway track construction // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences, 2019, 6(438). – С. 22-35.

References

1. Omarov A.D. Zemlyanoe polотно zheleznihyh dorog Kazahstana. - Almaty: Bastau, 2000. – 208 s.

2. Zakirov R.S., Omarov A.D. Problemy povysheniya rabotosposobnosti podshpal'nogo osnovaniya i osnovaniya ballastnogo sloya pri vvedenii skorostnogo dvizheniya poezdov /Pod red. R.S. Zakirova. – Almaty: Bastau, 2001. – CH. I. – 198 s.
 3. Smolyanickij L.A., Merkulov I.I. Ob effektivnosti nekotorykh metodov lecheniya ballastnykh koryt. /Voprosy geotekhniki. №9.- 1965.-s.94-95.
 4. ZHinkin G.N., Velikotnyj V.P. Primenenie zoly unosa dlya ukrepleniya verhnego sloya zemlyanogo polotna iz glinistykh gruntov. /Mekhanika zemlyanogo polotna i osnovanij./ Mezhd. Sb. nauchn. Trudov.-Dnepropetrovsk.-DIIT.-1986. s.32-35.
 5. Arhipov A.I. Issledovanie modelirovaniem raspredeleniya napryazhenij v zemlyanom polotne ot poezdnoj nagruzki pri nalichii v osnovnoj ploshchadke silikatnoj podballastnoj plity. Voprosy zemlyanogo polotna i geotekhniki na zheleznodorozhnom transporte. Izd. DIITa, vyp. 208/29 Dnepropetrovsk, 1980, s.53-58.
 6. Arhipov A.I. Effektivnost' metoda silikatizatsii dlya povysheniya nesushchej sposobnosti podballastnogo osnovaniya.. Voprosy zemlyanogo polotna i geotekhniki na zheleznodorozhnom transporte. Izd. DIITa, vyp. 208/29 Dnepropetrovsk, 1980, s.32-41.
 7. SHiladzhyan A.A. Razrabotka sposobov povysheniya ustojchivosti ballastnoj prizmy za schet obrabotki shchebenochnogo sloya vyzhushchimi materialami. /Novye issledovaniya v oblasti podvizhnogo sostava i puti/Tr. VNIIZHT.-M., Transport.1977.-89-90.
 8. Tekhnicheskie ukazaniya po primeneniyu netkanykh materialov dlya usileniya zemlyanogo polotna. CP-4591. M.Transport. 1989. 48s.
 9. Kogan A.YA. Issledovanie raspredeleniya napryazhenij na modelyah nasypej. «Issledovanie raboty grunta v zheleznodorozhnykh sooruzheniyah» Sb. statej Nil puti i stroitel'stva NKPS. – M., Transzheldorizdat, 1940, s.65-71.
 10. Skempton A. Effective stress in soils, concrete and rocks // Conference on pore pressure. Londres, 1960.
 11. Stryczek J., Banaś M., Krawczyk J., Marciniak L., Stryczek P. The Fluid Power Elements and Systems Made of Plastics // ProcediaEngineering 176 (2017). 600-609. Published by Elsevier Ltd., www.elsevier.com/locate/procedia
 12. Torue T., Hajasari M., Kitahara J. Dymanic deformation and failure characteristics of rochfill material subjected to cyclic shear loading under vertical vibration. Soils and Foundations // Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engenering. 1980. Vol. 20, N 4. R. 1-17 (in Eng.).
 13. Bojko A., Fedotov A.I., Khalezov W.P., Młyńczak M. Analysis of brake testing methods in vehicle safety. Safety and Reliability: Methodology and Applications – Proceedings of the European Safety and Reliability Conference, ESREL, 2014.
 14. Wang Y., Wu H.C., Li V.C. Concrete reinforcement with recycled fibers // Journal of Materials in Civil Engineering. 2000; 12: 314-319. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2000\)12:4\(314\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:4(314))
 15. Porevski R., Ponagelis I. Evaluation of variability in sulgrade loads // J. Civ. Eng. and Manag. 2003. Vol. 9, N 1. P. 16-19.
 16. Habib P. La resistance an cisaillement des sols, Annales de l'Institut Technique du Batimentet des Travaux Publics, SixiemeAnnee, N 61 (Sds et Fondations No. 12). Paris, 1-40 (1953-a).
 17. E.P Isaenko, M.V.Bezrukov, S.YU.Ivanov, SH.N.SHajdullin, S.P.Vasil'ev. Raschety zheleznodorozhnogo puti s ispol'zovaniem konechno-elementnykh modelej Uchebno-metodicheskoe posobie. Nizhnij Novgorod, "Nizhegorodskij pechatnik", 2002, 215s.
 18. SH.M.Ajtaliev, E.A.Isahanov, B.B.Teltaev. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya dorozhnoj nasypi s uchetom polzuchesti grunta. Vestn. KazATK. 2000, №1, s.40-45
 19. Doudkin, M.V., Apshikur, B., Kim, A.I., ...Mlynczak, M., Tungushbayeva, Z.K. Development of mathematical models describing the processes occurring in the railway track construction as a whole, or in the work of its individual elements// News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences, 2019, 5(437), str. 6–15
 20. Doudkin, M.V., Apshikur, B., Kim, A.I., ...Asangaliyev, E.A., Mlynczak, M. Development of an installation for shear ground testing in the railway track construction// News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences, 2019, 6(438), str. 22-35.
-
-