

## Моделирование работы сборных покрытий на лесовозных автомобильных дорогах

*Т.Г. Винокурова, А.В. Степанов*

*Петрозаводский государственный университет*

**Аннотация:** С помощью программного комплекса конечно-элементного анализа была разработана методика и выполнено моделирование конструкции сборного покрытия на основании земляного полотна с последующим анализом работоспособности колеиных покрытий из железобетонных плит на основании земляного полотна переменной жесткости.

**Ключевые слова:** вывозка древесины, лесовозная дорога, сборные покрытия, железобетонные плиты, осадка плит, основание земляного полотна, основание переменной жесткости, теория упругости, деформация земляного полотна, моделирование.

В настоящее время лесной запас в стране, в которой заготовка древесины играет важнейшую роль в экономике, не используется полностью. Несмотря на то, что из всех регионов Северо-Западного федерального округа в Архангельской и Вологодской области, в Республике Коми и Республике Карелия лесозаготовка является одной из главнейших отраслей, процент освоения расчетной лесосеки составляет всего около 44 %.

Основным фактором, определяющим транспортно-экономическую доступность лесного массива, является наличие лесовозных дорог. При этом для достаточно полного использования лесных ресурсов необходимо наличие таких дорог круглогодичного действия, транспортно-эксплуатационное состояние которых удовлетворяло бы предъявляемым требованиям к транспортным путям данной категории. На сегодняшний день средняя плотность дорожной сети в Республике Карелии [1] составляет около 0,25–0,26 км на 100 га лесной площади. При этом для организации оптимального лесопользования нужно иметь плотность дорожной сети [2] от 0,8 до 1,5 км на 100 га, а это в среднем в 4 раза выше имеющихся сегодня лесных дорог.

Реальное освоение расчетной лесосеки по эксплуатационным лесам составило 62%, по защитным лесам – около 49%, по рубкам ухода – около

10%. Объемы заготовки древесины за период с 2007 по 2019 год (Стратегия развития лесного комплекса Республики Карелия до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Республики Карелия от 29 марта 2019 года N 235р – П. URL: docs.cntd.ru/document/465420992) составляли не более 7 млн. куб. м в год. Решить проблему возможно путем оптимальной организации дорожной сети круглогодичного действия, особенно, в районах, в которых заготовка спелой древесины могла бы принести реальный доход.

Покрытия на лесных дорогах, как правило, относятся к переходному типу, выполнены из щебеночных, гравийных или песчаных материалов. Однако очевидно, что при переувлажнении этих материалов в периоды распутицы и при интенсивных осадках в виде дождя лесные автомобильные дороги не могут обеспечить круглогодичную работу автотранспорта. Слабые грунты [3], расположенные преимущественно во второй дорожно-климатической зоне, характеризующейся избыточным увлажнением, еще более осложняют ситуацию. Поэтому очевидна необходимость в строительстве покрытий, достаточно прочных для восприятия нагрузок от подвижного состава, для противостояния разрушающему действию климатических факторов, а также дающая возможность повторного использования дорожных конструкций с целью увеличения общей протяженности дорог. Одним из основных и перспективных направлений в этой части может стать применение сборных железобетонных плит [4 – 6], которые позволят изменить организацию процесса строительства лесовозных дорог в целом и повысить эффективность использования имеющихся ресурсов.

Следует уточнить, что при эксплуатации данных покрытий есть ряд особенностей, а именно - при проезде автомобиля или автопоезда происходят вертикальные перемещения торцов плит, смежные торцевые грани соударяются, это приводит к отколу торцов плит, а в основании – к

---

неравномерным осадкам грунта [5, 6]. Поэтому, работа стыковой области между смежными плитами является актуальной с точки зрения разработки проекта сборного покрытия в случае применения таких покрытий для увеличения общей протяженности лесных дорог.

Исследование вопросов работы указанных покрытий для заготовки древесины, а также оценка влияния их на окружающую среду рассмотрены в [7, 8].

Проанализировать процесс взаимодействия плит покрытий с основанием земляного полотна, на котором они располагаются, возможно с использованием принятых моделей грунта. Модель грунтового основания – условная среда, заменяющая при расчете реальный грунт, физико-механические свойства которого известны. В качестве примера приведем характеристики некоторых разновидностей грунтов, которые анализировались в процессе исследования (табл. 1).

Модель грунта должна отражать важнейшие его свойства, от которых зависит конечный результат расчета. При этом, второстепенные, мало влияющие на конечный результат свойства, учитывать нецелесообразно, так как это может привести к неоправданному усложнению исследования и расчета. Поэтому в рамках нашего исследования рассмотрим модуль упругости, как основное свойство дорожно-строительного материала.

В инженерной практике наибольшее распространение получили следующие схематизации грунтовых оснований автомобильных дорог: модель, основанная на гипотезе коэффициента постели (модель Винклера), и модель упругого полупространства [9].

