

# Транспортное и энергетическое машиностроение

УДК 629.33

## Методика определения параметров движения колесных машин для обеспечения работы систем активной безопасности\*

М.М. Жилейкин<sup>1</sup>, В.А. Шинкаренко<sup>2</sup>, Е.В. Ягубова<sup>1</sup><sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1<sup>2</sup> ОАО «КамАЗ», 423827, Набережные Челны, Республика Татарстан, Российская Федерация, Автозаводский пр-т, д. 2

## Method of Determining Parameters of Motion of Wheeled Vehicles to Ensure the Operation of Active Safety Systems

M.M. Zhileykin<sup>1</sup>, V.A. Shinkarenko<sup>2</sup>, E.V. Yagubova<sup>1</sup><sup>1</sup> BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1<sup>2</sup> JSC KamAZ, 423827, Naberezhnye Chelny, Republic of Tatarstan, Russian Federation, Avtozavodsky Ave., Bldg. 2

e-mail: jileykin\_m@mail.ru, vl\_shinkarenko@mail.ru, yagubova.evg@yandex.ru



Управляемость и устойчивость — важнейшие эксплуатационные свойства автомобиля и составляющие активной безопасности его движения. Повышению управляемости и устойчивости во всем мире придается большое значение. Одна из важнейших проблем при построении алгоритмов работы систем активной безопасности автомобиля заключается в получении достоверной информации о количественных значениях параметров движения автомобиля, позволяющей: судить о том, насколько эти параметры соответствуют параметрам, заданным водителем, прогнозировать момент наступления нештатных ситуаций и диагностировать их вид (например, занос передних или задних осей, опасность опрокидывания и др.). Одним из наиболее широко используемых на практике параметров, характеризующих условия движения многососных колесных машин, является угол отклонения вектора фактической скорости центра масс машины от вектора его теоретической (кинематической) скорости. Однако определение направления фактического вектора скорости центра масс сопряжено с большими вычислительными трудностями ввиду необходимости строить сложные прогнозирующие фильтры Калмана, которые позволяют компенсировать погрешность, накапливаемую при интегрировании ускорений. Разработана методика определения фактического угла отклонения вектора скорости центра масс машины в горизонтальной плоскости от направления продольной оси колесной машины, не требующая применения операции интегрирования и сложных алгоритмов фильтрации, что

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора № 9905/17/07-к-12 между ОАО «КамАЗ» и Московским государственным техническим университетом им. Н.Э. Баумана.

повышает точность и быстродействие работы алгоритмов динамической стабилизации движения машин.

**Ключевые слова:** колесная машина, система активной безопасности, алгоритм управления, вектор скорости.

**i** Controllability and stability of a vehicle are its crucial performance characteristics that form an integral part of its active safety system. The need to improve vehicle controllability and stability is recognized worldwide. One of the major problems in developing algorithms for vehicle active safety systems lies in obtaining reliable data on the values of vehicle motion parameters. This information makes it possible to evaluate how these parameters meet those set by the driver, predict the occurrence of emergency situations and determine the type of emergency, for example, front or rear axle skidding, rollover hazard, etc. One of the most commonly used parameters characterizing the conditions of motion of multi-wheeled vehicles is the deviation angle of the actual velocity vector of the center of mass of the vehicle from the theoretical (kinematic) velocity vector. However, determining the direction of the actual velocity vector of the center of mass is associated with serious computational difficulties due to the need to apply complex predictive Kalman filtering to compensate for the errors accumulated when the accelerations are integrated. The article proposes a method for determining the actual deviation angle of the velocity vector of the center of mass in a horizontal plane from the direction of the longitudinal axis of the wheeled vehicle that does not require integration and complex filtering algorithms. It increases the accuracy and processing speed of the algorithms of dynamic stabilization of the vehicle.

