

УДК 656.135.073

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТНОГО ПЛЕЧА ПРИ МАССОВЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗКАХ ГРУЗОВ

Кузьмин Н.А., Плеханов Д.К., Пачурин Г.В.

*ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
Нижний Новгород, e-mail: PachurinGV@mail.ru*

Повышение эффективности перевозок грузов автомобильным транспортом невозможно без постоянного совершенствования системы управления этим процессом. На уровне автотранспортного предприятия наибольший вес имеет подсистема оперативного управления перевозками. Изучение основных законов функционирования подсистемы с целью последующей оптимизации транспортного процесса на реальное производство (вследствие высокого уровня неопределенности) представляет собой довольно сложную задачу. Для решения данного вопроса необходимо создание достаточно адекватной реальному производственному процессу имитационной модели, с последующим проведением вычислительного эксперимента, целью которого является поиск оптимальных показателей работы системы, что практически невозможно получить в реальных производственных условиях в силу больших временных и материальных затрат. В данной статье рассмотрен один из практически приемлемых способов решения этой задачи: создание достаточно адекватной имитационной модели транспортного процесса как объекта управления и системы управления этим процессом с последующим многократным использованием ее на компьютере. Такая методика позволяет быстро изменять структуру системы управления, используемые стратегии и ее основные параметры и после анализа полученных результатов выбрать наиболее оптимальный вариант. Экономическая эффективность такого метода очевидна.

Ключевые слова: эффективность грузовых перевозок, транспортный процесс, адекватная имитационная модель, структура системы управления, транспортное предприятие

MATHEMATICAL MODEL OF A VEHICLE WITH SHOULDER MASS MOTOR TRANSPORTATION OF CARGO

Kuzmin N.A., Plehanov D.K., Pachurin G.V.

*FGBOU VPO «Nizhny Novgorod State Technical University R.E. Alekseev»,
Nizhny Novgorod, e-mail: Pachu-rinGV@mail.ru*

Improving the efficiency of cargo transportation by road is impossible without the continuous improvement of the management of this process. At the level of the greatest weight motor company has operational control subsystem transportation. Study of the basic laws of the functioning of the subsystem for the purpose of optimizing the transport process of the real production (due to the high level of uncertainty) is a rather complicated task. To address this question it is necessary to create sufficiently adequate to the real production process simulation model, followed by a computational experiment, which aims to search for optimal system performance, it is almost impossible to obtain in real industrial conditions, because of the large time and material costs. This article discusses one of the practically acceptable way to solve this problem – the creation of sufficiently adequate simulation model of the transport process as the object of management and control systems of the process, followed by reuse it on your computer. This technique allows you to quickly change the structure of the control system used by the strategy and its basic parameters and, after analysis of the results, choose the best option. Economic efficiency of this method is obvious.

Keywords: efficiency of freight transport process, adequate simulation model, the structure of the control system, transport company

Своевременные бесперебойные массовые автомобильные перевозки различных грузов предполагают наличие надежного автомобильного подвижного состава [1]. Вопросы его эксплуатационной надежности определяются различными факторами [3], в том числе структурой и свойствами материалов деталей и элементов конструкций автомобилей [4-6].

При этом в процессе решения многих задач автомобильного транспорта, связанных с обоснованием и выбором рациональной организации перевозок, приходится сталкиваться с ситуацией, когда исследуемая система оказывается настолько сложна, что обычное решение задачи невозможно, а проведение экспериментальных исследо-

ваний или натуральных испытаний требует больших затрат времени и средств. Одной из эффективных мер по преодолению указанных выше трудностей является применение методов математического моделирования, позволяющих решать широкий круг задач автомобильного транспорта.

В качестве объекта моделирования примем работу группы автомобилей, снабжающих некоторым видом груза склад клиента-потребителя, на маятниковом маршруте с обратным незагруженным пробогом. В этом случае моделированию подлежат два взаимосвязанных процесса: процесс перемещения автомобилей по маршруту и процесс перемещения единиц груза со склада клиента-поставщика на

склад клиента-потребителя, а также процесс накопления и расходования груза на этом складе.

Построение имитационной математической модели

Построение имитационной математической модели транспортного процесса начнем с той ее части, которая моделирует перемещение автомобилей по маршруту. Отметим, что в процессе выполнения сменно-суточного задания любой автомобиль в любой момент времени может находиться в одном из девяти состояний (рис. 1):

1. в автотранспортном предприятии;
2. в первом нулевом пробеге;
3. в очереди на пост погрузки;

4. на погрузке на одном из постов погрузки;
5. в движении с грузом;
6. в очереди на пост разгрузки;
7. на разгрузке на одном из постов разгрузки;
8. в холостом пробеге;
9. во втором нулевом пробеге.

