

АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ ПИТУХИН

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии металлов и ремонта, декан лесоинженерного факультета ПетрГУ
pitukhin@psu.karelia.ru

АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ ПЕТРОВ

преподаватель кафедры промышленного транспорта и геодезии, аспирант кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета ПетрГУ
sssn@onego.ru

**ПРИМЕНЕНИЕ УСЕЧЕННОГО ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗА УЧАСТКА АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ**

В статье обсуждается проблема низкого качества проектируемых, строящихся и находящихся в эксплуатации автомобильных дорог, в том числе лесовозных. Предлагается методика расчета вероятности безотказной работы участка автомобильной дороги при предположении о законе распределения величины дефектов как усеченного экспоненциального.

Ключевые слова: усеченное экспоненциальное распределение, дефект, покрытие автомобильной дороги, отказ

Лесопромышленный комплекс является одной из основополагающих отраслей Республики Карелии. Высокое качество продукции и эффективность инвестиций в лесопромышленный комплекс приведут к экономическому развитию региона. Однако, как было отмечено на заседании Коллегии Министерства лесного комплекса Республики Карелии 23.12.2009, существенной проблемой является состояние лесных дорог. Транспортная инфраструктура в настоящее время не в состоянии обеспечить внутри республиканский необходимый объем транзита до потребителей лесных ресурсов.

Лесовозные автомобильные дороги являются довольно капиталоемкими сооружениями. В связи с этим должна быть обеспечена надежная работа каждого конструктивного элемента автомобильной дороги. На стадии проектирования лесовозных дорог должны рассматриваться варианты, обеспечивающие максимально высокие транспортно-эксплуатационные качества при минимуме строительных затрат и материалоемкости. Задача оптимального распределения материальных ресурсов

на строительство и содержание лесовозных дорог также является весьма актуальной, так как стоимость вывозки древесины в значительной степени зависит от вложений, потраченных на строительство дороги и на ее содержание. Помимо этого, высокий уровень транспортно-эксплуатационных показателей дороги обеспечивает высокие темпы вывозки и низкие затраты на ремонт и содержание лесовозных автопоездов. Поэтому тема надежности лесовозных дорог (в частности, покрытий) является весьма актуальной.

Надежность дороги в целом зависит от технического уровня и эксплуатационного состояния элементов, входящих в нее. Покрытие лесовозной дороги является определяющим фактором, влияющим на условия движения автопоездов, поэтому надежность покрытий лесовозных автомобильных дорог играет ключевую роль. После того как дорога вводится в эксплуатацию, происходит постепенное нарушение первоначального состояния дорожной одежды под действием повторных нагрузок от транспортных средств и природно-климатических факторов.

Плохое состояние дороги приводит к серьезным экономическим издержкам, является препятствием для экономического роста. Поэтому несоблюдение условий строительства и содержания дорог оборачивается в итоге не только ростом расходов, но и снижением срока службы как самой дороги, так и транспортных средств, вызывая при этом рост числа дорожно-транспортных происшествий.

Учесть все факторы, влияющие на условия работы лесовозной автомобильной дороги, достаточно сложно. Значения параметров, характеризующих состояние дорожного покрытия в процессе эксплуатации, изменяются и являются случайными величинами. Поэтому для решения теоретических задач является целесообразным и обоснованным применение теории вероятностей.