Модель основания Винклера лучше отображает действительность для лесных районов севера-запада России, грунты которых характеризуются избыточным увлажнением и высоким уровнем стояния грунтовых вод.

Наиболее неблагоприятное время года для эксплуатации лесовозных дорог – весенняя и осенняя распутица.

Таблица № 1

Физико-механические свойства грунтов

Название грунта	Относительная влажность $W/W_T$	Модуль упругости, МПа
Пески пылеватые	0,9-0,95	40МПа
Супесь легкая	0,95	40 МПа
Песок мелкий	Не имеет значения	80 МПа
Пески, обработанные зольными или шлаковыми вяжущими марки 20	-	170 МПа
Щебеночные, гравийные смеси для основания $c_7 = 20$ мм	-	180 МПа

Плиты покрытия лесовозной дороги опираются на слой из уплотненного песка, который передает нагрузку на нижележащее основание, состоящее из почвогрунтов. В этих условиях песок и грунты с высокой влажностью обладают низкой несущей способностью, когда в работу почти не вовлекаются те частицы, которые примыкают к соседним, непосредственно нагруженным частицам основания, то есть, основание автомобильной дороги оказывается образованным несвязными или мало связными грунтами. Тогда можно предположить, что основание земляного полотна лесовозных автомобильных дорог допустимо представить, как Винклеровское основание, а в процессе моделирования плиту (систему плит) и основание представить в виде конечно-элементных моделей, в которых учитываются желаемые свойства.

Коэффициент пропорциональности (жесткости)  $k$ , являющийся неотъемлемой частью модели основания Винклера, называют также коэффициентом постели. Значение этого коэффициента будет зависеть от физико-механических свойств материала основания (табл. 2).

Таблица № 2

Коэффициенты жесткости основания для различных грунтов

Материал основания	МПа/м
Плывун. Песок свеженасыпанный. Глина морская размягченная.	1 – 5
Песок слежавшийся балластный. Гравий насыпной. Глина влажная.	5 – 50
Песок плотно-слежавшийся. Гравий плотно-слежавшийся. Щебень. Глина малой влажности	50 – 100
Песчано-глинистый, искусственно уплотненный. Глина твердая	100 – 200

Тогда в случае несвязных грунтов основания, представим последнее совокупностью стержней заданной жесткости, зависящей от типа грунта (рис. 1). Жесткость каждого из стержней может быть произвольной, что позволяет моделировать взаимодействие плиты с основанием при неравномерном распределении его жесткости. Количество установленных стержней-связей, моделирующих основание дорожного полотна, определяет точность окончательного результата. Зависимость между нагрузкой на основание и его осадкой определяется принятой моделью основания.

В качестве конечного элемента плиты (системы плит) используем объемный элемент лицензионного программного комплекса ZENIT. При моделировании разобьем плиту на элементы по 0,1 м вдоль длинной стороны

и 0,2 м вдоль торцевой стороны (рис.1). Моделирование воздействия движущегося автопоезда на систему плит может быть сведено к серии однотипных расчетов в зависимости от места расположения осей транспортного средства.

При этом движение разбивается на стадии, соответствующие определенному положению автопоезда. Каждый из указанных расчетов выполняется при заданном положении автомобиля, а значит и системы сил, действующих в области контакта колес с плитами. Однако в зависимости от положения нагрузки, действующей на плиту или систему плит, возможен изгиб плит и их отрыв от основания.

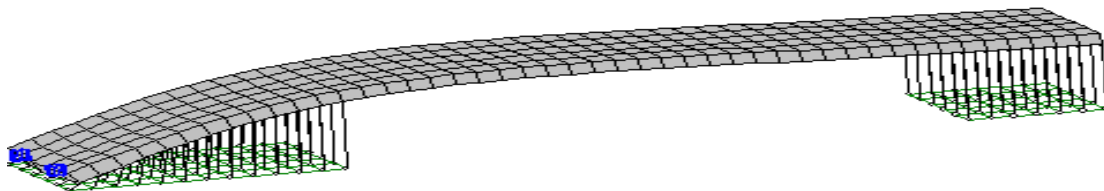


Рис.1. – Плита при воздействии технологической нагрузки на краю плиты на упругом основании Винклера.

В случае отрыва некоторой части плиты, соответствующий ей стержень, моделирующий основание, растягивается, о чем свидетельствует отрицательный знак возникающей в нем реакции. При удалении данной связи и повторении эксперимента, появляется возможность определения действительной зоны контакта плиты (системы плит) с основанием. Так, на рисунке 1 в области отрыва отсутствуют стержни, моделирующие основание земляного полотна.

Поскольку основание представлено совокупностью стержней, жесткость которых может в рамках эксперимента меняться, появляется возможность рассмотрения основания переменной жесткости при работе лесовозных автопоездов.

Но, для начала проверим достоверность полученной модели путем сравнения результатов тестового расчета с имеющимися

экспериментальными данными. Для этого, в качестве примера рассмотрим одну плиту, лежащую на однородном основании постоянной жесткости при действии нагрузки в центре плиты (рис.2). Жесткость каждого из стержней соответствует наличию однородного песчаного основания по всей области контакта с плитой.

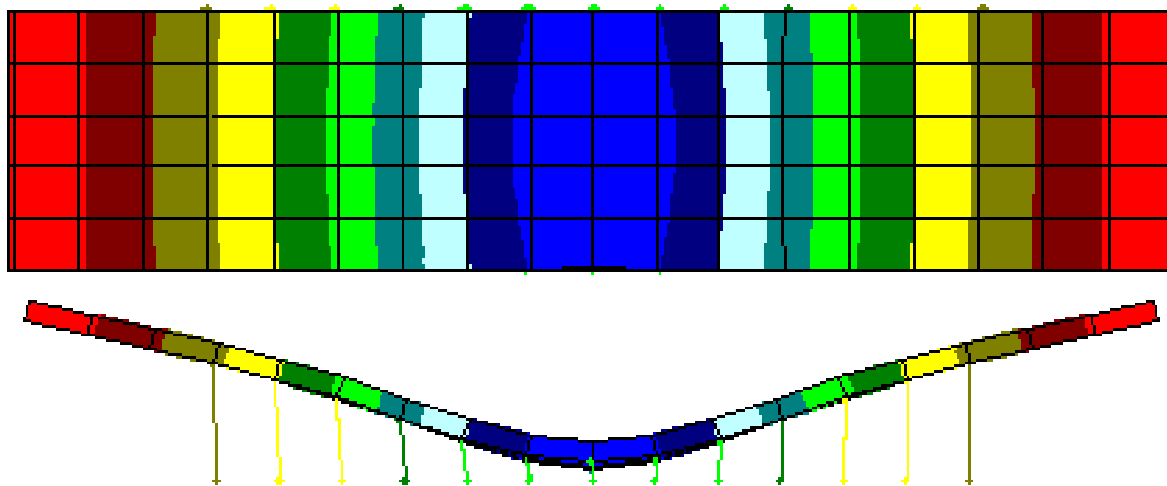


Рис. 2. – Железобетонная плита kolejного покрытия на винклеровском основании.

Осадка центрального узла плиты (максимальная) при приложении нагрузки в центре плиты согласно полученным при моделировании данным, равна – 0,002921 м. Осадка центра плиты, полученная при проведении эксперимента [10], равна – 0,00276 м.

Одним из возможных вариантов для уменьшения осадки торцевых граней плит является использование более жестких материалов как на всей площади контакта, так и в области стыковых соединений плит (табл. 3). Поэтому исследуем возможные варианты усиления стыковой области плит.

С целью поиска размеров области укрепления торцевых областей покрытия были исследованы следующие размеры усиления основания: 0,2 м, 0,4 м и 0,6 м. Как показали полученные результаты, дальнейшее увеличение области укрепления (0,8 м и более) не целесообразно, так как не ведет к существенным изменениям осадок в торцевой области kolejных покрытий.

Рассмотрены следующие варианты оснований для данной плиты:

1 – жесткость основания в локальной области стыковых соединений по всей ширине плиты уменьшена в два раза.

2 – одинаковая жесткость по всей площади основания kolejного покрытия.

3, 4 и 5 – жесткость основания в указанной области увеличена соответственно в два, три и четыре раза.

В таблице 3 сведены полученные (в миллиметрах) значения наибольшей осадки и (наибольшего вертикального перемещения торцевых граней плит) в области отрыва, в случае расположения колес транспортного средства на краю плиты.

Таблица № 3

Наибольшие значения осадки и вертикального перемещения плиты в зависимости от жесткости и размеров укрепленных участков основания.

	0,2м	0,4м	0,6м
вариант 1	11,88 (2,48)	12,77(2,73)	14,64(3,19)
вариант 2	8,59 (0,46)	8,59(0,46)	8,59 (0,46)
вариант 3	5,77(0,26)	5,11(0,32)	5,02(0,31)
вариант 4	4.36(0,053)	3,70(0,15)	3,67(0,14)
вариант 5	3,02(0)	2,51(0,11)	2,49(0,13)

Сравнивая максимальные значения вертикальных перемещений плит при действии нагрузки на краю плиты на основании постоянной и переменной жесткости (табл. 3), следует отметить, что добиться уменьшения взаимных перемещений плит при нагрузках от автопоезда можно за счет локального увеличения жесткости основания в области стыковых соединений. Чем жестче материал укрепления, тем меньше просадка торцевой грани дорожной плиты. При этом увеличение ширины области



усиления целесообразно лишь до определенных пределов. Как показывают полученные при моделировании данные, целесообразно усиление основания на ширину до 0,6 м. Дальнейшее увеличение размеров укрепленного участка ведет лишь к незначительным (1,2 %) изменениям вертикальных перемещений плит.