Реальному процессу перемещения автомобиля по маршруту в модели будет соответствовать последовательный переход автомобиля из одного состояния в другое. Тогда данному процессу можно поставить в соответствие некоторый марковский процесс перехода объекта управления (автомобилей и единиц груза) из одного состояния в другое [8], определяемый графом переходов анализируемой системы, представленном на рис. 2.

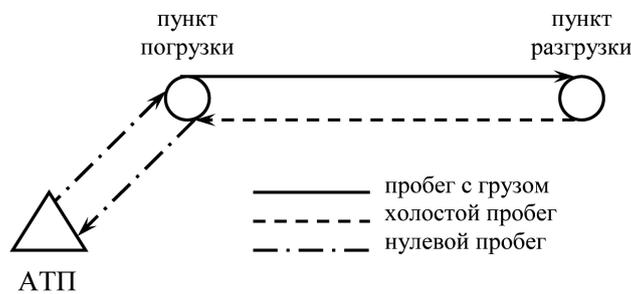


Рис. 1. Схема работы маятникового маршрута с обратным незагруженным пробегом

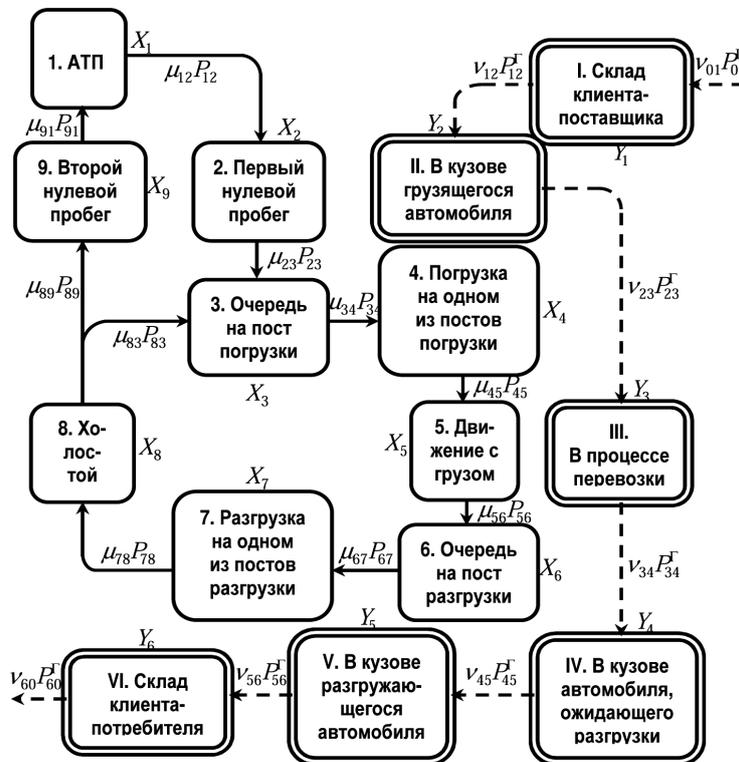


Рис. 2. Совмещенный граф перемещения автомобилей и единиц груза

Блоками с одинарным контуром на рис. 2 обозначены возможные состояния автомобилей, а сплошными стрелками направления перехода из одного состояния в другое. Через X_i ($i = 1, 2, \dots, 9$) на рис. 2 обозначено мгновенное количество автомобилей в соответствующем i -ом состоянии, через μ – интенсивность перехода одного автомобиля из данного i -го в последующее j -ое состояние, а через P_{ij} – вероятность такого перехода. Под интенсивностью перехода одного автомобиля из данного состояния в последующее будем понимать величину, обратную времени пребывания автомобиля в i -ом состоянии, т.е.

$$\mu_{ij} = 1/t_i, \quad (1)$$

где t_i – время пребывания автомобиля в i -ом состоянии.