**Keywords:** wheeled vehicle, active safety system, control algorithm, velocity vector.

Управляемость и устойчивость — важнейшие эксплуатационные свойства автомобиля и составляющие активной безопасности его движения. Повышению управляемости и устойчивости во всем мире придается большое значение [1]. Как известно, системы активной безопасности (САБ) автомобиля предназначены для предотвращения аварийной ситуации. Применение САБ позволяет в различных критических

ситуациях сохранять контроль над автомобилем или, другими словами, сохранять его курсовую устойчивость и управляемость.

Важнейшей проблемой при построении алгоритмов работы САБ является получение достоверной информации о количественных значениях параметров движения автомобиля, позволяющей судить о том, насколько они соответствуют параметрам, заданным водителем, прогнозировать момент наступления нештатных ситуаций и диагностировать их вид (например, занос передних или задних осей, опасность опрокидывания и др.).

Одним из наиболее широко используемых на практике параметров, характеризующих условия движения колесных машин (КМ), является угол  $\beta$  отклонения вектора фактической скорости  $V_\phi$  центра масс машины от вектора  $V_T$  его теоретической (кинематической) скорости (рис. 1) [2–9]:

$$\beta = \theta_T - \theta_\phi.$$

И если значение угла  $\theta_T$  легко найти из кинематических соотношений, зная геометрические параметры шасси и закон поворота управляемых колес [10], то для определения угла  $\theta_\phi$  необходимо вычислять текущую скорость многоосных КМ. Скорость автомобиля (ее составляющие  $V_x$ ,  $V_y$ ) определяют путем интегрирования следующих производных [11]:

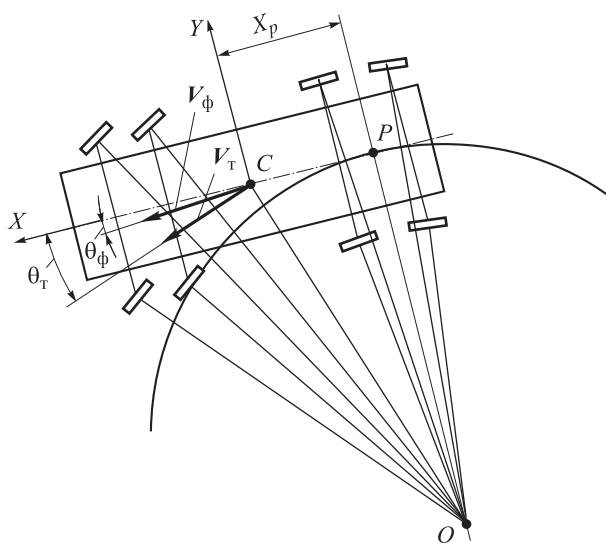


Рис. 1. Угол отклонения вектора скорости от продольной оси автомобиля:  
 $O$  — мгновенный центр поворота;  $C$  — центр масс КМ;  
 $P$  — полюс рулевого управления

$$\frac{dV_x}{dt} = a_x + \omega_z V_y;$$

$$\frac{dV_y}{dt} = a_y - \omega_z V_x$$

где  $a_x, a_y$  — продольная и боковая составляющие линейного ускорения движения центра масс КМ;  $\omega_z$  — угловая скорость вращения.

К достоинству такого метода относится простота диагностирования нештатных ситуаций [12]. Однако определение направления фактического вектора скорости центра масс сопряжено с большими вычислительными трудностями [13] ввиду необходимости строить сложные прогнозирующие фильтры Калмана, которые позволяют компенсировать погрешность, накапливаемую при интегрировании ускорений.

Цель данной работы — построить алгоритм определения направления фактического вектора скорости центра масс, не требующий использования операции интегрирования.

**Рассмотрим вывод основных кинематических соотношений** при плоском движении КМ. На рис. 2 приведен план ускорений для центра масс (точка  $C$ ) при криволинейном движении КМ. Ускорение  $a_C$  точки  $C$  при плоском движении равно векторной сумме ускорения  $a_P$  полюса рулевого управления (точка  $P$ ) и ускорения  $a_{CP}$  точки  $C$  при вращательном движении вокруг полюса  $P$ :

$$a_C = a_P + a_{CP}$$

Переносная скорость точки  $C$  относительно полюса  $P$

$$V_{CP} = \omega \times X_P,$$

где  $\omega$  — угловая скорость точки  $C$  относительно точки  $P$ ;  $X_P$  — расстояние от точки  $C$  до точки  $P$ .

