

## Транспорт

УДК 625.7

DOI: 10.30987/article\_5bf3cb4e464f65.28737617

А.Н. Архангельский

### КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ УЧАСТКА АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ ПО РЕАЛИЗУЕМОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ КОНКРЕТНОГО АВТОМОБИЛЯ

Разработана методика оценки транспортно-эксплуатационных качеств участка автомобильной дороги, предусматривающая применение метода моделирования на ЭВМ с использованием доступных программных средств.

**Ключевые слова:** автомобильная дорога, скорость движения, видимость, безопасность, моделирование.

A.N. Arkhangelsky

### COMPLEX ASSESSMENT OF HIGHWAY PART STATE ACCORDING TO ACTUAL SPEED OF MOVEMENT OF SPECIFIC MOTOR CAR

The procedure for the assessment of transport-operation properties of the area of the highway is developed. As a criterion for an assessment a realizable speed of vehicular traffic is offered to be accepted taking into account the limitations imposed by conditions of visibility support, by safety of planned curve passages and dynamic characteristics of a reference transport vehicle.

The procedure foresees the application of the computer modeling method with the use of available software tools.

The accepted values of a convenient speed allow defining an average speed of a specific motor car, variation and dynamics of its changes, revealing problem places of the highway area under consideration and planning measures to improve traffic conditions on it.

**Key words:** highway, speed of movement, visibility, safety, modeling.

#### Введение

Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог определяются скоростью и себестоимостью перевозок, безопасностью и удобством проезда по дороге, её пропускной способностью. Оценка этих качеств представляет определённые трудности, связанные с необходимостью учёта большого числа факторов, их определяющих.

Наиболее информативным обобщённым показателем дороги является реализуемая автомобилями конкретного типа скорость движения и динамика её изменения по длине дороги. Эти показатели необходимо использовать при оценке текущего состояния дороги и назначении мероприятий, направленных на повышение транспортно-эксплуатационных качеств дороги в целом.

Скорость движения конкретного типа автомобиля на конкретном участке автомобильной дороги зависит от параметров

дороги (уклон, радиус плановой кривой, коэффициент сцепления, расстояние видимости поверхности дороги), тягово-скоростных характеристик автотранспортного средства (АТС), условий движения (метеорологические условия, интенсивность движения) и стиля управления водителя АТС.

Максимальная скорость движения автомобиля в конкретных дорожных условиях определяется тягово-скоростными характеристиками конкретного автомобиля.

Для определения максимальной реализуемой скорости необходимо учесть её ограничения, установленные Правилами дорожного движения.

Для определения безопасной скорости движения необходимо учесть также особенности проезда автомобиля по плановым кривым и видимость по условиям остановки по направлению движения.

Для определения комфортной скорости движения необходимо учесть особенности функционирования биомеханической системы «автомобиль – водитель – дорога».

Величину комфортной скорости предполагается определять как минимальную из трёх значений:

- скорость, определяемая безопасностью движения по условию видимости дороги;
- скорость, определяемая безопасностью движения по условию проезда плано-

вого закругления;

– скорость, определяемая динамическими характеристиками автомобиля.

Разработанная методика иллюстрируется на примере рассмотрения движения автомобиля «Газель-Next» (А21R22) (загрузка 90 %) по автомобильной дороге длиной 1,9 км, продольный профиль которой представлен на рис. 1. План дороги содержит плановую кривую радиусом 600 м.

### Формирование детального продольного профиля дороги

Для решения поставленных задач необходимо рассчитать детальный профиль рассматриваемого участка дороги с отметками поверхности дороги с шагом 20 м.

По результатам такого описания можно определить отметки продольного профиля с шагом 20 м. Так как шаг в 20 м соответствует минимальному шагу геодезического обеспечения при строительстве автомобильной дороги, то следует ожидать достаточно точного совпадения расчётного и реального продольного профиля дороги.

Для упрощения обработки длина рассматриваемого участка должна быть кратна шагу исходных данных (100 м). В набор данных вводятся две дополнительные точки: нулевая – с отметкой, равной отметке первой точки и удалённой на минус шаг от первой точки; дополнительная – с отметкой, равной отметке последней точки и удалённой на шаг от последней точки.