Каждому состоянию графа переходов системы будет соответствовать дифференциальное уравнение вида

$$dX_i/dt = -\mu_{ij}P_{ij}X_i + \mu_{ki}P_{ki}X_k. \quad (2)$$

Это уравнение определяет скорость изменения количества автомобилей в рассматриваемом состоянии (dX_i/dt) как разность между суммарной интенсивностью перехода автомобилей в данное i -ое состояние из предыдущего k -го и суммарной интенсивностью перехода из данного i -го в последующее j -ое состояние [2]. Тогда рассматриваемому графу переходов будет соответствовать система из девяти дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} dX_1/dt = -\mu_{12}P_{12}X_1 + \mu_{91}P_{91}X_9; \\ dX_2/dt = -\mu_{23}P_{23}X_2 + \mu_{12}P_{12}X_1; \\ dX_3/dt = -\mu_{34}P_{34}X_3 + \mu_{23}P_{23}X_2 + \mu_{83}P_{83}X_8; \\ dX_4/dt = -\mu_{45}P_{45}X_4 + \mu_{34}P_{34}X_3; \\ dX_5/dt = -\mu_{56}P_{56}X_5 + \mu_{45}P_{45}X_4; \\ dX_6/dt = -\mu_{67}P_{67}X_6 + \mu_{56}P_{56}X_5; \\ dX_7/dt = -\mu_{78}P_{78}X_7 + \mu_{67}P_{67}X_6; \\ dX_8/dt = -\mu_{89}P_{89}X_8 - \mu_{83}P_{83}X_8 + \mu_{78}P_{78}X_7; \\ dX_9/dt = -\mu_{91}P_{91}X_9 + \mu_{89}P_{89}X_8. \end{array} \right.$$

Для интегрирования этой системы необходимо задать значения вероятностей P_{ij} и интенсивностей μ_{ij} переходов из одного состояния в другое, а также начальные условия интегрирования.

Вероятности переходов автомобилей из одного состояния в другое используем для управления движением автомобилей. Для этого будем рассматривать их как булевы переменные, принимающие значение 0, если данный переход из одного состояния в другое необходимо запретить, и 1, если такой переход разрешен.

Будем считать, что вероятности переходов P_{23} , P_{34} , P_{45} , P_{56} , P_{67} , P_{78} и P_{91} всегда равны единице. Вероятности P_{12} , P_{83} и P_{89} могут принимать значения 0 или 1 и связаны между собой следующей зависимостью: если $P_{12} = 0$, то P_{89} может принимать

значения 0 или 1, если $P_{83} = 1$, то P_{89} может иметь только нулевое значение, и наоборот. Для вероятностей P_{83} и P_{89} установим следующую зависимость: $P_{83} = 0$, если $P_{89} = 1$, и $P_{83} = 1$, если $P_{89} = 0$.

Перейдем теперь к определению интенсивностей переходов из одного состояния в другое μ_{ij} . Отметив, что интенсивность перехода автомобиля из какого-либо состояния есть величина обратная времени пребывания автомобиля в этом состоянии, выразим ее через значения параметров транспортного процесса [2]. Проще всего это сделать для состояний, отражающих процесс перемещения автомобиля по маршруту (состояния 2, 5, 8, 9). При этом соответствующие интенсивности примут следующие значения:

$$\mu_{23} = \mu_{91} = \frac{l_0}{v_{\text{ТХ}}}; \quad \mu_{56} = \frac{l_{\text{М}}}{v_{\text{ТТ}}}; \quad \mu_{89} = \mu_{83} = \frac{l_{\text{М}}}{v_{\text{ТХ}}}, \quad (4)$$

где l_0 – длина нулевого пробега (расстояние от склада поставщика до автотранспортно-го предприятия);

$l_{\text{М}}$ – длина маршрута (расстояние от склада поставщика до склада потребителя);
 $v_{\text{ТТ}}$ – скорость движения автомобиля с грузом;

$v_{\text{ТХ}}$ – скорость движения автомобиля без груза.

Несколько сложнее определить интенсивности μ_{45} и μ_{78} переходов из состояний погрузки и выгрузки. В общем случае с увеличением числа автомобилей в этих состояниях в пределах от $X_i = 0$ до $X_i = m_i$ (где m_i – число постов погрузки или выгрузки в рассматриваемом состоянии) суммарная интенсивность перехода $\mu_{ij} X_i$ растет от нуля до значения

$$E = \frac{m_i \delta_i n_i}{q_H \gamma_C t_{\text{Ц}i}}, \quad (5)$$

где δ_i – грузоподъемность погрузочной (или разгрузочной) машины в рассматриваемом состоянии; n_i – количество погрузочных (или разгрузочных) машин на одном посту; q_H – грузоподъемность автомобиля; γ_C – коэффициент использования грузоподъемности автомобиля; $t_{\text{Ц}i}$ – время цикла погрузочной (или разгрузочной) машины.