Таким образом, в рамках проведенного моделирования и исследования было проанализировано влияние размеров и жесткости локального укрепления земляного полотна при работе kolejных покрытий. Установлено, что значительное уменьшение вертикальных перемещений плит (осадки плит) возможно даже при локальном укреплении основания, в частности, щебеночными материалами на ширину 0,4 – 0,6 м. Это способствует более экономичному использованию дорожно-строительных материалов при их применении лишь в наиболее сложных областях контакта с kolejным покрытием.

### Литература

1. Немкович Е.Г., Козлова А.Ф. Лесной комплекс РК: состояние и пути развития. Монография. ФГАУ ГНИИ ИТТ "Информика". URL: [window.edu.ru/catalog/pdf2txt/629/68629/42408](http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/629/68629/42408).
2. Якушева Т.В. Комплексная оценка доступности лесных ресурсов с учетом развития транспортной инфраструктуры на территории ЗСФО. – ИВУЗ «Лесной журнал», 2014. №5 С. 113–117.
3. Никольцев П.К., Войтов М.А. и др. Современные методы строительства автомобильных дорог в болотистой местности // Инженерный вестник Дона, 2020, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N1y2020/6282](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N1y2020/6282).
4. Налбалдян Г.В., Фиговский О.Л., Ушаков В.А. Прочность восстановленных и усиленных железобетонных плит перекрытий //



Инженерный вестник Дона, 2020, №3. URL:  
ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2020/6347.

5. Гаврилов И. И., Шатов Б.И. Обоснование применения колежных железобетонных покрытий на лесовозных дорогах // Труды ЦНИИМЭ. – 1960. – Вып.7. – 21С.

6. Щелкунов В. В., Скрипов Н. И. Эффективность применения различных типов лесовозных дорог. – М.: Гослесбумиздат, 1963. – 109 с.

7. Harstela, Pertti. Forest work science and technology. – Joensuu: Faculty of Forestry, 1990. – 175 p.

8. Mytonen Marjatta Social sustainability of forestry in northern Europe: resech and education: Final report of the Nordic Research Programme of Social Sustainability of Forestry / Nordic Council of Ministers. – Copenhagen; Helsinki: Nakaraino Oy, 2001. – 405 p.

9. Горбунов–Посадов М. И., Маликова Т.А., Солонин В.И. Расчет конструкций на упругом основании. – М.: Стройиздат, 1984. – 679 с.

10. Кочанов А. Н. Исследование некоторых направлений совершенствования колежных покрытий железобетонных плит на лесовозных дорогах: Диссертация ... канд. техн. наук. – Ленинград, 1979. – 233 с.

### References

1. Nemkovich E.G., Kozlova A.F. Lesnoj kompleks RK: sostojanie i puti razvitija [Forestry complex of the Republic of Karelia: state and development paths]: Monografija. FGAU GNII ITT "Informika". URL: shhindoshh.edu.ru/catalog/pdf2tth/629/68629/42408.

2. Jakusheva T.V. IVUZ "Lesnoj zhurnal". 2014. №5. pp. 113–117.

3. Nikol'cev P.K., Vojtov M.A. i dr. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N1y2020/6282/.

4. Nalbaldjan G.V., Figovskij O.L., Ushakov V.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2020/6347/.

---



5. Gavrilov I. I. Trudy CNIIMJe. 1960, Vyp.7, p.21.
6. Shhelkunov V. V., Skripov N. I. Jeffektivnost' primenenija razlichnyh tipov lesovoznyh dorog [Effectiveness of the use of various types of timber roads]. M.: Goslesbumizdat, 1963. 109 p.
7. Harstela, Pertti. Forest work science and tecnology. Joensuu: Faculty of Forestry, 1990. 175 p.
8. Marjatta Mytonen Marjatta Social sustainability of forestry in northern Europe: resech and education: Final report of the Nordic Research Programme of Social Sustainability of Forestry. Nordic Council of Ministers, Copenhagen; Helsinki: Hakapaino Oy, 2001. 405 p.
9. Gorbunov–Posadov M. I. Raschet konstrukcij na uprugom osnovanii [Structural analysis on an elastic foundation]. M.: Strojizdat, 1984. 679 p.
10. Kochanov A. N. Issledovanie nekotoryh napravlenij sovershenstvovaniya kolejnyh pokrytij zhelezobetonnyh plit na lesovoznyh dorogah [Investigation of some directions of improving the wheel coatings of reinforced concrete slabs on timber roads]: Dissertacija ... kand. tehn. nauk. Leningrad, 1979. 233 p.