Математическое описание поверхности дороги представим в виде функции  $Y=f(X)$ . Достаточно простое и в то же время достаточно точное описание можно получить при использовании аппроксимации  $Y=f(X)$  в форме сплайн-функции. Наиболее удобным является использование для решения рассматриваемой задачи кубической сплайн-функции [1].

Расчёт отметок детального продольного профиля выполняется с помощью программы V-ТЕКД (разработка автора). Для запуска программы необходимо подготовить текстовый файл, включающий номера пикетов и отметки точек поверхности дороги на этих пикетах.

Программа V-ТЕКД записывает в директорию программы два файла: V-T и V-D. Отметки точек профиля с шагом 20 м в файле V-T.

Пример продольного профиля дороги, построенного в среде программы Open Office, приведён на рис. 1.

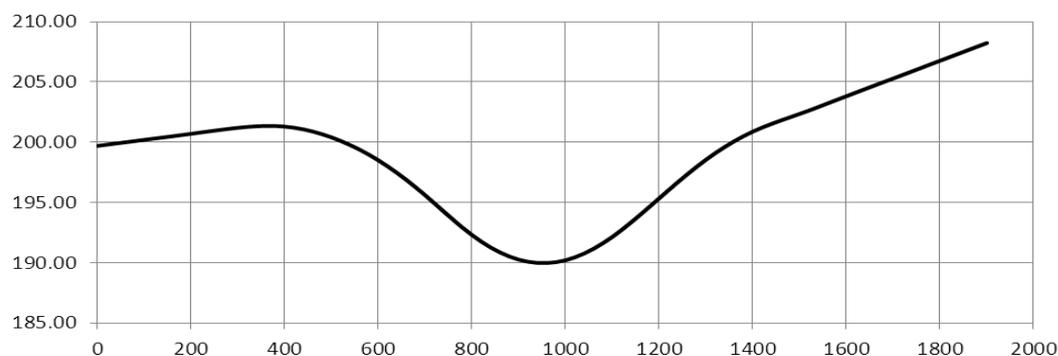


Рис. 1. Продольный профиль дороги (прямо)

## Определение расстояния видимости поверхности дороги

Рассмотрим задачу определения расстояния видимости в профиле дороги. Рас-

чётная схема приведена на рис. 2.

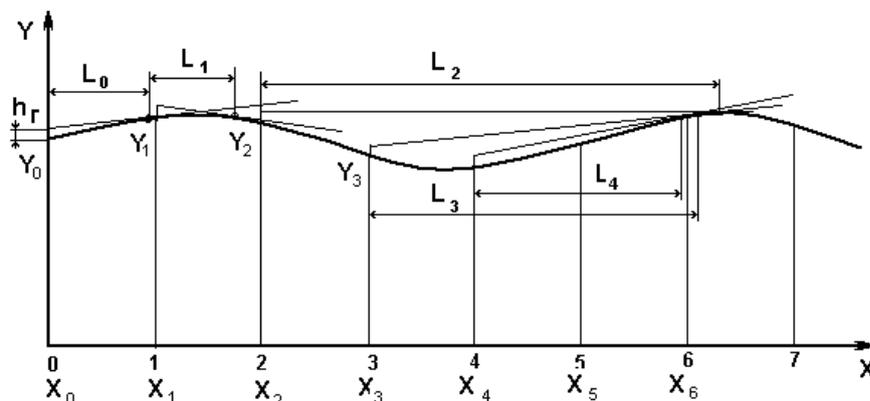


Рис. 2. Схема для расчёта расстояния видимости:  
 $h_r$  – высота точки наблюдения (уровень глаз водителя) относительно поверхности дороги;  $L_i$  – расстояние геометрической видимости поверхности дороги из точки  $i$  с координатами  $X_i, Y_i$