При изучении особенностей работы дорожных покрытий нельзя рассматривать изолированно влияние на них природно-климатических факторов и механических воздействий. Причем необходимо производить комплексное рассмотрение влияния этих двух факторов, поскольку наибольшее разрушение покрытий наблюдается при неблагоприятных погодных условиях, так как происходит ослабление сопротивления материала и увеличивается эффект механического воздействия колес автомобилей. Циклические нагрузки на поверхность дороги от движущегося транспорта, осадки в виде дождя и снега, особенно при их замерзании и оттаивании в межсезонный период, вызывают увеличение дефектов, имеющихся на покрытии дороги. В связи с этим к материалам покрытия предъявляются самые жесткие требования по прочности, тепло- и морозостойчивости, водонепроницаемости, а также подверженности шлифованию и истиранию. Недостаточная морозостойчивость вызывает выкрашивание минеральных частиц. Это приводит к образованию выбоин и снижению срока службы дороги. С другой стороны, необходимо производить оценку соответствия используемых на вывозке древесины транспортных средств тем, которые были приняты при разработке проекта. Анализ проектов дорог, находящихся в эксплуатации на предприятиях лесопромышленного комплекса, выявил серьезные проблемы. Ранее используемые для вывозки отечественные лесовозы имели нагрузку на ось автомобиля, не превышающую 100 кН, что соответствовало расчетной нагрузке типа А. Характерной особенностью современной вывозки древесины является то, что многие участки дорог начинают работать в режиме тяжелого и интенсивного движения. Это вызывает необходимость использования более жестких технических требований в области увеличения расчетной нагрузки. Кроме того, даже при обеспечении максимальной рейсовой нагрузки ее нерациональное размещение на подвижном составе приводит к преждевременному разрушению лесовозных автомобильных дорог.

Непрерывное пользование лесной продукцией является одним из главных принципов ведения лесного хозяйства. При этом ключевым фактором является транспорт, который определяет экономическую доступность лесоматериалов. Его доля в себестоимости лесопродукции доходит до 40 %. Для уменьшения транспортных расходов необходимо обеспечить высокое качество дорог. Требуемые значения параметров дорожной одежды необходимо определять исходя из обеспечения минимальных величин эксплуатационных показателей в течение заданного периода действия лесовозных автомобильных дорог. Недостаточный уровень надежности покрытия является фактором, ограничивающим развитие и ведущим к увеличению транспортных расходов.

Высокие требования предъявляются в связи с этим и к автодорожному строительству. Основными дефектами при строительстве дорожного покрытия являются: недостаточное уплотнение, поперечные трещины, неровности, а также разрывы на поверхности покрытия [3]. В процессе эксплуатации лесовозной автомобильной дороги происходит постепенное развитие этих дефектов под действием транспортных средств и природно-климатических факторов, что в конечном счете приводит к образованию деформаций и разрушению дорожных одежд. Наиболее распространенными деформациями являются выбоины, трещины, выкрашивание, шелушение [3]. Деформации вызывают отказ участка лесовозной дороги и временное ограничение вывозки древесины либо не позволяют обеспечить движение в пределах установленных технических показателей.

На рис. 1 представлена конструкция дорожной одежды лесовозной автомобильной дороги.

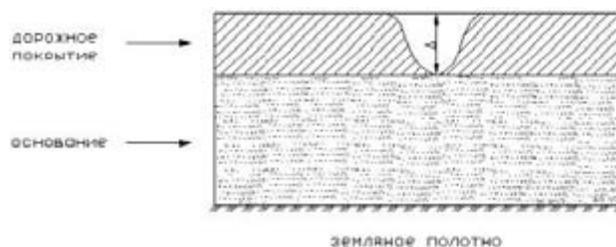


Рис. 1. Конструкция дорожной одежды лесовозной автомобильной дороги

Определим вероятность отказа участка лесовозной автомобильной дороги вследствие развития дефектов. Допустим, что для возникновения отказа на участке дороги длиной L достаточно одного дефекта предельной глубины Δ . Полагая также, что время образования одной ямки предельной глубиной Δ пропорционально разности между толщиной слоя Δ и первоначальной глубиной дефекта D :

$$T = k(\Delta - D) \text{ или } t_i = k(\Delta - d_i), i = 1, \dots, N, \quad (1)$$

где Δ – толщина слоя покрытия; D – глубина дефекта, являющаяся случайной величиной; d_i – первоначальная глубина i -го дефекта; t_i – время образования ямы от i -го дефекта; N – количество дефектов; k – износостойкость для данного материала покрытия.

Пусть D – случайная величина, имеющая усеченное экспоненциальное распределение (рис. 2, формула 2). Распределение усеченное, так как размер дефекта не может быть больше толщины слоя дорожного покрытия

$$f(d) = \frac{\lambda e^{-\lambda d}}{1 - e^{-\lambda \Delta}}. \quad (2)$$

Определим вероятность превышения размера первоначального дефекта некоторого значения d :

$$\begin{aligned} \Pr\{D \geq d\} &= \int_d^{\Delta} f(d) dd = \int_d^{\Delta} \frac{\lambda e^{-\lambda d}}{1 - e^{-\lambda \Delta}} dd = \\ &= \frac{1}{1 - e^{-\lambda \Delta}} \int_d^{\Delta} \lambda e^{-\lambda d} dd = \frac{1}{1 - e^{-\lambda \Delta}} \int_d^{\Delta} e^{-x} dx = \frac{e^{-\lambda d} - e^{-\lambda \Delta}}{1 - e^{-\lambda \Delta}}. \end{aligned} \quad (3)$$

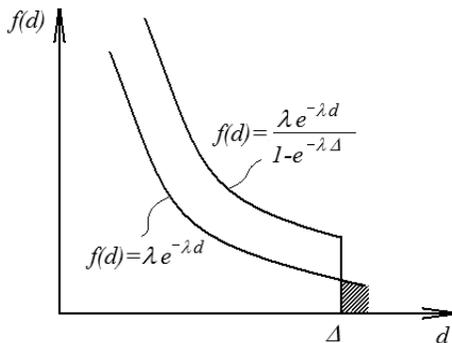


Рис. 2. Экспоненциальное и усеченное экспоненциальное распределения глубины дефекта D

Найдем функцию распределения времени до образования ямы от произвольного дефекта $G(t) = \Pr\{T \leq t\}$ (по определению функции распределения). Подставим в эту зависимость выражение (1). Тогда имеем:

$$\begin{aligned} G(t) &= \Pr\{T \leq t\} = \Pr\{k(\Delta - D) \leq t\} = \\ &= \Pr\left\{D \geq \Delta - \frac{t}{k}\right\} = \frac{e^{-\lambda(\Delta - \frac{t}{k})}}{1 - e^{-\lambda \Delta}} = \frac{e^{\frac{\lambda t}{k}} - 1}{e^{\lambda \Delta} - 1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Время безотказной работы покрытия τ должно определяться из условия $\tau = \min(t_1, \dots, t_N)$. Это время наискорейшего разрушения или появления первого дефекта, достигшего критического размера Δ , наиболее слабого элемента.

В дальнейшем целесообразно определить функцию распределения времени (наработки) до отказа с использованием экстремальных распределений [1], [2].

Напомним: Y_n – наименьшее значение исследуемой случайной величины, то есть $Y_n = \min(x_1, x_2, \dots, x_n)$ известной функции $F(x)$. Функция распределения наименьших значений, то есть случайной величины Y_n , имеет вид [2]:

$$G_n(y) = 1 - [1 - F(y)]^n. \quad (5)$$

В соответствии с этим находим вероятность отказа $H(\tau)$:

$$H(\tau) = \Pr\{\tau < \tau\} = G_N(\tau) = 1 - [1 - G(\tau)]^N. \quad (6)$$

При достаточно большом N имеем:

$$H(\tau) \approx 1 - e^{-NG(\tau)}. \quad (7)$$

Подставляя в формулу (7) выражение (4) для $G(\tau)$, получаем:

$$H(\tau) \approx 1 - \exp\left[-N \frac{e^{\frac{\lambda \tau}{k}} - 1}{e^{\lambda \Delta} - 1}\right].$$

Вероятность безотказной работы, соответственно, равна:

$$R(\tau) = 1 - H(\tau) \approx \exp\left[-N \frac{e^{\frac{\lambda \tau}{k}} - 1}{e^{\lambda \Delta} - 1}\right].$$

Таким образом, используя усеченное экспоненциальное распределение, можно определить вероятность появления отказа на участке лесовозной автомобильной дороги. В дальнейшем эти зависимости могут быть использованы для решения теоретических задач по определению требуемого уровня надежности автомобильной дороги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем: Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 608 с.
- Питухин А. В. Вероятностно-статистические методы механики разрушения и теории катастроф в инженерном проектировании. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1998. 304 с.
- Слободчиков Ю. В. Условия эксплуатации и надежность работы автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1987. 128 с.