Тогда

$$a_{CP} = \varepsilon X_P + \omega(\omega X_P);$$

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt},$$

где  $\varepsilon$  — угловое ускорение машины.

Отметим, что ускорение  $a_{CP}$  имеет касательную и нормальную составляющие:

$$a_{CP}^{\tau} = \varepsilon X_P;$$

$$a_{CP}^n = \omega(\omega X_P).$$

Касательное ускорение  $a_{CP}^{\tau}$  направлено перпендикулярно продольной оси КМ, а нормаль-

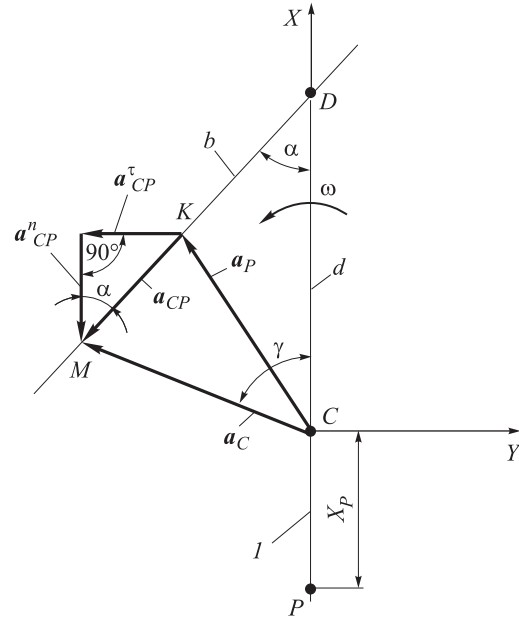


Рис. 2. План ускорений для центра масс при криволинейном движении многоосной КМ: 1 — продольная ось автомобиля

ное ускорение  $a_{CP}^n$  — от центра масс  $C$  к полюсу  $P$ . Модули этих ускорений

$$|a_{CP}^{\tau}| = \varepsilon X_P;$$

$$|a_{CP}^n| = \omega^2 X_P;$$

$$|a_{CP}| = \sqrt{|a_{CP}^{\tau}|^2 + |a_{CP}^n|^2} = X_P \sqrt{\varepsilon^2 + \omega^4}. \quad (1)$$

Угол  $\alpha$  между вектором  $a_{CP}$  ускорения и продольной осью КМ определяется так:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{|a_{CP}^{\tau}|}{|a_{CP}^n|} = \frac{\varepsilon}{\omega^2}.$$

Чтобы найти текущее положение полюса рулевого управления  $P$  на продольной оси КМ (т. е. расстояние  $X_P$ ), определим модуль вектора  $|a_{CP}|$ . Введем обозначения  $|a_{CP}| = x$ .

На плане ускорений (см. рис. 2) рассмотрим треугольники  $MCK$  и  $DKC$ . Обозначим  $|MD| = b$ ;  $|DC| = d$ . Угол  $\gamma = \operatorname{arctg}(a_C^y/a_C^x)$ , где  $a_C^x, a_C^y$  — проекции вектора  $a_C$  ускорения точки  $C$  на оси  $X$  и  $Y$  системы координат, связанной с корпусом машины. Значения проекций  $a_C^x$  и  $a_C^y$  определяют по показаниям соответствующих датчиков линейных ускорений, установленных в центре масс КМ. Тогда

$$|a_C| = \sqrt{(a_C^x)^2 + (a_C^y)^2}.$$

Чтобы найти значение  $|a_P| = |CK|$ , запишем дважды теорему косинусов:

