

ДИНАМИЧЕСКОЕ ОГРАНИЧЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА АВТОМАГИСТРАЛЯХ

Горелов А.М.¹, Власов А.А.¹, Гаврина М.А.¹

¹ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» (440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28), e-mail:obd@pguas.ru

В статье рассмотрено применение переменных ограничений скорости движения на автомагистралях. Приведены методы переменного ограничения скорости, их влияние на пропускную способность и безопасность движения. Особое внимание уделено динамическому ограничению скорости в зависимости от метеорологических условий движения и состояния транспортного потока. Предложен аналитический способ установки ограничений скорости движения. Он предполагает вычисление устанавливаемых ограничений с использованием макроскопической модели транспортного потока METANET. Влияние метеорологических условий учтено путем коррекции скорости движения в свободных условиях с учетом коэффициента обеспечения расчетной скорости. Приведены результаты численного моделирования влияния неблагоприятных метеорологических условий на среднюю скорость движения по автомагистрали и ее пропускную способность. Указана необходимость принятия мер по ступенчатому ограничению скорости на подходе к проблемному участку и ограничению количества въезжающих транспортных средств на автомагистраль с целью недопущения образования заторов.

Ключевые слова: транспортный поток, автомагистраль, динамическое ограничение скорости, метеорологические условия

DYNAMIC SPEED LIMITATION OF VEHICLES MOVEMENT ON HIGHWAYS

Gorelov A.M.¹, Vlasov A.A.¹, Gavrina M.A.¹

¹Penza State University of the Architecture and Building (440028, Penza, street Hermann Titov, 28), e-mail: obd@pguas.ru

In paper application of variable speed limitations of movement on highways is considered. Methods of a variable speed limitation, their influence on capacity and traffic safety are reduced. The special attention is given a dynamic speed limitation depending on meteorological conditions of movement and a state of flow. The analytical mode of speed limitations installation is offered. He assumes a calculation of installed limitations with usage of macroscopic model of flow METANET. Influence of meteorological conditions is considered by a movement rate adjustment in free conditions taking into account factor of support of a rated speed. Results of numerical modeling of unfavourable meteorological conditions influence on average speed of movement on highways and its capacity are reduced. Necessity of acceptance of a graduated speed limitation measures on the approach to a problem section and ramp metering on a highway on purpose prevention of jams formation is specified.

Keywords: traffic flow, highway, dynamic speed limitation, meteorological conditions

При движении транспортных средств по автомагистрали возникает противоречие между стремлением водителя двигаться с желаемой скоростью и условиями движения, которое разрешается установкой ограничений на скорость движения. Скорость движения является ключевым фактором, непосредственно воздействующим на определенные характеристики автомагистрали, такие как транспортно-эксплуатационные свойства, безопасность движения и состояние окружающей среды. Установка фиксированных ограничений скорости достаточно проста в реализации, однако не позволяет своевременно учитывать изменения характеристик транспортного потока и состояния проезжей части, обусловленных погодно-климатическими факторами. Стремление адаптировать скорость транспортного потока к из-

менению условий движения привело в последнее время к развитию методов переменных ограничений скорости (variable speed limits – VSL).

Методы переменного ограничения скорости

В работе [3] можно найти достаточно подробную классификацию VSL–систем и оценки эффективности их применения, полученные как на основе имитационного моделирования, так и полевых испытаний. Среди VSL–системы выделяются на два основных типа – системы, устанавливающие ограничения скорости по расписанию (Scheduled Variable Speed Limits – SVSL) и динамически определяющие вводимые ограничения (Dynamic Speed Limits – DSL).

SVSL-системы устанавливают сезонные или временные (на основании предустановленного расписания) ограничения скорости. Сезонные ограничения скорости применяются к определенному типу дороги и устанавливают ограничения скорости в течение специфических периодов (в общем случае зимние/летние ограничения скорости). Примеры использования подобных систем можно найти в странах с холодным климатом и устанавливающие ограничения скорости из-за экстремальных метеорологических условий в течение зимних месяцев [6, 9, 15]. Почасовые ограничения скорости главным образом применяются для предотвращения или уменьшения определенных негативных воздействий на отдельном участке автомагистрали или городской улице в специфические периоды. Реализацию VSL в зонах школ можно найти в работе [13], а исследования, связанные со снижением шума в вечерние часы в жилых зонах, вблизи больниц или других объектов в работе [6].

Динамическое ограничение скорости подразумевает изменения в устанавливаемых ограничениях в зависимости от условий движения. В этой связи DSL часто определяется как составная часть интеллектуальной транспортной системы (Intelligent Transport System – ITS), которая вызывает изменения в ограничениях скорости в зависимости текущей информации относительно дороги, условий движения, метеорологических условий и/или условий окружающей среды [14]. На практике система состоит из знаков переменной информации (dynamic message signs – DMS), установленных вдоль дороги и связанных через систему связи с центром организации дорожного движения. После обработки данных и вычисления ограничений скорости, обновленная информация выводится на DMS. Накладываемые ограничения на скорость движения, как правило, носят принудительный характер, хотя известны системы с рекомендуемыми ограничениями скорости [8].

Исследования применения DSL показали сокращение количества смен полос движения на 50% [8] при более равномерном распределении потока по полосам движения. Эффект заключается в снижении как средней скорости, так и вариации скоростей в транспортном потоке, что благоприятно сказывается на пропускную способность автомагистрали и безопас-

ность движения. Так анализ данных дорожно-транспортных происшествий [2, 10, 11] показал снижение числа дорожно-транспортных происшествий на 10-30% при использовании DSL.

Повышение равномерности движения благоприятно сказывается на пропускной способности автомагистралей. Исследования [2, 4, 11] показали повышение пропускной способности дороги от 2% до 10% за счет снижения частоты появления и размеров ударных волн, приводящих к перенасыщению транспортного потока. Следует отметить негативные эффекты использования DSL, возникающие на участках въездов на автомагистраль при высокой плотности движения. Увеличение интенсивности движения на крайней полосе приводит к уменьшению интервалов между автомобилями в потоке, усложняя процесс слияния и тем самым создавая перенасыщение на въезде [5].

Установка ограничений скорости в зависимости от метеорологических условий и состояния транспортного потока

Выбор оптимального режима движения производится с учетом оценки условий движения, включающие в себя геометрические параметры, транспортно-эксплуатационные характеристики дорог, состояние инженерного оборудования, параметры транспортного потока и метеорологические условия. Концептуально различаются два метода установки ограничений скорости движения. Первый заключается в установке ограничений скорости движения на основе статистических наблюдений за скоростями транспортного потока и установке ограничений на уровне 85% обеспеченности. Второй, аналитический, метод состоит в определении допустимой скорости движения, исходя из теоретических моделей взаимодействия автомобиля с дорогой и его движения в транспортном потоке. Аналитический способ более универсальный и позволяет учитывать разнообразные факторы при установке ограничений, однако требует тщательного выбора модели транспортного потока.

Наиболее востребованной в настоящее время макроскопической моделью является METANET [12]. В модели каждая связь $m \in M_{net}$ разделена на сегменты длиной L_m (рисунок 1), причем для всех сегментов определены одинаковые характеристики, такие как число полос движения n , пропускная способность и т.д.

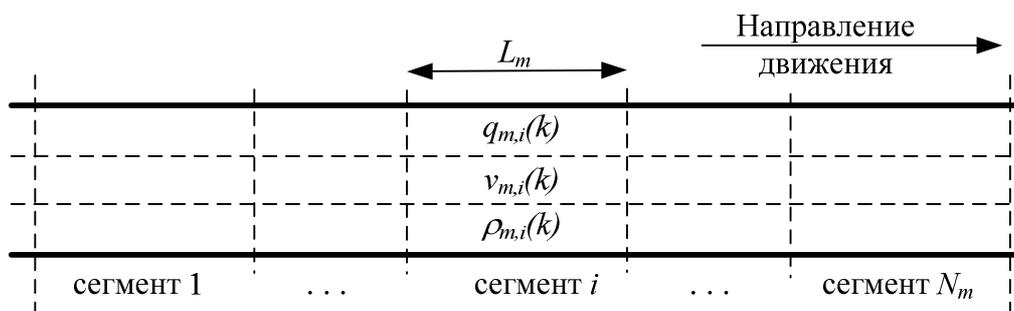


Рис. 1. Фрагмент транспортной сети METANET

Состояние транспортного потока в каждом сегменте, i связи m во время k описывается макроскопическими переменными – плотностью $\rho_{m,i}(k)$, скоростью $v_{m,i}(k)$ и интенсивностью $q_{m,i}(k)$ транспортного потока.

Величина шага моделирования T и длина сегмента L_m выбираются из следующих соображений: за один шаг моделирования транспортное средство, находящееся в ячейке $i-1$ и движущееся с максимальной скоростью, не может переместиться в ячейку $i+1$; шаг моделирования не должен превышать шага управления светофорным объектом.

Интенсивность движения (или отток) из сегмента i связи m во временном шаге k будет определяться следующим образом:

$$q_{m,i}(k) = \rho_{m,i}(k)v_{m,i}(k)n_m, \quad (1)$$

где n_m – число полос на связи m .

Плотность транспортного потока определяется в форме закона сохранения автомобилей на транспортной связи:

$$\rho_{m,i}(k+1) = \rho_{m,i}(k) + \frac{T}{L_m n_m} (q_{m,i-1}(k) - q_{m,i}(k)). \quad (2)$$

Скорость транспортного потока на шаге моделирования $k+1$ вычисляется как:

$$\begin{aligned} v_{m,i}(k+1) = & v_{m,i}(k) + \frac{T}{\tau} (V(\rho_{m,i}(k)) - v_{m,i}(k)) + \\ & + \frac{T}{L_m} v_{m,i}(k) (v_{m,i-1}(k) - v_{m,i}(k)) - \frac{vT}{\tau L_m} \frac{\rho_{m,i+1}(k) - \rho_{m,i}(k)}{\rho_{m,i}(k) + \kappa} \end{aligned} \quad (3)$$

где τ – коэффициент, представляющий временную задержку реакции водителя на восприятие плотности потока; $V(\rho_{m,i}(k))$ – желаемая скорость; v – коэффициент пропорциональности; κ – параметр модели, введенный с целью обеспечить работу модели при средней и высокой плотности и исключить сингулярности (или неадекватного поведения модели) при низкой плотности потока, $\kappa > 0$.

Желаемая скорость движения определяется из основной диаграммы транспортного потока по следующей формуле:

$$V(\rho_{m,i}(k)) = v_{free,m} \exp \left[- \frac{1}{a_m} \left(\frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{crit,m}} \right)^{a_m} \right], \quad (4)$$

где $v_{free,m}$ – скорость свободного движения на связи m ; $\rho_{crit,m}$ – критической плотности на этой связи, a_m – параметр модели.

Обратим внимание, что формулы (1-3) определяют текущее состояние сегмента транспортной сети, а формула (4) – форму основной диаграммы транспортного потока. Учет

совместного влияния характеристик транспортного потока и погодных условий возможен путем модификации значений $v_{free,m}$.

Для оценки совместного влияния параметров состояния дороги и метеорологических условий движения на режим движения автомобилей А.П. Васильевым [1] предложен метод, который заключается в сравнении безопасной скорости движения в данных условиях v_{ϕ} с максимальной безопасной скоростью в эталонных условиях v_{ε} . Отношение указанных скоростей получило название коэффициента обеспечения расчетной скорости $K_{p.c.}$. Допустимая скорость движения при воздействии двух и более факторов определяется по следующей формуле:

$$v_{free,m} = f(K_{pc\ X1}, K_{pc\ X2}, \dots, K_{pc\ Xn}) \cdot v_{max,m}. \quad (5)$$

где $K_{pc\ Xn}$ – частный коэффициент обеспечения расчетной скорости для фактора Xn ; $f()$ – функция связи между частными коэффициентами обеспечения расчетной скорости.

В простейшем случае функция $f()$ описывается мультипликативной моделью:

$$f(K_{pc\ X1}, K_{pc\ X2}, \dots, K_{pc\ Xn}) = \prod_{i=1}^n K_{pc\ Xi}. \quad (6)$$

Формула (6) предполагает полную симметрию факторов, чего не наблюдается при совместном влиянии метеорологических явлений. В работе [1] приводится пример, когда при высокой температуре воздуха выпадение небольшого дождя может улучшить условия движения, а при температуре около 0⁰C существенно ухудшает их. Совместное влияние различных метеорологических факторов определяется следующим образом:

$$f(K_{pc\ X1}, K_{pc\ X2}, \dots, K_{pc\ Xn}) = \prod_{i=1}^n K_{pc\ Xi} + \sum \beta_{ij} (1 - K_{pc\ Xi})(1 - K_{pc\ Xj}) + \sum_{i < j < g} y_{ijg} (1 - K_{pc\ Xi})(1 - K_{pc\ Xj})(1 - K_{pc\ Xg}) \quad (7)$$

где β_{ij} и y_{ijg} – коэффициенты парного и тройного взаимодействия.

Значения коэффициентов β_{ij} и y_{ijg} определяются отдельно для факторов, возможных при положительных и отрицательных температурах воздуха [1].

Продемонстрируем использование модели транспортного потока (1-4) совместно с формулами (5, 7). В работе [14] можно найти следующие значения параметров модели METANET: $v_{free,m} = 106$ км/ч; $\rho_{crit,m} = 33,5$ авт/км/пол.; $\tau = 18$ с; $v = 65$ км²/ч; $\kappa = 40$ авт/км/пол.; $a_m = 1,867$. Изменение скорости и интенсивности движения от плотности транспортного потока при установке ограничений скорости до 80 и 60 км/ч приведены на рисунках 2 и 3.

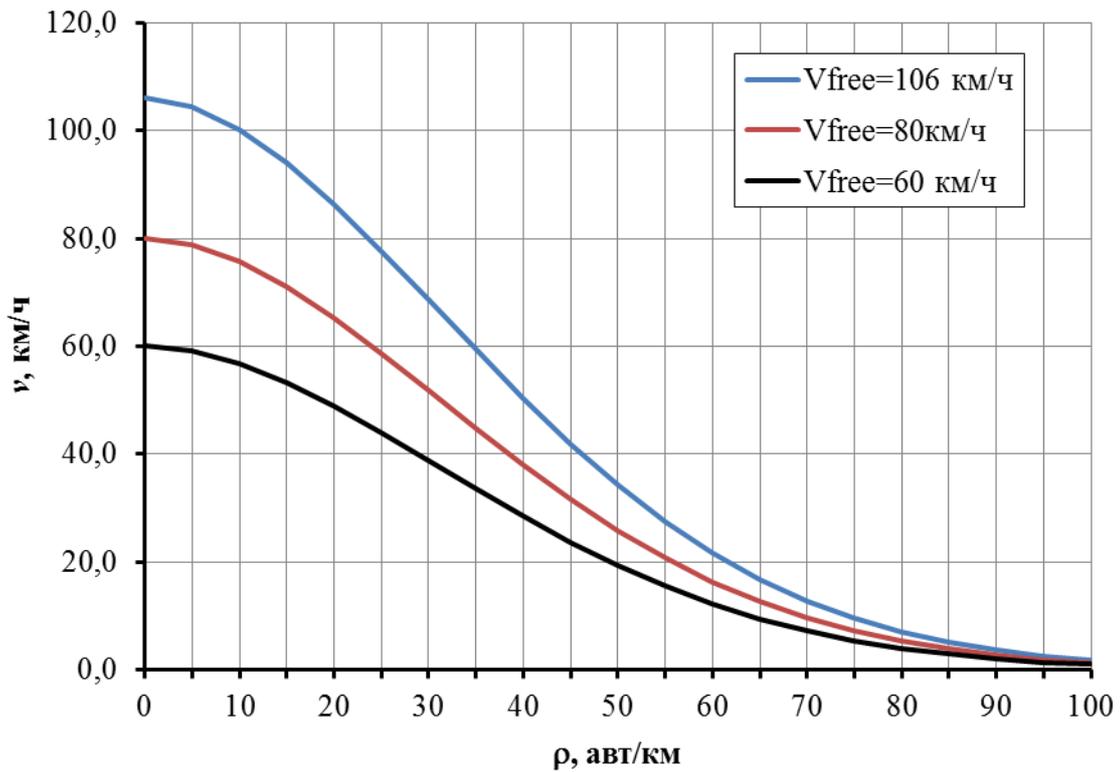


Рис. 2. Зависимость скорости движения от плотности транспортного потока

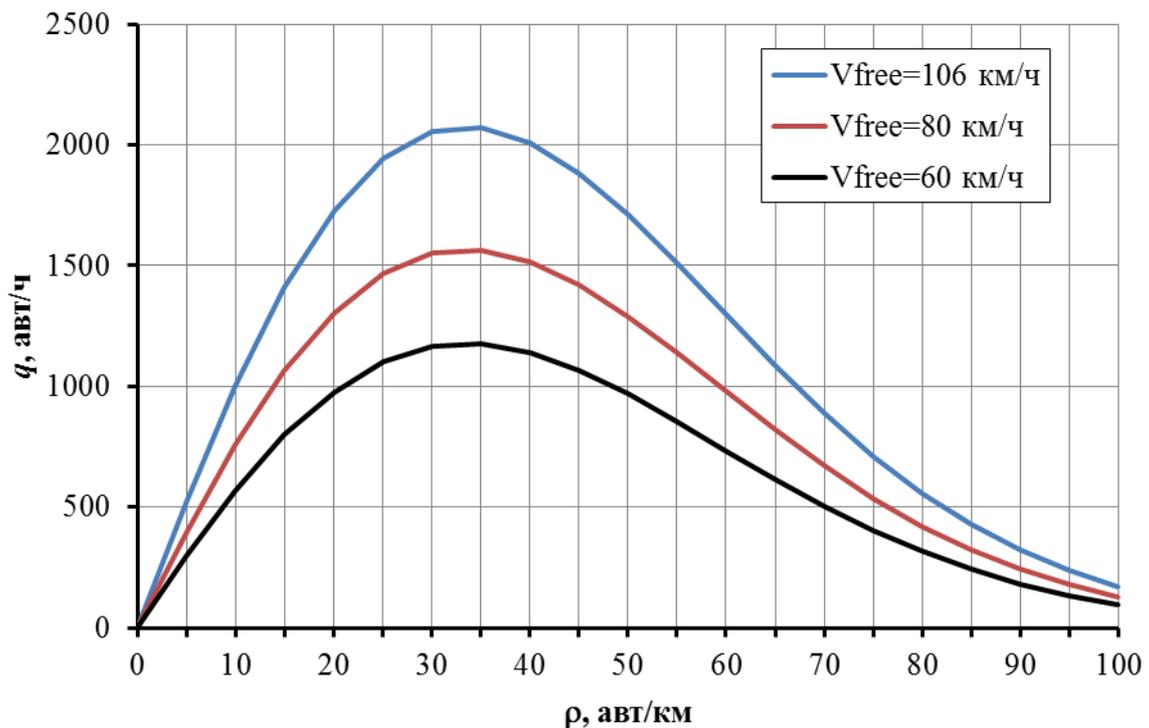


Рис. 3. Зависимость интенсивности движения от плотности транспортного потока

Заключение

Представленный метод позволяет устанавливать ограничения скорости движения транспортных средств по автомагистрали с учетом влияния метеорологических факторов и текущего состояния транспортного потока. Следует отметить, что наложение ограничений на

скорость движения существенно снижает пропускную способность автомагистрали. Это требует принятия мер как по ступенчатому ограничению скорости на подходе к участку с неблагоприятными условиями движения, так и ограничению количества въезжающих транспортных средств на автомагистраль с целью недопущения образования заторов.

Список литературы

1. Васильев А.П., Фримштейн М.И. Управление движением на автомобильных дорогах. – М. Транспорт, 1979. – 296 с.
2. Congestion management measures that release or provide new capacity. In OECD/ECMT (Eds.), *Managing urban traffic congestion France: OECD Publishing.*, 2007, p. 229
3. Homogenization effects of variable speed limits / Alvaro Garcia-Castro, Andres Monzon // *Transport and Telecommunication*, 2014, volume 15, no. 2, pp. 130–143
4. Hoogendoorn, S. P. Multiclass continuum modelling of multilane traffic flow, Ph.D. thesis, Delft University of Technology/TRAIL Research school, 1999, Delft.
5. Knoop, V.L., Duret, A., Buisson, C., Arem B. Van. Lane distribution of traffic near merging zones influence of variable speed limits. In *Proc. of the 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Madeira, Portugal., 2010, pp. 485-490
6. Land Tirol. Tempo 100 auf der Autobahn – warum? (In German). Available at – <http://www.tirol.gv.at/themen/verkehr/verkehrsplanung/verkehrsprojekte/tempo100>
7. Lehming, B. (2008). Noise reduction plan for Berlin – Action plan, Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz. Abt. III Umweltpolitik, Referat Immissionschutz. Berlin.
8. Nissan, A., Bang X.. Evaluation of impacts of the motorway control system (MCS) in Stockholm. In *Proceedings of the European Transport Conference, AET*. Strasbourg, France., 2006, p. 21
9. Peltola H. Seasonally changing speed limits – Effects on speeds and accidents // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2000, №1734, pp.46–51.
10. Robinson, M. Examples of Variable Speed Limit Applications, Speed Management Workshop, transportation research Board, 79th Annual Meeting, 2000, Washington D.C.
11. Schick, P. Einfluss von Streckenbeeinträchtigungen auf die Kapazität von Autobahnabschnitten sowie die Stabilität des Verkehrsflusses. (In German) Ph. D. Thesis. Institut für Straßen- und Verkehrswesen Universität, Stuttgart, 2003
12. Traffic flow modeling of large-scale motorway networks using the macroscopic modeling tool METANET/ Kotsialos A, Papageorgiou M, Diakaki C, Pavlis Y, Middelham F // *IEEE Trans Intell Transp Sys* 3 pp. 282–292

13. Transport and Main Roads. (2012) School Environment Safety Technical Guidelines. Queensland Government, Queensland, Australia
14. Van Nes, N., Brandenburg, S. , Twisk D. Dynamic speed limits; effects on homogeneity of driving speed. Intelligent Vehicles Symposium, IEEE, 2008, pp 269 – 274.
15. Wyoming Department of Transport. Variable speed limits replaces seasonal limit on I-80 section, 2010. Available at – http://www.dot.state.wy.us/wydot/news_info/news_releases;jsessionid=8C31A2CE4E803278FC9A1703A8425BC4?template=tpl.newsDetail&newsID=910

Рецензенты:

Родионов Ю.В., д.т.н., профессор кафедры эксплуатации автомобильного транспорта ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», г. Пенза;
Бажанов А.П., д.т.н., профессор кафедры геотехники и дорожного строительства ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», г. Пенза.