

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ В СИСТЕМЕ «АВТОМОБИЛЬ – ДОРОГА»

Асп. СОЛОДКАЯ М. Г.

Белорусский национальный технический университет

Опыт показывает, что эффективность экономики государства зависит от качества автомобильных дорог, одним из важных показателей которого является их ровность, определяющая возможно допустимую скорость движения транспортных средств, а также связанную с ней безопасность движения и стоимость перевозок. При этом в комплексном решении проблемы снижения стоимости перевозок по автомобильным дорогам играют не только затраты на ремонт и содержание самих автомобильных дорог, но и затраты на организацию безопасности движения, ремонт и содержание самих транспортных средств, т. е. непосредственно потребителей коммуникационных услуг.

В результате анализа литературных источников был приобретен значительный объем научной информации о закономерностях формирования требуемых дорожных затрат для получения наибольшего транспортно-экономического эффекта и эффективности перевозок у потребителей. Вместе с тем имеющиеся исследования по проблеме снижения стоимости автомобильных перевозок, отражающие взаимосвязь параметров в системе «автомобиль – дорога», выполнены не в полной мере. Отсутствует комплексное исследование влияния условий эксплуатации дороги на техническую скорость грузовых автомобилей разных марок при решении задач оперативного планирования перевозок, а также при оценке влияния ровности дороги *IRI* на стоимость автомобильных перевозок.

Анализ предприятиями различных отраслей промышленности влияния индекса *IRI* на экономику автомобильных перевозок показал, что эти перевозки нуждаются в комплексных исследованиях технических и экономических вопросов. При этом в качестве единого интегрального параметра может быть выбрана полная стоимость автомобильных перевозок, зависящая от ровности дорожных покрытий и непо-

средственно связанных с ней рациональных скоростей движения грузового транспорта.

Необходимо разработать новый подход к оценке качества участка автомобильной дороги, включающий метод динамического моделирования транспортных нагрузок на основе вероятностно-статистической оценки влияния таких факторов, как ровность дороги, параметры движущихся машин и установившаяся скорость движения транспортных средств. Именно эти факторы являются наиболее значимыми для повышения экономичности грузовых перевозок. Таким образом, целью исследования является разработка научно-практических рекомендаций по обоснованию требуемой ровности автомобильных дорог на основе технико-экономической оценки рациональных скоростей движения грузового транспорта. Поэтому для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать метод оценки динамического взаимодействия грузового автомобиля с дорогой на основе математической модели, учитывающей сглаживающую способность разнотипных шин и подвески, а также случайную неровность поверхности дороги;
- выбрать наиболее значимые факторы предложенной модели для оценки динамического взаимодействия грузового автомобиля с ровностью дороги на основе полного факторного эксперимента;
- определить влияние ровности автомобильной дороги в совокупности с другими факторами на технико-экономические показатели перевозки грузов;
- разработать экономико-математические модели влияния основных факторов на показатель полной стоимости грузовых автомобильных перевозок;
- обосновать требуемую ровность автомобильных дорог на основе экономической оцен-

ки рациональной скорости движения грузового транспорта и соответствующего уровня полной стоимости перевозки грузов;

- разработать рекомендации по определению планируемых и фактических затрат на перевозку грузов с учетом рациональной скорости движения грузовых автомобилей.

Критерии выбора требуемой ровности дороги могут быть научно обоснованы, если они комплексно технико-экономически скорректированы и направлены для использования в нормативной документации. Это может быть осуществлено на основе прогноза случайного динамического взаимодействия потока машин с поверхностью дороги, что позволит установить уровни рациональных скоростей движения грузового транспорта.

Для исследования оценки динамического взаимодействия грузового автомобиля с дорогой с учетом сглаживающей способности разнотипных шин и подвески, а также случайного профиля неровности дороги была разработана виртуальная модель (динамическая схема и математическая модель взаимодействия автомобиля и неровностей дороги с эффектом «сглаживания»). Были выбраны параметры случайной неровности (длины и высоты) исходя из имеющихся вероятностно-статистических оценок индекса *IRI* наиболее характерных участков отечественных дорог. Разработана программно-методика экспериментальной проверки адекватности математической модели с указанием параметров ее соответствия движению реальных транспортных средств. Выполнена оценка с получением регрессионных зависимостей комплекса факторов, определяющих весь спектр динамических взаимодействий грузового автомобиля и поверхности дороги с выбором наиболее значимых факторов.