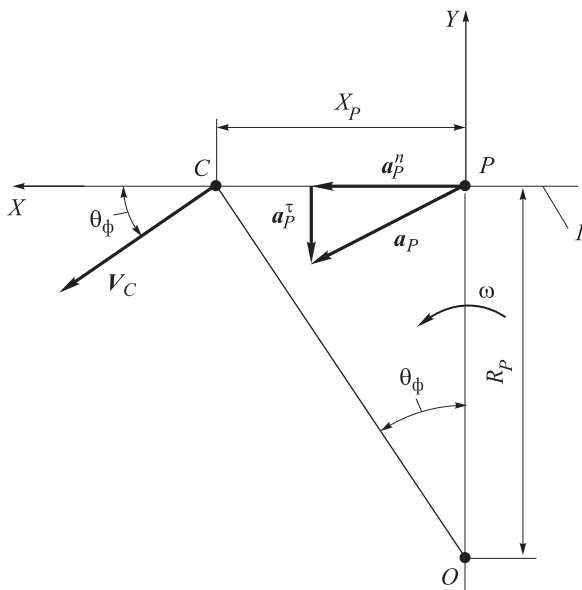


Рис. 3. План ускорений для полюса рулевого управления (точки  $P$ ) при криволинейном движении КМ:

1 — продольная ось автомобиля;  $R_P$  — мгновенный радиус поворота точки  $P$

- для треугольника  $MCK$

$$\begin{aligned} |CK|^2 &= x^2 + |a_C|^2 - 2x|a_C|\cos[\pi - (\alpha + \gamma)] = \\ &= x^2 + |a_C|^2 - 2x|a_C|\cos(\alpha + \gamma); \end{aligned} \quad (2)$$

- для треугольника  $DKC$

$$|CK|^2 = (b - x)^2 + d^2 - 2(b - x)d \cos \alpha. \quad (3)$$

Приравняв правые части выражений (2) и (3) и приведя подобные члены, получим

$$|a_{CP}| = x = \frac{b^2 - 2bd \cos \alpha - |a_C|^2}{2[b - |a_C| \cos(\alpha + \gamma) - d \cos \alpha]}.$$

Для определения  $b$  и  $d$  рассмотрим треугольник  $DMC$  (см. рис. 2). Из теоремы синусов получим

$$b = \frac{\sin \gamma}{\sin \alpha} |a_C|;$$

$$d = \frac{\sin(\alpha + \gamma)}{\sin \alpha} |a_C|.$$

Теперь из формулы (1) можно найти  $X_P$ :

$$X_P = \frac{x}{\sqrt{\varepsilon^2 + \omega^4}}.$$

Далее рассмотрим план ускорений для полюса рулевого управления, т. е. для точки  $P$  (рис. 3).

Для модуля ускорения  $|a_P|$  точки  $P$  можно записать

$$|a_P| = \sqrt{|a_P^x|^2 + |a_P^y|^2} = R_P \sqrt{\varepsilon^2 + \omega^4},$$

откуда можно найти  $R_P$ . Тогда

$$\theta_\phi = \arctg \frac{X_P}{R_P} = \arctg \frac{|a_{CP}|}{|a_P|}.$$

Таким образом, измеряя в процессе движения линейные продольное  $a_C^x$  и поперечное  $a_C^y$  ускорения центра масс и угловую скорость  $\omega$  относительно вертикальной оси, проходящей через центр масс КМ, можно определить фактический угол  $\theta_\phi$  отклонения вектора скорости центра масс машины в горизонтальной плоскости от направления продольной оси КМ.

## Вывод

Разработана методика определения фактического угла отклонения вектора скорости центра масс КМ в горизонтальной плоскости от направления ее продольной оси, не требующая применения операции интегрирования и сложных алгоритмов фильтрации, что повышает точность и быстродействие работы алгоритмов динамической стабилизации движения машин.

