

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 625.8:629.113

**О ЗАВИСИМОСТИ РАСХОДА ТОПЛИВА И ВЛИЯНИИ НА НЕГО СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ И ДОРОЖНЫХ УСЛОВИЙ****В.В. Филиппов, проф., д.т.н., Н.В. Смирнова, доц., к.т.н., Д.Н. Леонтьев, доц., к.т.н., Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет**

*Аннотация.* Проанализированы и уточнены зависимости расхода топлива при влиянии на него скорости движения автомобиля и дорожных условий. Результаты исследований позволяют повысить точность и достоверность выводов о преимуществе принятого к строительству варианта реконструкции или капитального ремонта дороги. Приведены результаты моделирования.

*Ключевые слова:* автомобильная дорога, режимы движения автомобилей, скорость движения автомобиля, расход топлива.

**ПРО ЗАЛЕЖНІСТЬ ВИТРАТИ ПАЛИВА І ВПЛИВ НА НЕЇ ШВИДКОСТІ РУХУ АВТОМОБІЛЯ І ДОРОЖНІХ УМОВ****В.В. Філіппов, проф., д.т.н., Н.В. Смірнова, доц., к.т.н., Д.М. Леонтьєв, доц., к.т.н., Харківський національний автомобільно-дорожній університет**

*Анотація.* Проаналізовано та уточнено залежності витрати палива при впливі на неї швидкості руху автомобіля і дорожніх умов. Результати досліджень дозволяють підвищити точність і достовірність висновків про перевагу прийнятого до будівництва варіанта реконструкції або капітального ремонту дороги. Наведено результати моделювання.

*Ключові слова:* автомобільна дорога, режими руху автомобілів, швидкість руху автомобіля, витрата палива.

**ON DEPENDENCE OF FUEL CONSUMPTION AND THE IMPACT OF VEHICLE SPEED AND ROAD CONDITIONS ON IT****V. Filippov, Prof., D.Sc. (Eng.), N. Smirnova, Assoc. Prof., Cand. Sc. (Eng.), D. Leontyev, Assoc. Prof., Cand. Sc. (Eng.),  
Kharkiv National Automobile and Highway University**

*Abstract.* The dependence of fuel consumption under the influence of vehicle speed and road conditions are analyzed and specified. The research results allow to improve the accuracy and reliability of conclusions about the benefits of the option selected for roadway replacement and reconstruction. The results of modelling are presented.

*Key words:* road, traffic condition, vehicle speed, fuel consumption.

**Введение**

При сравнении проектных вариантов дороги транспортные издержки оценивают только

по существенно осредненным показателям, что, безусловно, снижает точность и достоверность выводов о преимуществе принятого к строительству варианта дороги, варианта её

реконструкции или капитального ремонта, поэтому способ определения транспортных издержек требует анализа и уточнения. Известно, что в транспортных издержках наибольшую часть составляет расход топлива, который в значительной степени зависит от дорожных условий, поэтому при поиске рационального варианта проектного решения строительства, реконструкции или капитального ремонта дороги необходимо повышение точности расчетов именно этого показателя.

### Анализ публикаций

Расход топлива, необходимый для движения по заданному участку дороги, зависит как от параметров дороги, так и от параметров автомобиля. Влияние параметров автомобиля на расход топлива детально изучено и представлено в виде аналитических решений в зависимости от скорости движения автомобиля [1–3].

### Цель и постановка задачи

В настоящей статье исследованы закономерности расхода топлива от дорожных условий.

Целью исследований является повышение точности расчетов расхода топлива, а также обоснование необходимости детальных расчетов составляющих транспортных издержек в течение её межремонтных периодов эксплуатации.

### Определение расхода топлива при изменении дорожных условий

Скорость движения автомобиля водитель устанавливает в соответствии с дорожными условиями, которые определяются планом и профилем дороги (рис. 1) и показателями её эксплуатационного состояния.

Моделируя действия водителя по выбору режима движения автомобиля в транспортном потоке, получают детальные графики скорости вдоль дороги, пример которых показан на рис. 2, учитывая обобщающие дорожные условия, изложенные в работе [4].

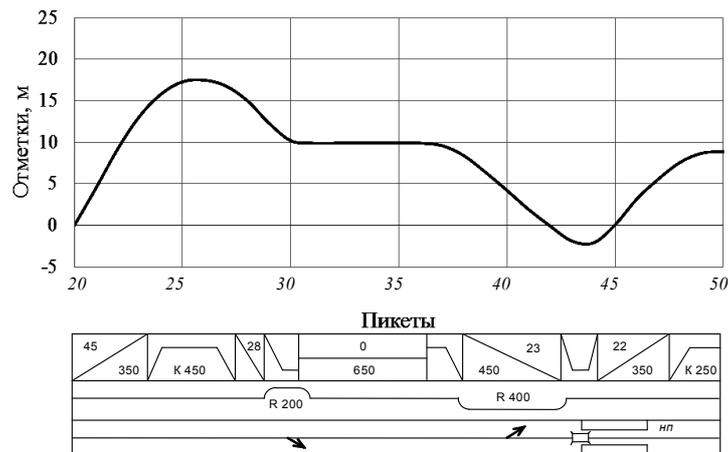


Рис. 1. План и продольный профиль дороги

Решая задачу определения расхода топлива при изменении дорожных условий на отдельных участках дороги с учетом изменения скорости основных типов автомобилей, становится возможным повышение точности определения транспортных издержек.

При определении расхода топлива, кроме скорости движения, необходимо также учитывать составляющие сил сопротивления движению и затраты мощности на движение, как утверждают авторы работы [3]. В основе расчета расхода топлива, необходимого для преодоления участка дороги длиной  $s$  км со скоростью  $V$  км/ч – математическая модель,

построенная на синтезе уравнений движения автомобиля и различных характеристик режимов работы двигателей. Согласно этой модели общее уравнение расхода топлива представлено в виде [3]

$$G_s = \frac{1}{\eta_i} (A \cdot i_k + B \cdot i_k \cdot V_a + C(G_a \cdot \psi + 0,077kF \cdot V_a^2 + 0,1\beta \cdot j \cdot G_a)), \quad (1)$$

где  $G_a$  – вес автомобиля, Н;  $V_a$  и  $j$  – его скорость, км/ч, и ускорение или замедление, м/с<sup>2</sup>;  $kF$  – фактор обтекаемости, Нс<sup>2</sup>м<sup>-2</sup>;  $i_k$  – передаточное число используемой передачи;

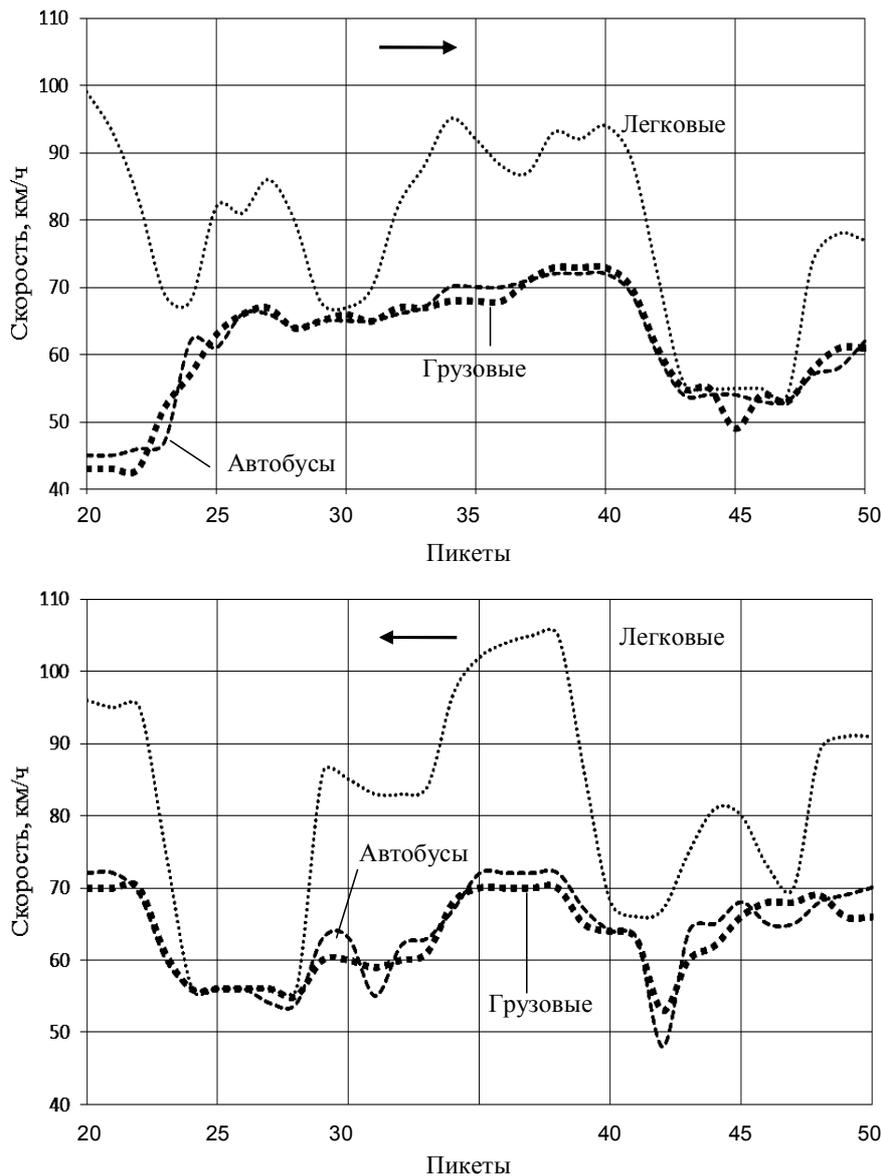


Рис. 2. Скорости по типам автомобилей при интенсивности 300 авт/ч

$\psi$  – дорожные сопротивления;  $\eta_i$  – индикаторный КПД двигателя;  $A, B, C$  – коэффициенты, зависящие от конструкции автомобиля ( $r_k$  – радиус качения колеса, м;  $i_o$  – передаточное число главной передачи;  $\eta_{тр}$  – КПД трансмиссии) и двигателя ( $S_n$  – ход поршня, м;  $V_h$  – объем двигателя, м<sup>3</sup>), параметров топлива ( $\rho_t$  – плотность топлива, т/м<sup>3</sup>,  $H_n$  – коэффициент низшей теплоты сгорания, кДж/кг) и вычисляемые по формулам:

– для дизелей

$$A = \frac{381 \cdot V_h \cdot i_o}{H_n \rho_t r_k}, B = \frac{11 \cdot V_h S_n i_o^2}{H_n \rho_t r_k^2}; \quad (2)$$

– для бензиновых двигателей

$$A = \frac{358 \cdot V_h \cdot i_o}{H_n \rho_t r_k}, B = \frac{9 \cdot V_h S_n i_o^2}{H_n \rho_t r_k^2}; \quad (3)$$

– для тех и других двигателей

$$C = \frac{100}{H_n \rho_t \eta_{тр}}. \quad (4)$$

Например, для автомобиля ЗИЛ-431410:  $A = 0,85, B = 0,026, C = 0,0035$ .

Дорожное сопротивление ( $\psi$ ) академик Е.А. Чудаков [1] представил в виде суммы продольного уклона дороги ( $i$ ) и коэффициента сопротивления качению ( $f$ ). Первая составляющая определяется рельефом местно-

сти, а вторая зависит от характеристики ровности проезжей части [5] и определяется зависимостью

$$f = f_0 + \alpha \cdot S_p \cdot v^2, \quad (5)$$

где  $f_0$  – коэффициент сопротивления качению при относительно малых скоростях движения автомобиля (до 20 км/ч);  $\alpha$  – коэффициент жесткости подвески автомобиля, равный  $5 \cdot 10^{-7}$  – для легковых автомобилей и  $7 \cdot 10^{-7}$  – для остальных;  $S_p$  – показания толчкомера, см/км, характеризующие ровность проезжей части.

Индикаторный КПД двигателя в уравнении (1) авторы работы [3] предлагают вычислять в зависимости от процента использования мощности двигателя  $N_1$ , зависящего от дорожных условий и скорости автомобиля:

– для бензиновых двигателей

$$\eta_i \approx 0,272 + 0,0011 \cdot N_1; \quad (6)$$

– для дизелей

$$\eta_i \approx 0,43 + 0,3 \cdot 10^{-2} \cdot N_1 - 0,3 \cdot 10^{-4} \cdot N_1^2. \quad (7)$$

Входящий в эти выражения процент использования мощности двигателя зависит от дорожных условий и режима движения автомобиля

$$N_1 = 0,0277 (G_a \cdot \psi \cdot V_a + 0,077 kF \cdot V_a^3 + 0,1\beta \cdot j \cdot G_a \cdot V_a) / (N_{\max} K_k \eta_{\text{тр}}), \quad (8)$$

где  $N_{\max}$  – максимальная мощность двигателя, кВт,  $K_k$  – коэффициент корреляции максимальной мощности двигателя (0,9).

На основе вышеизложенного материала выполним расчет, на примере грузового автомобиля средней грузоподъемности, расхода топлива в зависимости от дорожных факторов и условий.

Для расчета примем следующие параметры автомобиля: собственная масса  $m_a = 4520$  кг, грузоподъемность  $m_{\text{гр}} = 5000$  кг, коэффициент использования грузоподъемности  $\gamma = 0,8$ , вес автомобиля с грузом  $G_a = (m_a + m_{\text{гр}} \cdot \gamma) \cdot g = (4520 + 5000 \cdot 0,8) \cdot 9,81 = 83581$  Н, максимальная мощность двигателя  $N_{\max} = 110$  кВт (150 л.с.), радиус качения колеса  $r_k = 0,48$  м,

фактор обтекаемости  $kF = 2,41$  Нс<sup>2</sup>м<sup>-2</sup>, передаточное число главной передачи  $i_0 = 6,32$ , передаточные числа коробок передач от низшей к высшей  $i_k$  (7,44; 4,10; 2,29; 1,47; 1,00), КПД трансмиссии – 0,85.

Параметры проезжей части: продольный уклон  $i = 0,02$ , коэффициент сопротивления качению  $f_0 = 0,015$ , показания толчкомера  $S_p = 60$  см/км. Автомобиль движется по данному участку равномерно со скоростью 50 км/ч (13,89 м/с) на четвертой передаче ( $i_k=1,47$ ).

Расчет выполним в следующей последовательности.

1. Коэффициент сопротивления качению, с учетом его зависимости от скорости по Б.С. Фалькевичу (в скобках) и показаний толчкомера по А.К. Бируля

$$f = f_0(1 + 0,00065v^2) + \alpha \cdot S_p \cdot v^2 = 0,015(1 + 0,00065 \cdot 13,88^2) + 7 \cdot 10^{-7} \times 60 \cdot 13,88^2 = 0,025.$$

2. Дорожные сопротивления  $\psi = i + f = 0,02 + 0,025 = 0,045$ .

3. Коэффициенты:  $A = 0,85$ ,  $B = 0,026$ ,  $C = 0,0035$  – примем такие же, как и у автомобиля ЗИЛ-431410.

4. Процент использования мощности двигателя

$$N_1 = 0,0277 (G_a \cdot \psi \cdot V_a + 0,077 kF \cdot V_a^3 + 0,1\beta \cdot j \cdot G_a \cdot V_a) / (N_{\max} K_k \eta_{\text{тр}}) = 0,0277 (83581 \cdot 0,045 \cdot 50 + 0,077 \cdot 2,41 \cdot 50^3) / (110 \cdot 0,9 \cdot 0,85) = 69,8 \%$$

5. Индикаторный КПД двигателя

$$\eta_i \approx 0,272 + 0,0011 \cdot N_1 = 0,272 + 0,0011 \cdot 69,8 = 0,35.$$

6. Расход топлива

$$G_s = \frac{1}{\eta_i} (A \cdot i_k + B \cdot i_k \cdot V_a + C(G_a \cdot \psi + 0,077 kF \cdot V_a^2 + 0,1\beta \cdot j \cdot G_a)) = \frac{1}{0,35} (0,85 \cdot 1,47 + 0,026 \cdot 1,47 \cdot 50 + 0,00305 \times (83581 \cdot 0,045 + 0,077 \cdot 2,41 \cdot 50^2)) = 42,2.$$

Таким образом, на расчетном участке дороги для принятого автомобиля средней грузоподъемности расход топлива составит 42,2 л на 100 км пробега.

На рис. 3 и 4 показаны зависимости расхода топлива от скорости движения автомобиля и продольного уклона дороги, при отличной ровности проезжей части.

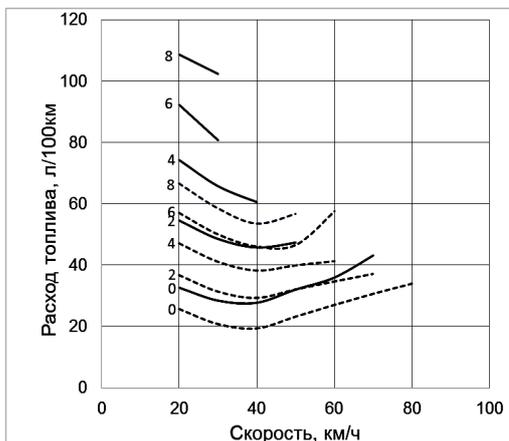


Рис. 3. Расход топлива автомобиля ЗИЛ-431410: сплошная – грузеный автомобиль; пунктирная – снаряженный; показатель ровности – 50 см/км; дорожное покрытие – асфальтобетон; цифры возле кривых – уклон дороги, %

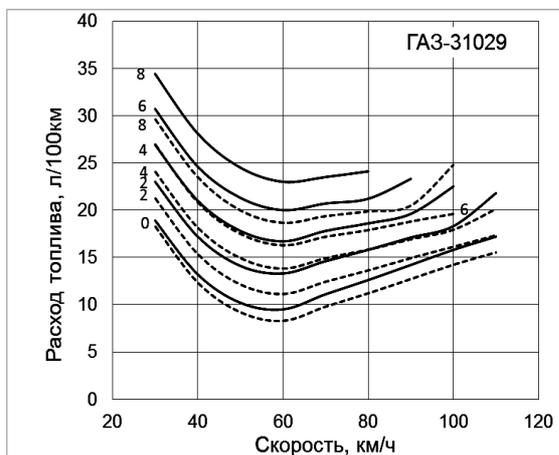


Рис. 4. Расход топлива автомобиля ГАЗ-3102 (Волга): сплошная – грузеный автомобиль; пунктир – снаряженный; показатель ровности – 50 см/км; дорожное покрытие – асфальтобетон; цифры возле кривых – уклон дороги, %

Отличное состояние ровности проезжей части «держится» первые несколько лет после строительства или капитального ремонта. За срок 5–8 лет показатель ровности ухудшает-

ся до критических значений 100–150 см/км и повышается при текущем среднем или капитальном ремонте.

Зависимости расхода топлива от ровности покрытия проезжей части в межремонтный срок показаны на рис. 5 и 6.

Анализ результатов расчетов показал, что учет изменения расхода топлива автомобиля в конце межремонтного срока дороги при движении по неровной проезжей части, по сравнению с новой дорогой или дорогой после капитального ремонта, приводит к значительному увеличению транспортных издержек.

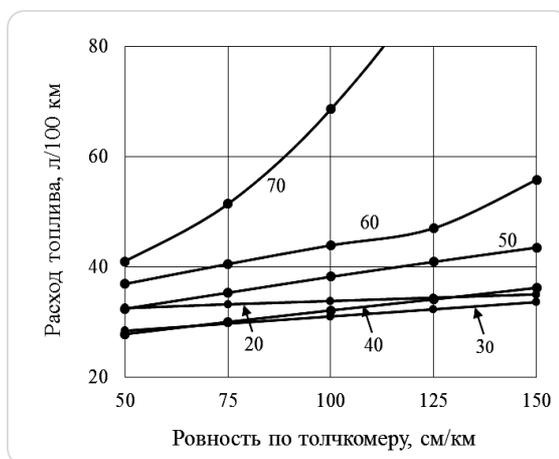


Рис. 5. Зависимость расхода топлива ЗИЛ-431410 от ровности дороги: грузеный автомобиль; дорожное покрытие – асфальтобетон; цифры на кривых – скорость, км/ч; уклон дороги 0 %

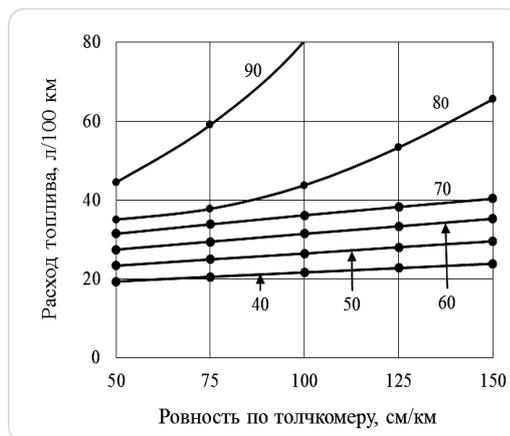


Рис. 6. Зависимость расхода топлива ЗИЛ-431410 от ровности дороги: снаряженный автомобиль; дорожное покрытие – асфальтобетон; цифры на кривых – скорость, км/ч; уклон дороги 0 %

Зависимость расхода топлива от ровности дороги при скоростях до 50–60 км/ч для грузженных автомобилей и до 70 км/ч для снаряженных автомобилей средней грузоподъемности практически линейная

$$G_s = a_v + b_v(S_p - 50), \quad (9)$$

где  $a_v$  – коэффициент, зависящий от скорости движения автомобиля  $v$  и дорожных условий его движения;  $b_v$  – коэффициент пропорциональности, также зависящий от скорости движения автомобиля  $v$  и дорожных условий его движения.

Например, при нулевом уклоне для ЗИЛ-431410 в грузном состоянии при скорости 60 км/ч  $a_v = 32,4$  л/100 км, а  $b_v = 0,111$  л/(100 км/(см/км)).

Для анализируемых участков дороги все выявленные таким образом зависимости обобщаются на графиках путевых расходов топлива с размерностью л/100 м (рис. 7).

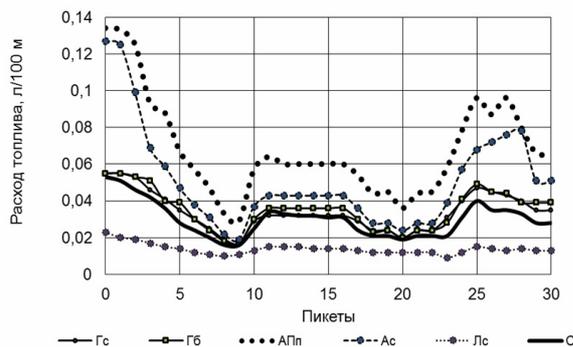


Рис. 7. Расход топлива по типам автомобилей на участке дороги

Такая размерность соизмерима с привычной для инженеров-дорожников единицей измерения длины (пикет – 100 м) в проекте дороги. Анализируя результаты расчетов на рис. 7, можно провести сравнительную оценку вариантов проектных решений и выбрать наиболее рациональное из них в отношении строительства, реконструкции или капитального ремонта дороги. На рис. 7 приведен пример расчетов для участка дороги, план и продольный профиль которой показаны на рис. 1, а скорости движения – на рис. 2. Обозначения типов автомобилей потока на рис. 7 приняты следующие: Гс – грузовые средние,

Гб – грузовые большие, АПп – автопоезда, Ас – автобусы средние, Лс – легковые средние, С – средний расход топлива для данного потока.

## Выводы

Приведенные результаты исследования закономерностей расхода топлива от дорожных условий показали:

- во-первых, точность расчетов может оказать существенное влияние на транспортные издержки, в частности, точность расчета расхода топлива при перевозках по сравнению с осредненными его значениями;
- во-вторых, существует необходимость детальных расчетов составляющих транспортных издержек, как вдоль дороги, так и в течение её межремонтных периодов эксплуатации;
- в-третьих, есть необходимость такого рода расчетов не для отдельного «среднего» автомобиля, а для всех основных типов автомобилей в расчетном составе транспортного потока на данной дороге.

## Литература

1. Литвинов А.С. Автомобиль. Теория эксплуатационных свойств: учебник / А.С. Литвинов, Я.А. Фаробин. – М.: Машиностроение, 1989.
2. Агейкин Я.С. Теория автомобиля: учебное пособие / Я.С. Агейкин, Н.С. Вольская. – М.: МГИУ, 2008. – 318 с.
3. Говорущенко Н.Я. Системотехника проектирования транспортных машин: учебное пособие / Н.Я. Говорущенко, А.Н. Туренко. – Х.: ХНАДУ, 2004. – 208 с.
4. Филиппов В.В. Моделирование транспортных потоков на дорогах II–IV категорий / В.В. Филиппов, Н.В. Смирнова. – Х.: ХНАДУ, 2014. – 200 с.
5. Справочная энциклопедия дорожника. Том II. Ремонт и содержание автомобильных дорог / под ред. А.П. Васильева. – М.: Информавтодор, 2004.

Рецензент: В.П.Волков, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 6 ноября 2014 г.