Для любого промежутка между двумя соседними узлами можно записать:

$$f(x) = a_i + b_i(x_i - x_{i-1}) + c_i(x_i - x_{i-1})^2 + d_i(x_i - x_{i-1})^3, \quad (1)$$

$$x_{i-1} \leq x \leq x_i.$$

Используя полученные ранее значения коэффициентов уравнения (1), можно продолжить решение задачи определения расстояния видимости поверхности дороги. Расстояние видимости – это расстояние от точки, в которой находится водитель автомобиля, до точки, где линия наблюдения касается поверхности дороги. Уравне-

ние линии наблюдения – это уравнение прямой, проходящей через точку наблюдения, с угловым коэффициентом, равным первой производной уравнения (1) на пока неизвестном отрезке между узлами  $i$  и  $i+1$ . Для нулевой точки (в качестве примера) можно записать (рис. 1):

$$y_v = y_0 + h_v - k_i(x - x_0), \quad \text{где } k_i = b_i + 2c_i(x - x_{i-1}) + 3d_i(x - x_{i-1})^2,$$

$$y_{vi} = a_i + b_i(x_i - x_{i-1}) + c_i(x_i - x_{i-1})^2 + d_i(x_i - x_{i-1})^3.$$

Приравнявая  $y_v$  и  $y_{vi}$ , получаем уравнение для вычисления величины  $x$ , определяющей расстояние видимости, равное  $x - x_0$ . Корень полученного уравнения следует вычислять методом деления отрезка пополам путём последовательного перебора участков дороги. Эффективность такого метода решения обусловлена тем, что решение уравнения необходимо находить только для участка, на котором происходит ограничение видимости, и только тогда, когда расстояние видимости не пре-

вышает некоторую заданную предельную величину (например 700 м).

Предлагаемый метод позволяет определить расстояние видимости с любой произвольной точки дороги, для которой заданы координаты, вычисленные по сплайн-функции. Предлагаемый алгоритм реализован в виде программы для ЭВМ V-TEKD. Расстояния видимости поверхности дороги с шагом 20 м записываются в файле V-D.

Пример графика расстояния видимости поверхности дороги приведён на рис. 3.

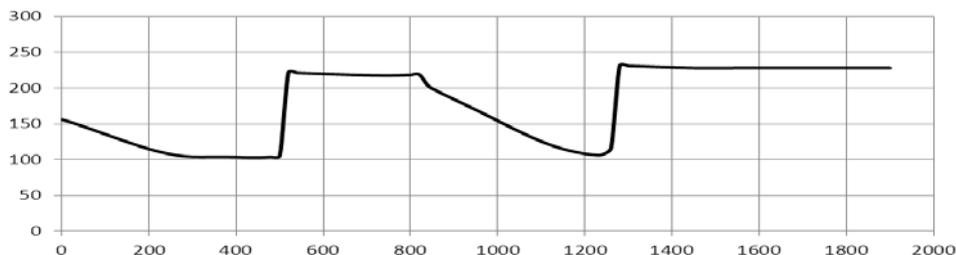


Рис. 3. График расстояния видимости поверхности дороги

### Расчёт скорости, определяемой безопасностью движения по условию видимости дороги

Для обеспечения безопасного и комфортного движения необходимо, чтобы расстояние видимости поверхности дороги в любой точке трассы было не меньше остановочного пути при этой скорости.

Для рассматриваемого участка дороги рассчитывается расстояние видимости как функция геометрических параметров дороги [3]. Текущее расстояние видимости плюс некоторый запас принимается равным полному тормозному пути АТС.

$$S_{вид} = L_{вид} - L_{зан} = \frac{V(t_p + 0,5\tau_{ср})}{3,6} + \frac{K_{\mathcal{E}}V^2}{254(\varphi + f \pm i_{\text{до}})},$$

где  $t_p$  – время реакции водителя (для дорог I и II категорий – 1 с, III категории – 2 с, IV категории – 3 с);  $\tau_{ср}$  – среднее время срабатывания тормозов (легковой автомобиль – 0,6 с, грузовой и автобус – 0,8 с);  $K_{\mathcal{E}}$  – коэффициент эффективности тормозной системы (легковой автомобиль –

1,2, грузовой и автобус – 1,3...1,4);  $\varphi$  – коэффициент продольного сцепления (рассматриваются наихудшие условия движения,  $\varphi=0,28$  [4]);  $f$  – коэффициент сопротивления качению.

Решение этой задачи приводит к необходимости решения квадратного уравнения

$$AV^2 + BV - S_{вид} = 0,$$

$$\text{где } A = \frac{K_{\mathcal{E}}}{254(\varphi + f \pm i_{\text{до}})}; B = \frac{t_p + 0,5\tau_{ср}}{3,6}; V = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AS_{вид}}}{2A}.$$

Пример графика расчётной скорости по условию видимости поверхности доро-

ги, построенного в среде программы Open Office, приведён на рис. 4.

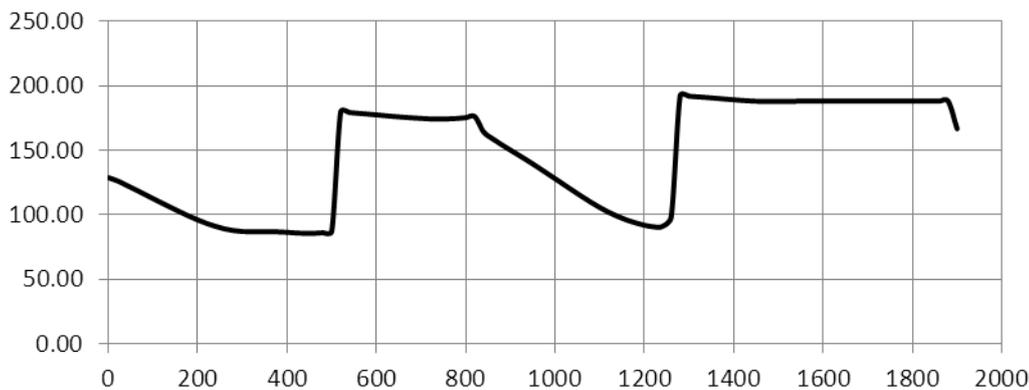


Рис. 4. График расчётной скорости (км/ч) по условию видимости поверхности дороги

### Расчёт скорости, определяемой безопасностью движения по условию проезда планового закругления

Для обеспечения безопасного и комфортного движения в пределах закругления плана трассы автомобильной дороги необходимо, чтобы коэффициент поперечной силы (отношение центробежного ускорения к ускорению силы тяжести) не превышал некоторое допустимое значение. При известных значениях радиуса планового закругления и коэффициента поперечной силы скорость безопасного и комфортного движения определяется по формуле

$$V = \sqrt{Rg(\mu \pm i_{non})},$$

где  $R$  – радиус закругления (на прямых принимаем равным 20000 м; на круговых кривых равен радиусу круговой кривой

$R_{кр}$ ; на переходных кривых определяется по формуле  $R_i = \frac{C}{L_i}$ , где  $C = R_{кр}L_{пер}$ ,

$L_i$  – расстояние от начала переходной кривой до рассматриваемой точки);  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\mu$  – коэффициент поперечной силы;  $i_{non}$  – поперечный уклон проезжей части, равный 0,015...0,025 для двухскатного профиля и до 0,06 на виражах.

Пример графика расчётной скорости по условию безопасности движения по закруглению в плане дороги, построенного в среде программы Open Office, приведён на рис. 5.

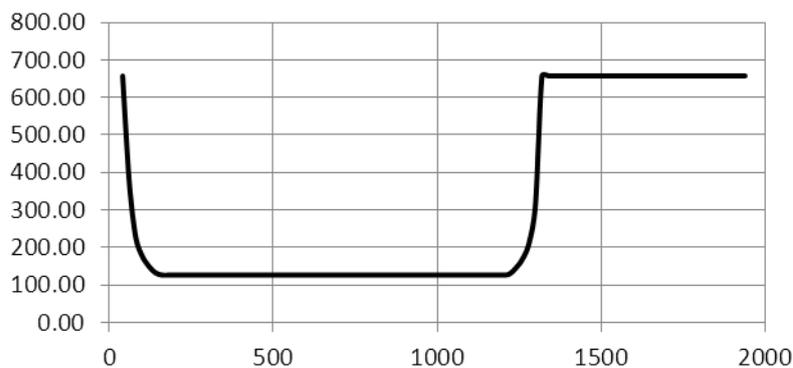


Рис. 5. График расчётной скорости (км/ч) по условию безопасности движения по закруглению в плане дороги

### Расчёт скорости, определяемой динамическими характеристиками автомобиля

Скорость движения автомобиля можно определить путём интегрирования уравнения его движения. Обычно такие расчёты производят по внешней характеристике двигателя, что не соответствует реальным режимам движения и экономически нецелесообразно по условию расхода топлива. Кроме того, интегрирование уравнения движения требует привлечения очень большого объёма информации по конкретному автомобилю. Для оценочных расчётов нужна более простая модель для оценки материальных и временных затрат на движение транспортного потока в конкретных дорожных условиях.

Решить такую задачу можно по предлагаемому ниже алгоритму. Определим скорость движения автомобиля из условия

равенства мощности, затрачиваемой на преодоление суммарного сопротивления движению автомобиля, некоторой эффективной мощности конкретного автомобиля. С целью повышения точности расчёта такой скорости уменьшим длину участка для определения равновесной скорости. Для любого участка дороги можно записать:

$$V \sum P_{сопр} = \kappa_p \frac{KПД_{min}}{p} N_e, \quad (2)$$

где  $N_e$  – эффективная мощность двигателя, Вт;  $\kappa_p$  – коэффициент, учитывающий затраты мощности на привод дополнительных агрегатов автомобиля;  $KПД_{min}$  – минимальное значение коэффициента полезного действия трансмиссии автомоби-

ля;  $\sum P_{сопр}$  – силы сопротивления движению автомобиля, которые включают в себя:

- Сила аэродинамического сопротивления, равная  $kFV_a^2$ . Здесь  $kF$  – фактор обтекаемости;  $V_a$  – скорость движения автомобиля, м/с;  $k$  – коэффициент обтекаемости автомобиля,  $k = \frac{\rho_v C_x}{2}$ ;  $C_x$  – аэродинамический коэффициент продольной аэродинамической силы;  $\rho_v$  – плотность воздуха,  $\rho_v = \frac{293\rho_{20}}{273+T}$ ;  $\rho_{20}$  – плотность воздуха при температуре 20°C;  $T$  – температура воздуха, °К;  $F$  – площадь Миделя, определяемая по формуле

$$F = C[(H_{Г} - l)B_{Г} + nlB_{ш}],$$

где  $C$  – коэффициент формы (для легковых автомобилей  $C = 0,89$ ; для грузовых автомобилей, автопоездов и автобусов  $C = 1,0$ );  $H_{Г}$  – габаритная высота автомобиля, м;  $B_{Г}$  – габаритная ширина автомобиля, м;  $B_{ш}$  – ширина шины, м;  $l$  – высота до нижней точки автомобиля (принимается равной  $r_{см}$ ), м;  $n$  – число шин, участвующих в создании силы сопротивления воздуха.

- Часть силы тяжести, действующая на наклонных участках дороги, равная  $mg(\pm i_{прод})$ .

- Сила сопротивления качению, равная  $mgf(V)$ . Сила сопротивления качению включает в общем случае две составляющие: при движении по прямой и при движении по плановой кривой. Эта сила зависит от многих факторов: скорости движения; давления в шине; деформационных характеристик шины; типа протектора; ровности покрытия и деформационных характеристик дорожной одежды. При оценочных расчётах достаточно учесть влияние только скорости движения.

где

$$B = \frac{Rmg(f_0 + i_{прод})}{R(kF + mgk_f) + mgi_{нон}}; \quad C = \frac{RN_e}{R(kF + mgk_f) + mgi_{нон}}.$$

$f(V) = f_0 + k_f V^2$  – коэффициент сопротивления качению.

По данным Н.Я. Говорущенко [2], для легковых автомобилей следует принимать коэффициент, учитывающий влияние скорости, равным  $K_f = 5 \cdot 10^{-7}$ . Для грузовых автомобилей и автобусов  $K_f = 3 \cdot 10^{-7}$ .

Дополнительное сопротивление качению в плановых кривых можно определить по формуле

$$f_{кр} = \frac{V^2}{R} i_{нон},$$

где  $i_{нон}$  – поперечный уклон проезжей части.

- Сила инерции, возникающая при изменении скорости движения ( $\pm$ ):  $\varphi = J\beta / g$ .

$\beta$  – коэффициент приведения массы автомобиля, равный

$$\beta = 1 + 0,04(i_k^2 + 1) \frac{m_{снр} + m_{гп}}{m_{мах}},$$

где  $m_a = m_{снр} + m_{гп}$  – масса автомобиля ( $m_{снр}$  – масса снаряжённого автомобиля;  $m_{гп}$  – масса перевозимого груза), кг;  $m_{мах}$  – масса автомобиля при полном использовании грузоподъёмности, кг;  $i_k$  – передаточное число коробки передач;  $J$  – величина ускорения (замедления) автомобиля при его разгоне (торможении), м/с<sup>2</sup>;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;

Подставляя составляющие в уравнение (2), получаем:

$$V_a^3 + BV_a - C = 0,$$

Полученное неполное кубическое уравнение решается в квадратурах методом Кардано.

$$V_a = \sqrt[3]{-\frac{C}{2} + \sqrt{\frac{C^2}{4} + \frac{B^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{C}{2} - \sqrt{\frac{C^2}{4} + \frac{B^3}{27}}}.$$

Для повышения точности расчёта необходимо определять скорость движения автомобиля на относительно коротких по длине участках.

Скорость движения автомобиля определяется на каждом участке длиной 20 м детального профиля, полученного путём аппроксимации сплайнами заданного про-

филя с помощью специальной программы на ЭВМ.

Пример графика расчётной скорости, определяемой динамическими характеристиками автомобиля, построенного в среде программы Open Office, приведён на рис. 6.

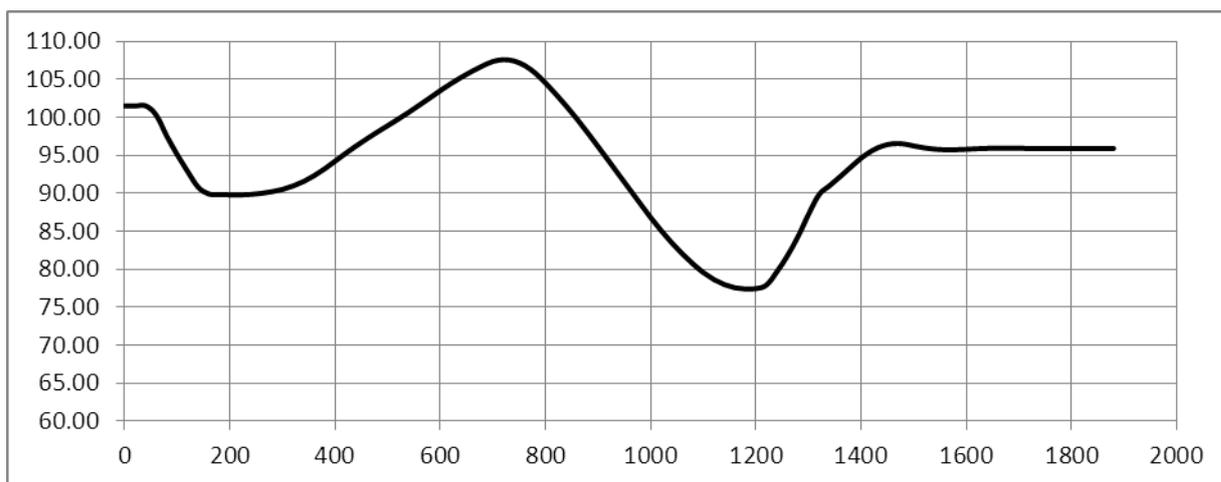


Рис. 6. График расчётной скорости (км/ч), определяемой динамическими характеристиками автомобиля

Итоговый график скорости движения автомобиля представлен на рис. 7.

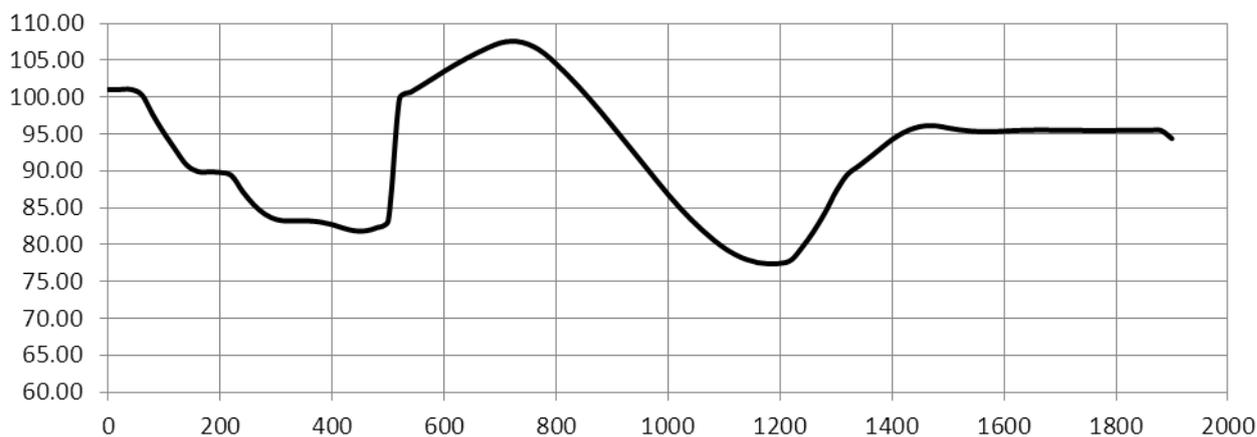


Рис. 7. График результирующей скорости (км/ч)

## Заключение

Принятые значения комфортной скорости позволяют определить среднюю скорость движения конкретного автомобиля, вариацию и динамику её изменения, выявить «узкие» места рассматриваемого участка дороги и наметить мероприятия по улучшению условий движения по ней.

Апробация рассмотренной методики выполнена на большом объёме фактического материала в рамках курсовой работы по дисциплине «Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калиткин, Н.Н. Численные методы / Н.Н. Калиткин. - М.: Наука, 1978. - 512 с.
2. Говорущенко, Н.Я. Экономия топлива и снижение токсичности на автомобильном транспорте / Н.Я. Говорущенко. - М.: Транспорт, 1990. - 135 с.
3. Бондаренко, Е.В. Тяговая динамика автомобиля: учеб. пособие / Е.В. Бондаренко, С.Е. Горлатов, А.А. Гончаров. - Оренбург: ОГУ, 2008. - 136 с.
4. ГОСТ Р 50597-93. Автомобильные дороги и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения.
5. ВСН 25-86. Указания по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах. - М.: Транспорт, 1988.
1. Kalitkin, N.N. Numerical Methods / N.N. Kalitkin. - M.: Science, 1978. - pp. 512.
2. Govorushchenko, N.Ya. Fuel Economy and Toxicity Decrease in Motor Transport / N.Ya. Govorushchenko. - M.: Transport, 1990. - pp. 135.
3. Bondarenko, E.V. Motor Car Traction Dynamics: manual / E.V. Bondarenko, S.E. Gorlatov, A.A. Goncharov. - Orenburg: OGU, 2008. - pp. 136.
4. RSS RF 50597-93. Highways and Streets. Requirements to Operation State Admissible According to Road Safety Conditions.
5. VSN 25-86. Road Safety Instructions on Highways. M.: Transport, 1988.

*Статья поступила в редакцию 10.05.18.*

*Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного  
технического университета  
Аверченков В.И.*

*Статья принята к публикации 10.10.18.*

## Сведения об авторе:

**Архангельский Анатолий Николаевич**, доцент кафедры «Автомобильный транспорт» Брянского государственного технического университета, e-mail: [139AAN@mail.ru](mailto:139AAN@mail.ru).

**Arkhangelsky Anatoly Nikolaevich**, Assistant Prof. of the Dep. "Motor Transport", Bryansk State Technical University, e-mail: [139AAN@mail.ru](mailto:139AAN@mail.ru).