## Литература

- [1] Белоусов Б.Н., Попов С.Д. *Колесные транспортные средства особо большой грузоподъемности. Конструкция. Теория. Расчет.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006. 728 с.
- [2] Рязанцев В.И. *Активное управление сходом колес автомобиля.* Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 212 с.
- [3] Karogal I., Ayalew B. Independent Torque Distribution Strategies for Vehicle Stability Control. *SAE, Technical Papers*, 2009, doi: 10.4271/2009-01-0456.
- [4] Osborn R.P., Shim T. Independent Control of All-Wheel-Drive Torque Distribution. *SAE, Technical Papers*, 2004-01-2052, 2004, doi: 10.4271/2004-01-2052.
- [5] Mammari S., Baghdassarian V.B. Two-degree-of-freedom formulation of vehicle handling improvement by active steering. *Proc. Amer. Contr. Conf.*, 2000, vol. 1, pp. 105–109.

- [6] Yoshimoto K., Tanaka H., Kawakami S. Proposal of driver assistance system for recovering vehicle stability from unstable states by automatic steering. *Int. Vehicle Electron Conf.*, 1999, pp. 514–519.
- [7] Rodrigues A.O. *Evaluation of an active steering system*. Master's degree project, Sweden, 2004. Available at: [http://www.s3.kth.se/~kallej/grad\\_students/rodriguez\\_orozco\\_thesis04.pdf](http://www.s3.kth.se/~kallej/grad_students/rodriguez_orozco_thesis04.pdf) (accessed 1 December 2014).
- [8] Langson W., Alleyne A. Multivariable bilinear vehicle control using steering and individual wheel torques. *Proc. Amer. Contr. Conf.*, 1997, vol. 2, pp. 1136–1140.
- [9] Mokhiamar O., Abe M. Active wheel steering and yaw moment control combination to maximize stability as well as vehicle responsiveness during quick lane change for active vehicle handling safety. *J Automobile Eng.*, 2002, vol. 216 (2), pp. 115–124.
- [10] Ларин В.В. *Теория движения полноприводных колесных машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 391 с.
- [11] Марохин С.М. *Прогнозирование характеристик подвижности спецавтомобиля, оснащенного системами активной безопасности*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2005, 16 с.
- [12] Жилейкин М.М., Чулюкин А.О. Алгоритм работы системы динамической стабилизации для автомобиля 4×4 с подключаемой задней осью. *Наука и образование*. 2014, № 4 URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/704685.html>. Doi: 10.7463/0414.0704685.
- [13] Ryu J., Gerdes J.C. Estimation of vehicle roll and road bank angle. *Amer. Contr. Conf.*, 2004, vol. 3, pp. 2110 – 2115.

## References

- [1] Belousov B.N., Popov S.D. *Kolesnye transportnye sredstva osobo bol'shoi gruzopod'emnosti. Konstruktsiia. Teoriia. Raschet* [Wheeled vehicles especially heavy-duty vehicles. Design. Theory. Calculation]. Moscow, Bauman Press, 2006. 728 p.
- [2] Riazantsev V.I. *Aktivnoe upravlenie skhozhdeniem koles avtomobilia* [Active management toe car]. Moscow, Bauman Press, 2007. 212 p.
- [3] Karogal I., Ayalew B. Independent Torque Distribution Strategies for Vehicle Stability Control. *SAE Technical Papers*, 2009, doi: 10.4271/2009-01-0456.
- [4] Osborn R., Shim T., Independent Control of All-Wheel-Drive Torque Distribution. *SAE Technical Paper*, 2004-01-2052, 2004, doi: 10.4271/2004-01-2052.
- [5] Mammari S., Baghdassarian V.B. Two-degree-of-freedom formulation of vehicle handling improvement by active steering. *Proceedings of the American Control Conference*, 2000, vol. 1, pp. 105–109.
- [6] Yoshimoto K., Tanaka H., Kawakami S. Proposal of driver assistance system for recovering vehicle stability from unstable states by automatic steering. *Proceedings of the IEEE International Vehicle Electronics Conference*, Changchun, China, September 6–9, 1999, pp. 514–519.
- [7] Rodrigues A.O. *Evaluation of an active steering system*. Master's degree project. Sweden, 2004. Available at: [http://people.kth.se/~kallej/grad\\_students/rodriguez\\_orozco\\_thesis04.pdf](http://people.kth.se/~kallej/grad_students/rodriguez_orozco_thesis04.pdf) (accessed 1 December 2014).
- [8] Langson W., Alleyne A. Multivariable bilinear vehicle control using steering and individual wheel torques. *Proceedings of the American Control Conference*, 1997, vol. 2, pp. 1136–1140.
- [9] Mokhiamar O., Abe M. Active wheel steering and yaw moment control combination to maximize stability as well as vehicle responsiveness during quick lane change for active vehicle handling safety. *Journal of Automobile Engineering*, 2002, vol. 216(2), pp. 115–124.
- [10] Ларин В.В. *Теория движения полноприводных колесных машин* [Theory of motion-wheel drive wheeled machines]. Moscow, Bauman Press, 2010. 391 p.
- [11] Марохин С.М. *Прогнозирование характеристик подвижности спецавтомобиля, оснащенного системами активной безопасности*. Дисс. канд. техн. наук [Forecasting performance mobility spetsavtomobilja equipped active safety systems. Cand. tehn. sci. diss.]. Moscow, 2005. 16 p.
- [12] Жилейкин М.М., Чулюкин А.О. Алгоритм работы системы динамической стабилизации для автомобиля 4×4 с подключаемой задней осью [Algorithm of Dynamic Stabilization for 4×4 vehicle with optional rear axle].