При дальнейшем увеличении числа автомобилей в соответствующем состоянии появляется очередь (простой в ожидании погрузки или выгрузки) и величина $X_i \mu_{ij}$ остается неизменной, как показано на рис. 3.

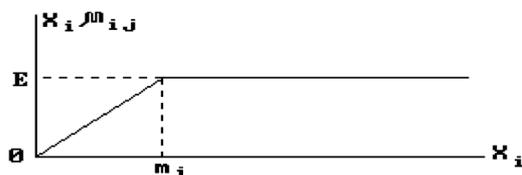


Рис. 3. График зависимости суммарной интенсивности переходов автомобилей из состояния погрузки или выгрузки от числа автомобилей

Приведенному на рис. 3. графику соответствует уравнение:

$$X_i \mu_{12} = \text{sign}(X_i) \min \{ X_4 \mu_{45}; X_5 \mu_{56}; X_7 \mu_{78}; X_8 \mu_{83} \}, \quad (11)$$

$$\text{где } \text{sign}(X_i) = \begin{cases} 0, & \text{если } X_i = 0, \\ 1, & \text{если } X_i \neq 0. \end{cases}$$

Подставляя полученные значения интенсивностей и вероятностей в систему дифференциальных уравнений перемещения автомобилей по маршруту (3), получим в окончательном виде математическую модель перемещения автомобилей. Процесс непрерывного интегрирования приведенной системы дифференциальных уравнений (3) соответствует процессу последовательного перемещения автомобилей из одного состо-

$$X_i \mu_{ij} = \frac{E}{2} \left[\frac{X_i}{m_i} - \frac{|X_i - m_i|}{m_i} + 1 \right]. \quad (6)$$

Подставляя сюда значение E и производя несложные преобразования, получим:

$$X_i \mu_{ij} = \frac{m_i \delta_i n_i}{2 q_H \gamma_C t_{\text{Ц}i}} \left\{ \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{X_i} \right) - \left| \frac{1}{m_i} - \frac{1}{X_i} \right| \right\} X_i. \quad (7)$$

Тогда интенсивности μ_{45} и μ_{78} переходов из состояний погрузки и выгрузки примут вид:

$$\mu_{ij} = \frac{m_i \delta_i n_i}{2 q_H \gamma_C t_{\text{Ц}i}} \left\{ \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{X_i} \right) - \left| \frac{1}{m_i} - \frac{1}{X_i} \right| \right\}. \quad (8)$$

Однако, поскольку ожидание погрузки и разгрузки мы выделили в отдельные состояния, количество автомобилей в них не будет превышать число постов в этих состояниях, и интенсивности μ_{45} и μ_{78} окончательно примут значения:

$$\mu_{45} = \frac{m_4 \delta_4 n_4}{2 q_H \gamma_C t_{\text{Ц}4}}, \quad \mu_{78} = \frac{m_7 \delta_7 n_7}{2 q_H \gamma_C t_{\text{Ц}7}}. \quad (9)$$

Так как на посты погрузки или выгрузки автомобили будут поступать либо по мере освобождения постов (при наличии очереди), либо по мере прибытия в пункт погрузки-выгрузки (при отсутствии очереди в этих состояниях), то суммарные интенсивности переходов автомобилей из состояния ожидания погрузки и выгрузки в данном случае могут быть определены следующим образом:

$$X_3 \mu_{34} = \min \{ (\mu_{23} + \mu_{83}); \mu_{45} \} X;$$

$$X_6 \mu_{67} = \min \{ \mu_{56}; \mu_{78} \} X. \quad (10)$$

Интенсивность перехода автомобилей из состояния 1 (в АТП) в состояние 2 (в первом нулевом пробеге) будет зависеть от графика выпуска автомобилей на линию и может быть вычислена по формуле:

яния в другое. Точность моделирования при этом определяется величиной выбранного периода интегрирования: чем меньше этот период, тем точнее моделирование.

Одновременно с перемещением автомобилей по маршруту происходит процесс перемещения груза, определяющий выполнение сменно-суточного задания. Математическая модель перемещения груза строится способом, аналогичным тому, что был

применен для моделирования перемещения автомобилей [8].

Каждая единица груза может находиться в любой момент времени в одном из шести состояний:

- на складе клиента-поставщика;
- в кузове грузящегося автомобиля;
- в процессе перевозки;
- в кузове автомобиля, ожидающего разгрузки;
- в кузове разгружающегося автомобиля;
- на складе клиента-потребителя.

Реальному процессу перемещения единиц груза в модели будет соответствовать последовательный переход из одного состояния в другое [2]. Граф переходов анализируемой системы представлен на рис. 2. Блоками с двойным контуром обозначены возможные состояния единиц груза, а пунктирными стрелками направления перехода из одного состояния в другое.

На этом графе римскими цифрами обозначены возможные состояния единиц перевозимого груза в соответствии с приведенным перечнем состояний. Через Y_i обозначено количество единиц груза в i -ом состоянии (под состоянием с индексом $i = 0$ подразумевается любое внешнее по отношению к рассматриваемой системе состояние), через v_{ij} – интенсивность перехода единицы груза из данного i -го в последующее j -е состояние, а через P_{ij}^Γ – вероятность такого перехода. Отметим, что интенсивности v_{01} и v_{60} определяют соответственно скорость поступления груза на склад клиента-поставщика и расходование груза со склада клиента-потребителя; они должны быть заданы в исходных данных. Тогда той ча-

сти обобщенного графа переходов (рис. 2), которая описывает перемещение единиц груза, можно поставить в соответствие следующую систему из шести дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} dY_1/dt = -v_{12}P_{12}^\Gamma Y_1 + v_{01}P_{01}^\Gamma Y_0; \\ dY_2/dt = -v_{23}P_{23}^\Gamma Y_2 + v_{12}P_{12}^\Gamma Y_1; \\ dY_3/dt = -v_{34}P_{34}^\Gamma Y_3 + v_{23}P_{23}^\Gamma Y_2; \\ dY_4/dt = -v_{45}P_{45}^\Gamma Y_4 + v_{34}P_{34}^\Gamma Y_3; \\ dY_5/dt = -v_{56}P_{56}^\Gamma Y_5 + v_{45}P_{45}^\Gamma Y_4; \\ dY_6/dt = -v_{60}P_{60}^\Gamma Y_6 + v_{56}P_{56}^\Gamma Y_5. \end{cases} \quad (12)$$

Для возможности совместного решения обеих полученных систем уравнений отметим, что перемещение груза определяется перемещением автомобилей. Произведем следующую замену:

$$\begin{cases} v_{12}P_{12}^\Gamma Y_1 = \mu_{34}P_{34}X_3q_H\gamma_C \\ v_{23}P_{23}^\Gamma Y_2 = \mu_{45}P_{45}X_4q_H\gamma_C \\ v_{34}P_{34}^\Gamma Y_3 = \mu_{56}P_{56}X_5q_H\gamma_C \\ v_{45}P_{45}^\Gamma Y_4 = \mu_{67}P_{67}X_6q_H\gamma_C \\ v_{56}P_{56}^\Gamma Y_5 = \mu_{78}P_{78}X_7q_H\gamma_C. \end{cases} \quad (13)$$

Величины $v_{01}P_{01}^\Gamma Y_0$ и $v_{60}P_{60}^\Gamma Y_6$ аналогичным образом через параметры системы уравнений перемещения автомобилей выражены быть не могут и, как уже отмечалось, должны быть определены в исходных данных. Тогда вторая система уравнений примет следующий вид:

$$\begin{cases} dY_1/dt = -\mu_{34}P_{34}X_3q_H\gamma_C + v_{01}P_{01}^\Gamma Y_0; \\ dY_2/dt = -\mu_{45}P_{45}X_4q_H\gamma_C + \mu_{34}P_{34}X_3q_H\gamma_C; \\ dY_3/dt = -\mu_{56}P_{56}X_5q_H\gamma_C + \mu_{45}P_{45}X_4q_H\gamma_C; \\ dY_4/dt = -\mu_{67}P_{67}X_6q_H\gamma_C + \mu_{56}P_{56}X_5q_H\gamma_C; \\ dY_5/dt = -\mu_{78}P_{78}X_7q_H\gamma_C + \mu_{67}P_{67}X_6q_H\gamma_C; \\ dY_6/dt = -v_{60}P_{60}^\Gamma Y_6 + \mu_{78}P_{78}X_7q_H\gamma_C. \end{cases} \quad (14)$$

Эти две системы дифференциальных уравнений (3), (15) и составляют основу создаваемой математической модели, а при совместном интегрировании имитируют перемещение по маршруту автомобилей и единиц груза.

Выводы

Предложенная математическая модель хотя и достаточно точна, но обладает рядом существенных недостатков:

- почти не учитывается высокий уровень стохастичности транспортного процесса (данная математическая модель описывает идеальный случай работы маршрута, но имеется возможность варьировать вероятность перехода из одного состояния в другое);

- решение данной модели не приведет к целочисленному результату;

- не учитывается ошибка квантования текущего времени [2].

Поэтому здесь необходимо применять метод имитационного моделирования, сущность которого в последовательной обработке описанных выше состояний с помощью математического аппарата и алгоритмов, реализуемых на ЭВМ.

Список литературы

1. Кудрявцев С.М., Пачурин Г.В., Соловьев Д.В., Власов В.А. Основы проектирования, производства и материалы кузова современного автомобиля: Монография. – НГТУ. – Н. Новгород, 2012. 236 с.
2. Лавров Л.Г. Экономико-математические методы проектирования и управления АТП: Учеб. пособие / ННПИ; Н. Новгород, 1992. 89 с.
3. Пачурин Г.В., Гущин А.Н., Галкин В.В., Пачурин В.Г. Теоретические основы повышения эксплуатационной долговечности штампованных металлоизделий: учеб. пособие для студентов вузов/ НГТУ.– Н. Новгород, 2006.– 173 с.
4. Пачурин Г.В. Долговечность пластически деформированных коррозионно-стойких сталей // Вестник машиностроения. 2012. № 7. С. 65–68.
5. Пачурин Г.В. Повышение эксплуатационной долговечности нержавеющей сталей технологическим упрочнением // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 2 (Часть 2). С. 28–33.
6. Пачурин Г.В., Власов В.А. Механические свойства листовых конструкционных сталей при температурах эксплуатации // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. №4 (706). С. 48–53.
7. Плеханов Д.К., Кузьмин Н.А. Стратегии диспетчерского управления работой грузовых автомобилей при массовых перевозках // Автотранспортное предприятие. 2009. №12. С. 40–41.
8. Плеханов Д.К., Лавров Л.Г. Логистика на автомобильном транспорте. Комплекс учебно-методических материалов по изучению дисциплины, Н.Новгород, НГТУ, 2006. 84 с.
9. Родников А.Н. Логистика: Терминологический словарь. – М.: Инфра-М, 2000. 340 с.
10. Смехов А.А. Математические модели процессов грузовой работы. М.: Транспорт, 1992. 256 с.

References

1. Kudryavtsev S.M., Pachurin G.V., Solovyov D.V., Vlasov V.A. Fundamentals of design of production and modern car body materials: Monograph. – NSTU. – N. Novgorod – born, 2012. 236 p.
2. Lavrov L.G. Economic-mathematical methods, design and management of ATP: Proc. Benefit / NNPI; Nizhny Novgorod, 1992. 89 p.
3. Pachurin G.V., Goushchin A.N., Galkin V.V., Pachurin V.G. Theoretical basis for improving the operational life of stamped metal: Proc. manual for students / NSTU. – Nizhny Novgorod, 2006. – 173 p.
4. Pachurin G.V. Durability plastically deformed stainless steels // Bulletin of mechanical engineering. 2012. no. 7. PP. 65–68.
5. Pachurin G.V. Increase the operational life of stainless steel techno - logical hardening // International Journal of Applied and Basic Research. 2014. no. 2 (Part 2). PP. 28–33.
6. Pachurin G.V., Vlasov V.A. Mechanical properties of structural steel sheet at operating temperatures // metallurgy and heat treatment of metals. 2014. no. 4 (706). PP. 48–53.
7. Plekhanov D.K., Kuzmin N.A. Supervisory control strategy work trucks for mass transport // Transport company. 2009. no. 12. PP. 40–41.
8. Plekhanov D.K., Lavrov L.G. Logistics in road transport. Complex teaching materials on the study subjects, Nizhny Novgorod, Novosibirsk State Technical University, 2006. 84 p.
9. Rodnikov A.N. Logistics: Glossary. – Moscow: Infra-M, 2000. 340 p.
10. Smekhov A.A. Mathematical models of freight transportation. Moscow: Transport, 1992. 256 p.

Рецензенты:

Панов А.Ю., д.т.н., профессор, директор ИПТМ, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (НГТУ), г. Нижний Новгород;
 Молев Ю.И., д.т.н., профессор кафедры «Строительные и дорожные машины» (СДМ), Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (НГТУ), г. Нижний Новгород.

Работа поступила в редакцию 24.06.2014.