Поскольку установлено, что взаимодействие автомобиля и дороги в реальных условиях происходит с учетом перемещений и вращений массы автомобиля относительно трех базовых осей ординат, идеальная модель должна включать достаточно большое количество масс и упругостей. Очевидную громоздкость, труднодостижимую точность и сложность решения такой системы дифференциальных уравнений можно исключить, применив упрощенную модель, адекватную задачам исследований при

приемлемой погрешности результата. Поэтому в качестве объекта моделирования была выбрана «плоская  $\frac{1}{2}$ » или «велосипедная» модель автомобиля, включающая массу машины, соответствующие упругие и демпфирующие элементы шин и подвески.

В предложенной модели неровность дороги (индекс *IRI*) определяет среднее значение амплитуд неровностей, которые представлены последовательностью случайных синусоид с фиксированной на каждом шаге счета амплитудой *A* и длиной неровности *D*. Высота текущих неровностей дороги  $q_z$  в момент времени *t* имеет вид последовательности случайных синусоид с фиксированной амплитудой  $A = f(IRI)$ , длиной *D* неровности и скорости движения автомобиля *v*:

$$q_z = \frac{A}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{2\pi v}{D} t \right) \right]. \quad (1)$$

Для численного решения задачи была составлена программа «Расчет динамических параметров в системе “автомобиль – дорога”», прошедшая сертификацию и регистрацию в установленном порядке. Процесс моделирования включает генерацию, выбор и замену случайных амплитуд и длин неровностей в процессе одного счета. Для удобства расчета эта программа содержит модули подготовки, введение исходных данных и визуализацию полученных процессов.

По результатам исследований проведено сравнение средних значений скорости вертикальных перемещений центра масс автомобиля, полученных моделированием и экспериментальным путем в зависимости от скорости движения автомобиля. Максимальная погрешность результатов расчетов и эксперимента не превышала 5 %, что можно считать допустимым.

Полученная адекватная математическая модель позволила перейти к комплексному исследованию функциональной зависимости максимальных динамических нагрузок  $P_{\max}$  от ряда параметров

$$P_{\max} = f(IRI, U_{IRI}, v, m_a), \quad (2)$$

где *IRI* ( $X_1$ ) – среднестатистические значения индекса ровности дорожного покрытия, соответствующего исследуемому участку;

$U_{IRI}(X_2)$  – коэффициент вариации индекса ровности дорожного покрытия;  $v(X_3)$  – установившаяся скорость движения автомобиля;  $m_a(X_4)$  – полная масса автомобиля.

Оценку влияния ровности дорожных покрытий на скорость моделируемых условно реальных объектов движения производили по максимальным динамическим воздействиям выбранного для этого грузового автомобиля МАЗ-5440Х5 как имеющего наименьшую колесную базу (наибольшие динамические воздействия) при статической осевой нагрузке, близкой к разрешенной критической. Оценку проводили применительно к магистральным автомобильным дорогам.

С целью проведения моделирующих расчетов были использованы метод планирования полного факторного эксперимента и программа расчета коэффициентов регрессии для установления значимости факторов, определяющих величину максимальных  $P_{\max}$  и средних  $P_{\text{ср}}$  динамических нагрузок, а также для установления функциональной зависимости изменения динамической нагрузки от обозначенных факторов. Были установлены уравнения регрессий в виде максимальных и средних динамических нагрузок автомобиля для передней и задней его осей.

Анализируя полученные зависимости и коэффициенты регрессии, можно резюмировать, что показатель индекса ровности  $IRI$  является наиболее важным фактором, следующим за массой автомобиля. При расстановке их значимости можно выделить следующую последовательность: масса автомобиля, ровность покрытия и скорость автомобиля.

Таким образом, при помощи полученных зависимостей становится весьма удобно и относительно просто определять величину динамической нагрузки автомобиля при любом сочетании выбранных факторов и с требуемой погрешностью в вычислениях. Поскольку наибольшую нагрузку на дорожное покрытие оказывает задняя ось автомобиля, в дальнейших исследованиях использовано критическое уравнение регрессии следующего вида:

$$Y_{P_{\max}^{\text{зад}}} = 78400 + 16160X_1 + 777,6X_2 + 6720X_3 + 68230X_4 + 364,9X_1X_2 + 4900X_1X_3 + 13720X_1X_4 - 40,44X_2X_3 + 597,4X_2X_4 + 6405X_3X_4. \quad (3)$$

Также проведен эксперимент для установления критических значений коэффициента динамичности  $K_{\text{дин}}$  по индексу ровности  $IRI$  и скорости движения  $v$ . Расчеты позволили определить поле максимальных (допускаемых) коэффициентов  $K_{\text{дин}}$  для различных значений  $IRI$  и скоростей  $v$  движения автомобилей. Критерий  $K_{\text{дин}}$  комплексно характеризует качество и стабильность процесса перевозки грузов с учетом возможных повреждений дороги и автомобиля. Максимальный коэффициент динамичности  $K_{\text{дин}}$  вычисляется по формуле

$$K_{\text{дин}} = P_{\max}/P_c, \quad (4)$$

где  $P_{\max}$  – максимальная динамическая нагрузка на заднюю ось автомобиля, кН;  $P_c$  – статическая нагрузка на заднюю ось автомобиля, кН.

При движении динамическая нагрузка автомобиля на дорогу не должна превышать расчетную нагрузку на ось для данного участка дороги. В случае превышения динамической нагрузки автомобиля дорожное покрытие на существующей автомобильной дороге разрушается.

По результатам исследований можно сделать вывод о том, что несоответствие эксплуатационных характеристик и в первую очередь индекса ровности  $IRI$  требуемым  $K_{\text{дин}}$  заведомо ведет к преждевременному разрушению дороги, повреждению автомобиля, низкой безопасности движения и сохранности груза, включая негативное воздействие на пассажиров. Чтобы этого не происходило, следует строго соблюдать рекомендацию: дорога не должна эксплуатироваться при превышении показателя  $K_{\text{дин}}$ . Для выполнения этого условия необходимо проводить специальные мероприятия (устранение неровности, ограничение скорости движения и т. п.).

Известно, что затраты дорожного хозяйства в значительной степени зависят от степени загрузки дорог автомобильными перевозками. При этом одной из основных проблем повышения производительности автомобилей является увеличение средних технических скоростей движения. При движении автомобиля по дорогам с неровным покрытием от скорости движения зависят динамические нагрузки автомобиля, превышение которых не является сегодня экономически приемлемым. Установив влияние

Таблица 1

**Рациональные скорости движения грузового автомобиля МАЗ в зависимости от индекса ровности дорожного покрытия**

Показатель ровности <i>IRI</i> , м/км	Рациональная скорость, км/ч
До 1,5 включ.	100
Более 1,5 до 2,0 включ.	96
То же 2,0 до 2,5 то же	92
» 2,5 до 3,0 »	84
» 3,0 до 3,5 »	79
» 3,5 до 4,0 »	70
» 4,0 до 4,5 »	63

ровности дороги и скорости движения на изменение динамических нагрузок грузового автомобиля максимальной массы, при помощи разработанной математической модели получены данные, отражающие изменения коэффициента динамичности для различных скоростей движения (рис. 1).

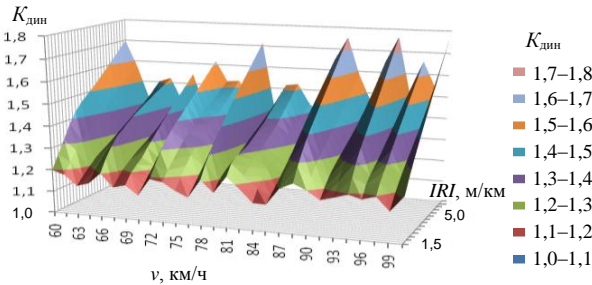


Рис. 1. Графики изменений максимального значения  $K_{дин}$  по формуле (3) от *IRI* при разных скоростях движения

Чтобы выяснить, как степень ровности влияет на скорость движения автомобилей, были проведены исследования на различных дорогах. Используя приемы математической статистики, обрабатывались выходные данные программы «Расчет динамических параметров в системе «автомобиль – дорога»» для определения рациональных скоростей, зависящих от показателя ровности дорожного покрытия. В табл. 1 показаны рекомендуемые скорости движения грузового автомобиля МАЗ-5440Х5 в зависимости от индекса ровности дорожного покрытия.

В результате обработки результатов наблюдений получены рациональные скорости движения грузовых автомобилей на участках дорог с различным индексом ровности. Исходя из данных табл. 1, рекомендуется устанавливать скоростной режим движения в зависимости от текущего показателя индекса ровности.

Так, для отечественных магистралей с показателем индекса ровности в пределах  $IRI \leq 2,5$  м/км скорость движения большегрузных автомобилей не должна превышать 90 км/ч. При диагностированных индексах ровности *IRI* более 4,5 м/км экономическая эффективность эксплуатации грузового автомобиля будет сведена к минимуму вследствие возникновения дополнительных разрушающих воздействий на дорожное покрытие и издержек по эксплуатации автомобиля.

**ВЫВОД**

Проведенный теоретический анализ закономерности взаимодействия компонентов в системе «автомобиль – дорога» позволил установить критические значения коэффициента динамичности  $K_{дин}$ , который комплексно характеризует качество и стабильность процесса перевозки грузов с учетом возможных повреждений дороги и автомобиля. Получены рациональные скорости движения грузовых автомобилей на участках дорог с различным индексом ровности.

Поступила 04.01.2013