tion System for a Car 4×4 with a Link Rear Axle]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education. Bauman MSTU]. 2014, no. 4. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/704685.html> (accessed 20 May 2015), doi: 10.7463/0414.0704685.

- [13] Ryu J., Gerdes J.C. Estimation of vehicle roll and road bank angle. *Proceedings of the American Control Conference*, 2004, vol. 3, pp. 2110–2115.

Статья поступила в редакцию 25.06.2015

## Информация об авторах

**ЖИЛЕЙКИН Михаил Михайлович** (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Колесные машины». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: jileykin\_m@mail.ru).

**ШИНКАРЕНКО Владимир Александрович** (Набережные Челны) — инженер. ОАО «КамАЗ» (423827, Набережные Челны, Республика Татарстан, Российская Федерация, Автозаводский пр-т, д. 2, e-mail: vl\_shinkarenko@mail.ru).

**ЯГУБОВА Евгения Вячеславовна** (Москва) — аспирантка кафедры «Колесные машины». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: yagubova.evg@yandex.ru).

## Information about the authors

**ZHILEYKIN Mikhail Mikhaylovich** (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Wheeled Vehicles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: jileykin\_m@mail.ru).

**SHINKARENKO Vladimir Aleksandrovich** (Naberezhnye Chelny) — Engineer. JSC KamAZ (423827, Naberezhnye Chelny, Republic of Tatarstan, Russian Federation, Avtozavodsky Ave., Bldg. 2, e-mail: vl\_shinkarenko@mail.ru).

**YAGUBOVA Yevgenia Vyacheslavovna** (Moscow) — Post-graduate, Department of Wheeled Vehicles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: yagubova.evg@yandex.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышло в свет учебное пособие  
под редакцией Д.А. Ягодникова

### «Агрегаты регулирования жидкостных ракетных двигательных установок»

Изложены основы теории, расчета и проектирования агрегатов регулирования жидкостных ракетных двигательных установок (ЖРДУ). Приведена классификация характеристик режимов работы отдельных агрегатов и ЖРДУ в целом. Рассмотрены основные характеристики ЖРДУ, даны примеры определения статических и динамических режимов работы двигательной установки. Описаны схемы и элементы конструкции агрегатов регулирования ЖРДУ. Приведена конструкторская оценка динамической устойчивости систем регулирования. На примере реальных схем ЖРДУ рассмотрено практическое применение агрегатов регулирования.

Для преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов старших курсов. Может быть полезно также инженерам, работающим в области теории регулирования ЖРД.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru