



ҚҰРЫЛЫС. СӘУЛЕТ  
СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА  
CONSTRUCTION. ARCHITECTURE

DOI 10.51885/1561-4212\_2021\_1\_12  
МРНТИ 67.03.03

**Б. Апшиқур<sup>1</sup>, Т.Т. Ипалаков<sup>1</sup>, А.К. Капасов<sup>1</sup>, Д.К. Касымов<sup>1</sup>, М.М. Алимқұлов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,

г. Усть-Каменогорск, Казахстан

E-mail: [bake.ab@mail.ru](mailto:bake.ab@mail.ru)

E-mail: [Tpalakov@ektu.kz](mailto:Tpalakov@ektu.kz)

E-mail: [azamat040594@mail.ru](mailto:azamat040594@mail.ru)\*

E-mail: [daur-kas@mail.ru](mailto:daur-kas@mail.ru)

<sup>2</sup>АО «КазАТК» им. М. Тынышпаева, г. Алматы, Казахстан

E-mail: [alimkulov\\_murat@mail.ru](mailto:alimkulov_murat@mail.ru)

**ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО  
СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ПРИ  
ПОВЫШЕНИИ ОСЕВОЙ ВАГОННОЙ НАГРУЗКИ**

**ОСЫТІК ВАГОН ЖҮКТЕМЕСІНІҢ ЖОҒАРЫЛАУЫ КЕЗІНДЕ ЖЕР ТӨСЕМІНІҢ  
ЖҰМЫС АЙМАҒЫ ТОПЫРАҚТАРЫНЫҢ КЕРНЕУЛІ-ДЕФОРМАЦИЯЛАНҒАН  
КҮЙІНІҢ ӨЗГЕРУ ДИНАМИКАСЫН БАҒАЛАУ**

**ASSESSMENT OF THE DYNAMICS OF CHANGES IN THE STRESS-STRAIN STATE OF  
THE SOIL OF THE WORKING AREA OF THE ROADBED WITH AN INCREASE IN THE  
AXIAL CAR LOAD**

**Аннотация.** В результате анализа расчетов по изменению модулей упругости различных слоев грунта и распределения положения результирующего вектора деформаций земляного полотна при возрастании осевой нагрузки дана количественная оценка влияния повышения осевых нагрузок, введения новых типов грузовых вагонов (шести- и восьмиосных) на величину рабочей зоны железнодорожного земляного полотна.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние земляного полотна, метод конечных элементов, георешетка, геосетка, основная площадка земляного полотна.

**Аңдатпа.** Топырақтың әртүрлі қабаттарының серпімділік модульдерінің өзгеруі бойынша есептерді талдау және осьтік жүктеменің өсуі кезінде жер төсемінің деформацияларының нәтижесінде пайда болған векторының жағдайын бөлу нәтижесінде осьтік жүктемелердің артуының, жүк вагондарының жаңа түрлерін (алты және сегіз осьті) енгізудің теміржол жер төсемінің жұмыс аймағының шамасына әсеріне сандық баға берілді.

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

**Abstract.** The analysis of calculations by changing the modulus of elasticity of different soil layers and the distribution position of the result vector of deformations with increasing axial load, a quantitative assessment of the effects of increasing axial loads, the introduction of new types of freight wagons on the size of the working area of the railway subgrade.

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

*Введение.* Цель данной статьи – расчетная оценка динамики изменения напряженно-деформированного состояния грунтов рабочей зоны земляного полотна при повышении осевой вагонной нагрузки, с использованием при этом известных методов проведения полевых и камеральных работ [1]. К полевым работам относятся: бурение шпуров, отбор проб, замер трещиноватости, описания различных состояний массива или грунтов, эксплуатационных и климатических факторов и т.п. К камеральным работам относятся: определение в лабораторных условиях механических свойств грунтов, их систематизация, выявление закономерностей и т.п. Выполнены массовые расчеты напряженно-деформированного состояния рабочей зоны земляного полотна до и после усиления, экспериментальные исследования коэффициента теплопроводности глинистых грунтов рабочей зоны земляного полотна, расчеты напряженно-деформированного состояния консолидирующегося слоя земляного полотна, разработка рекомендаций по усилению верха земляного полотна в климатических зонах Республики Казахстан. При этом использовались сертифицированные программы расчетных систем COSMOS/M.

*Актуальность темы, анализ изученности вопроса и постановка проблемы.* 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.

При введении поездов с более высокими осевыми нагрузками или при существенном повышении скоростей движения на ряде участков 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 основной площадки земляного полотна. Несмотря на существенные затраты АО «НК «КТЖ» по стабилизации деформирующегося земляного полотна, его доля 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 научная проблема обеспечения стабильности основной площадки железнодорожного земляного полотна является весьма *актуальной*. В конце статьи, на основании результатов исследований причин и характера деформирования основной площадки железнодорожного земляного полотна, приведены выводы и рекомендации, которые являются *научной новизной и практической ценностью* работы.

Исследованиям основной площадки земляного полотна уделялось большое внимание со стороны специалистов. Решению проблемы стабилизации основной площадки земляного полотна железных дорог посвящены работы М.В. Аверочкиной, Н.И. Ананьева, Е.Т. Ауесбаева, Е.С. Ашпиза, В.Ф. Барабошина, М.Ф. Вериги, В.В. Виноградова, М.Н. Гольдштейна, В.А. Грицика, П.И. Дыдышко, Б.А. Евдокимова, Г.Н. Жинкина, Р.С. Закирова, Э.П. Исаенко, А.Л. Исакова, Е.А. Исаханова, Н.И. Карпущенко, А.Ф. Кима, А.Я. Когана, Г.Г. Коншина, С.А. Косенко, В.С. Лысюка, А.Н. Марготьева, С.К. Мусаева, Г.С. Мусаевой, А.Д. Омарова, П.Г. Пешкова, С.Н. Попова, И.В. Прокудина, М.П. Смирнова, Ю.П. Смолина, Ю.И. Соловьева, В.П. Титова, А.К. Уразбекова, С.С. Хасенова, Б.Д. Хействера, А.А. Цернанта, С.Н. Шарапова, Г.М. Шахунянца, Е.В. Яковлевой, Т.Г. Яковлевой.

Исследования ученых позволили установить ряд закономерностей, проявляющихся в грунтах основной площадки и верха земляного полотна при воздействии разных факторов, и рекомендовать способы усиления земляного полотна. Тем не менее, изменение условий эксплуатации железных дорог требует новых подходов к решению этой проблемы и учета климатических условий регионов. Если в недавнем прошлом требовалось обеспечить упругую работу железнодорожного земляного полотна, то при введении скоростного движения поездов требуется нормировать и величину вертикальной деформации насыпи. Для усиления основной площадки насыпей сегодня применяются не только грунты, но и различные материалы, существенно отличающиеся от грунтов механическими свойствами, которые невозможно учесть, применяя традиционные математические модели.

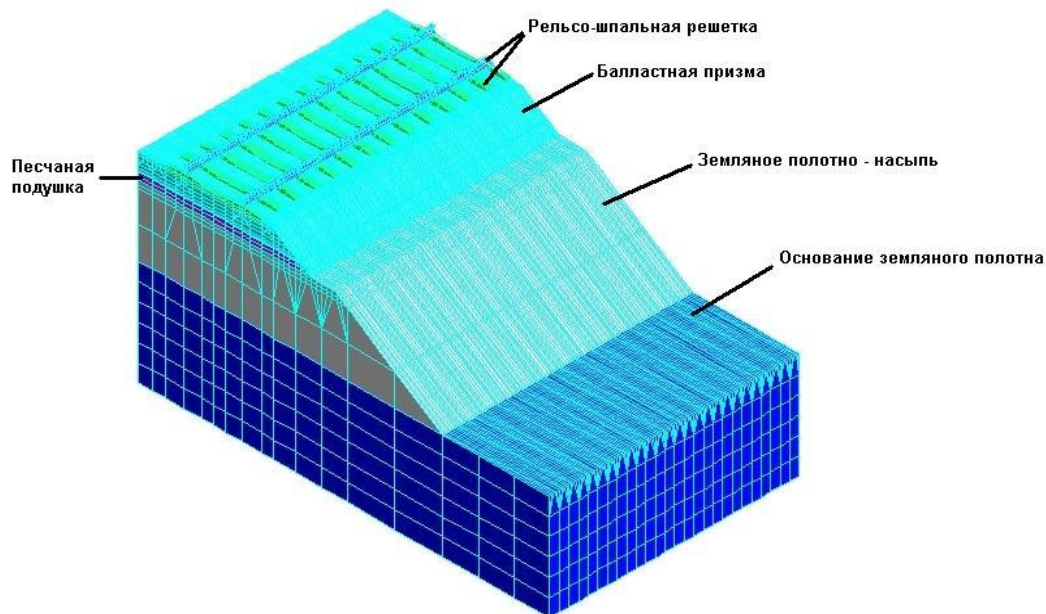
Из обобщения результатов предшествующих исследований причин деформирования основной площадки железнодорожного земляного полотна также следует, что учет только ее вертикальных деформаций не отражает всей сложности происходящих процессов, ход которых зависит не только от механических параметров грунта основной площадки, но и от параметров балластной призмы, осевой нагрузки и скорости движения поездов. Для исследования мер усиления верха земляного полотна необходимо использовать полную модель железнодорожного пути, нагруженную типовым подвижным составом.

В последнее время происходит неконтролируемое повышение поездажной нагрузки на железнодорожное земляное полотно без установления пределов возможной нагрузки. Очевидно, что при определенной нагрузке начнутся необратимые остаточные деформации, представляющие угрозу безопасности движения поездов.

В связи с недостаточной изученностью физики процесса изменения НДС (напряженно-деформированного состояния) железнодорожных насыпей при увеличении поездажной нагрузки рассмотрим эти изменения при постепенном росте нагрузки для характерного диапазона механических свойств грунтов железных дорог Республики Казахстан.

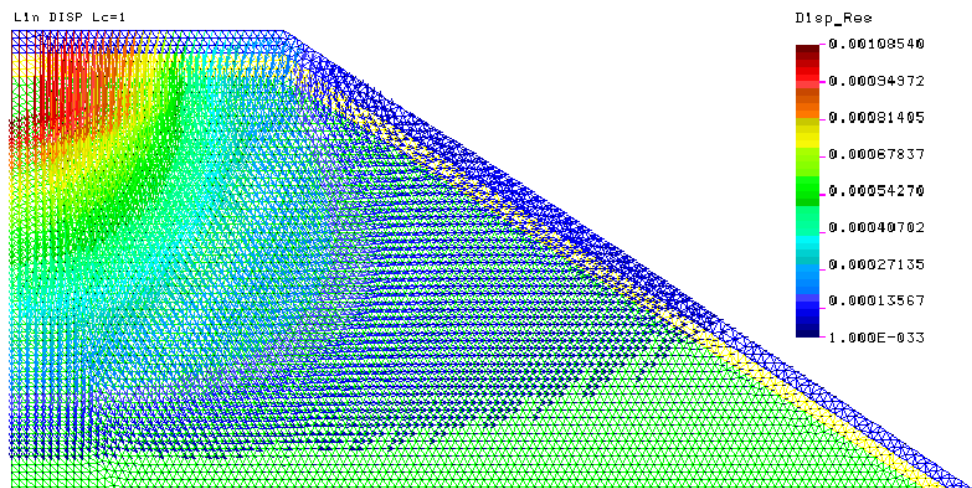
В весенний период, когда оттаивает балласт под шпалой, на откосах и обочине также оттаивает слой замерзшего грунта, по расчетам [2] близкий по толщине к 0,3 м. Затем начинает оттаивать верх основной площадки, ограниченный сверху талым и снизу мерз-

лым грунтом. Оттаявший, но не консолидировавшийся грунт основной площадки, по данным профессора А.Д. Омарова [2] имеет прочность около 40 % от прочности талого грунта. Рассмотрим характер деформаций этого слоя при разных поездных нагрузках на модели насыпи (рис. 1) при погонных нагрузках от 4 до 20 тс/пог. м.

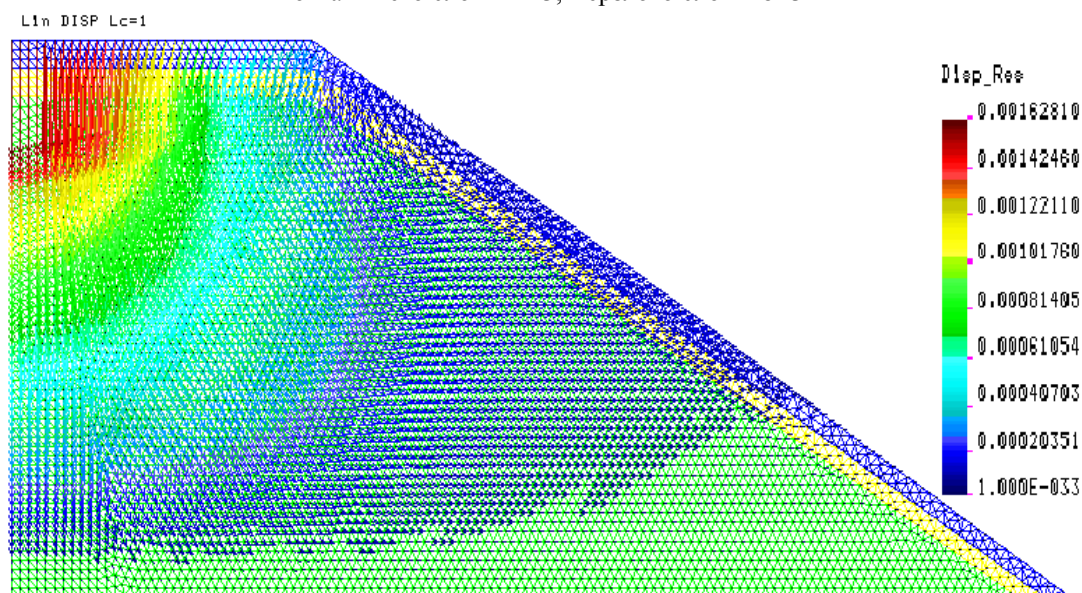


**Рисунок 1.** Осесимметричная конечно-элементная модель участка

На рис. 2 и 3 приведены результаты расчетов для различных поездных нагрузок в виде векторов результирующих перемещений частиц грунта при погонной нагрузке 8, 12, 16, 20 тс/пог.м. и модуле упругости на каждую нагрузку верхнего слоя грунта 8ЕЗ, оттаявшего слоя – 4ЕЗ, мерзлого слоя – 8ЕЗ; верхнего слоя – 5ЕЗ, оттаявшего слоя – 2ЕЗ, мерзлого слоя – 5ЕЗ; верхнего слоя – 2ЕЗ, оттаявшего слоя – ЕЗ, мерзлого слоя – 2ЕЗ соответственно.

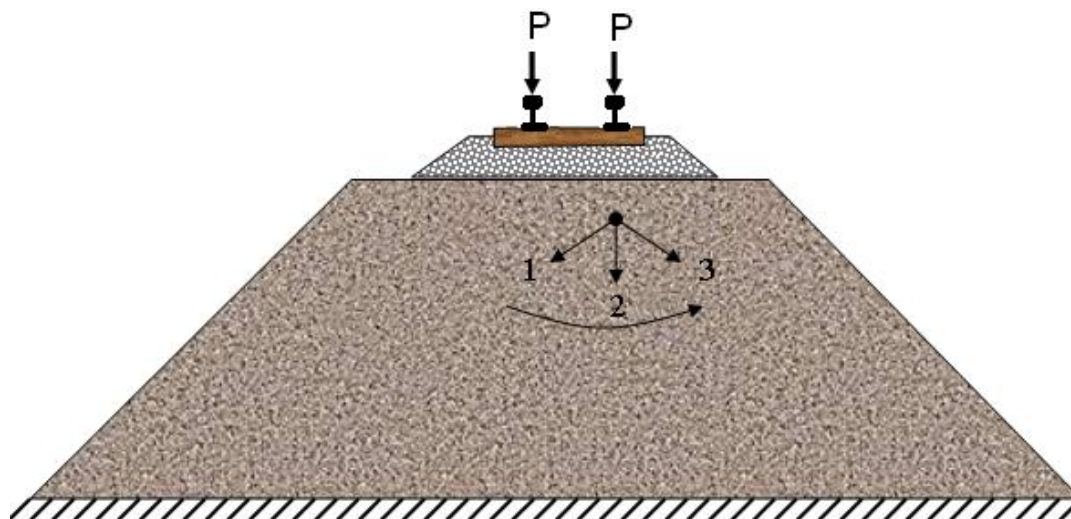


**Рисунок 2.** Векторы результирующего перемещения частиц грунта при погонной нагрузке 8 тс/м/пог. и модуле упругости верхнего слоя грунта 8ЕЗ, оттаявшего слоя – 4ЕЗ, мерзлого слоя – 8ЕЗ



**Рисунок 3.** Векторы результирующего перемещения частиц грунта при погонной нагрузке 12 тс/м/пог. и модуле упругости верхнего слоя грунта 8ЕЗ, оттаявшего слоя – 4ЕЗ, мерзлого слоя – 8ЕЗ

На рис. 4 показаны характерные положения результирующего вектора деформаций земляного полотна при возрастании осевой нагрузки: 1-я стадия стабилизации земляного полотна после строительства и образование плотного ядра насыпи, 2-я стадия уплотнения насыпи при ее эксплуатации, 3-я стадия образования поверхностей сдвига в теле насыпи [3].



**Рисунок 4.** Характерные положения результирующего вектора деформаций земляного полотна при возрастании осевой нагрузки: 1-я стадия стабилизации земляного полотна после строительства и образование плотного ядра насыпи; 2-я стадия уплотнения насыпи при ее эксплуатации; 3-я стадия образования поверхностей сдвига в теле насыпи

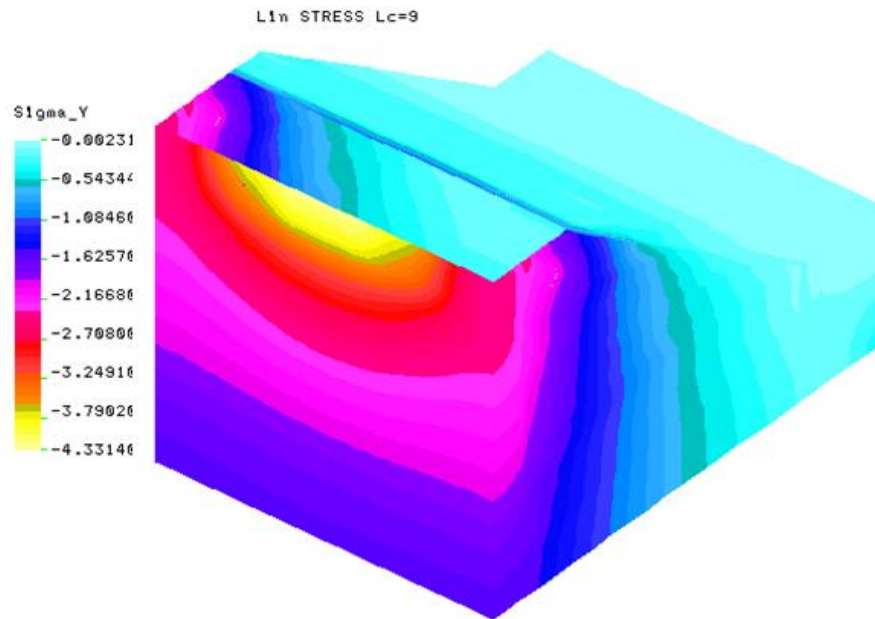
Анализ результатов расчетов по изменению модулей упругости различных слоев грунта позволяет заключить, что в резко-континентальном климате РК минимальная упругая осадка земляного полотна из прочного грунта ( $E = 8E3$ ) составляет 1,8 мм при минимальных нагрузках в 8 т/пог.м. При нагрузке 20 тс/пог.м деформации достигают 20 мм. При малых погонных нагрузках (до 4 тс/пог.м) наблюдается перемещение частиц грунта к оси насыпи.

На рис. 2, 3, 5, 6 на вертикальной шкале цветом показаны величины перемещений слоя грунта в зависимости от различной нагрузки от оси подвижного состава вагона и изменения от красного цвета (наибольшая нагрузка) до синего цвета (наименьшая нагрузка). Цифры обозначают величины перемещений в мм.

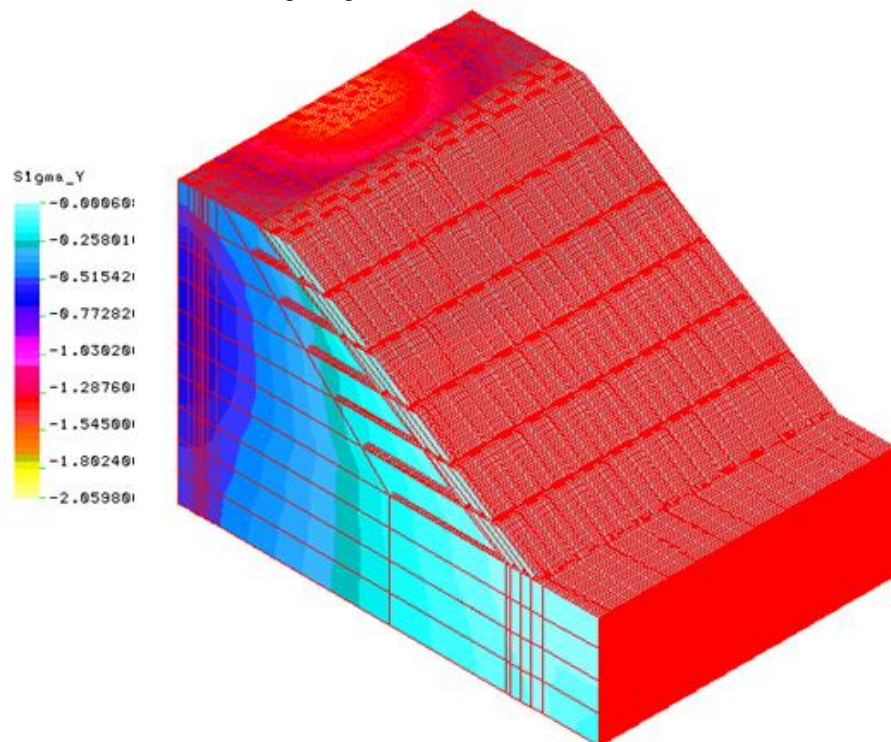
С увеличением нагрузки результирующий вектор перемещений сначала приближается к вертикали, а затем принимает направление к откосу насыпи. Увеличение погонной нагрузки ведет к новым качественным явлениям – появлению поверхностей скольжения. Здесь количество (величина нагрузки) переходит в новое качество – образование плоскости разрушения насыпи. Прекращается процесс преимущественного уплотнения грунта и начинается его разрушение [4].

Далее рассмотрим изменение рабочей зоны земляного полотна в связи с введением новых большегрузных вагонов.

Рассмотрим на объемной модели железнодорожной насыпи осесимметричную задачу о распределении напряжений в земляном полотне под четырех-, шести- и восьмиосным полувагонами. Примем расчетное давление колеса вагона равным 10, 20, 30 тс, что соответствует движению вагонов с минимальными и максимальными скоростями [5, 6]. Пример расчетов распределения вертикальных напряжений состояния грунта насыпи высотой 10 м приведены на рис. 5, горизонтальных – на рис. 6.



**Рисунок 5.** Распределение вертикальных напряжений по оси насыпи от тележки восьмисосного вагона при вертикальной силе от каждого колеса вагона 30 тс



**Рисунок 6.** Распределение горизонтальных напряжений в теле насыпи от тележки шестисосного полувагона

На рисунках и табл. 1 заметно увеличение размеров рабочей зоны земляного полотна при обращении груженых шести- и восьмиосных полувагонов в сравнении с четырехосными, которыми в основном укомплектован парк грузовых вагонов.

**Таблица 1.** Величина расчетной рабочей зоны насыпи для разных типов груженых полувагонов

Количество осей вагона	Вертикальное давление колеса, тс	Величина рабочей зоны, м	Максимальное вертикальное напряжение грунта, кг/см <sup>2</sup>
4	10	4	0,1
4	20	5	0,2
4	30	5,5	0,31
6	10	4,5	0,13
6	20	5,2	0,26
6	30	6	0,4
8	10	7	0,14
8	20	7,5	0,28
8	30	7,8	0,43
Относительный прирост в сравнении с четырехосным полувагоном для шести-, восьмиосного полувагонов		0,07-0,12	0,3
		0,3-0,5	0,4

Таким образом в данной статье дана количественная оценка влияния повышения осевых нагрузок, введения новых типов грузовых вагонов (шести- и восьмиосных) на величину рабочей зоны железнодорожного земляного полотна. Из приведенных результатов исследований причин и характера деформирования основной площадки железнодорожного земляного полотна следуют соответствующие выводы и рекомендации:

– 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;

– увеличение количества осей грузовых вагонов при равном их давлении на рельсы существенно влияет на деформации насыпи. Следовательно, если насыпь отсыпана недостаточно прочными грунтами, при введении большегрузных вагонов необходимо усиление более мощного пласта грунта;

– характера напряженно-деформированного состояния рабочей зоны железнодорожного земляного полотна изменяется в зависимости как от характеристик прочности местных грунтов, так и глубины их промерзания и высоты насыпей. Рекомендуется для новых железных дорог Казахстана разработка зональных поперечных профилей земляного полотна из глинистых грунтов с более детальным учетом грунтовых и климатических условий региона.

#### Список литературы

1. 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.



2. Омаров А.Д. Земляное полотно железных дорог Казахстана. – Алматы: Бастау, 2000. – 208 с.
  3. Исаенко Э.П., Хасенов С.С., Золотухин В.И., Алимкулов М.М., Апшикур Б. Расчеты напряженно-деформируемого состояния железнодорожных насыпей численными методами // Магистраль. – № 2 (76). – 2007. – С. 80-87.
  4. Яковлева Е.В., Круглый А.Г., Побединский А.Г. Новые подходы к обследованию земляного полотна // Путь и путевое хозяйство. – 2001. – №1. – С. 30-32.
  5. 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.
  6. Хасенов С.С., Алимкулов М.М., Апшикур Б. О зональных технических требованиях к конструкции верха земляного полотна железных дорог Республики Казахстан // Вестник КазАТК. – № 1(44). – 2007. – С. 6-16.
- 
-