

## ОПТИМИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ АВТОБУСОВ КАТЕГОРИИ М<sub>3</sub> НА ОСНОВЕ ЗАГОРОДНЫХ ЕЗДОВЫХ ЦИКЛОВ

**С.А. Горожанкин**

ORCID: 0000-0001-7093-881X e-mail: [s.a.gorozhankin@donnasa.ru](mailto:s.a.gorozhankin@donnasa.ru)

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры  
Макеевка, Донецкая Народная республика

**Н.В. Савенков**

ORCID: 0000-0003-3803-9528 e-mail: [n.v.savenkov@donnasa.ru](mailto:n.v.savenkov@donnasa.ru)

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры  
Макеевка, Донецкая Народная республика

Представлены результаты исследования топливной экономичности и скоростных свойств пригородных и междугородных автобусов категории М<sub>3</sub> при их эксплуатации в загородных условиях в соответствии с ГОСТ Р 54810-2011. В качестве критериев для оценки эффективности процесса движения автобусов большого класса выбран средний массовый путевой расход топлива в условиях магистральных ездовых циклов и соответствующая средняя скорость. Повышение топливной экономичности обусловлено увеличением общего КПД двигателя и трансмиссии за счет рационального согласования характеристик и режимов работы этих агрегатов.

Исследование выполнено на примере автобусов марки НЕФАЗ-5299 классов II и III. Результаты получены путем численного моделирования процесса движения с помощью разработанных компьютерных программ. Для исследуемых моделей пригородных автобусов рациональный выбор режимов дает возможность уменьшить путевой расход топлива на 8-10 % в сравнении с оптимизацией по средней скорости прохождения ездового цикла. Для междугородных автобусов соответствующее улучшение может составлять 6-7 %. Полученные результаты могут быть использованы для рационального комплектования перспективных силовых агрегатов современных автобусов большого класса, а также при конструировании и настройке трансмиссий с автоматическим управлением.

**Ключевые слова:** путевой расход топлива, время движения, ездовой цикл, неустановившийся режим, передаточное число, численное моделирование, оптимизация, двигатель внутреннего сгорания, трансмиссия.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Горожанкин, С.А. Оптимизация движения автобусов категории М<sub>3</sub> на основе загородных ездовых циклов / С.А. Горожанкин, Н.В. Савенков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. №3. С. 86-98. DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_86

## OPTIMIZATION OF CATEGORY M<sub>3</sub> BUS MOVEMENT BASED ON EXTRA-URBAN DRIVING CYCLES

**S.A. Gorozhankin**

ORCID: 0000-0001-7093-881X e-mail: [s.a.gorozhankin@donnasa.ru](mailto:s.a.gorozhankin@donnasa.ru)

Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture  
Makeevka, Donetsk People's Republic

**N.V. Savenkov**

ORCID: 0000-0003-3803-9528 e-mail: [n.v.savenkov@donnasa.ru](mailto:n.v.savenkov@donnasa.ru)

Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture  
Makeevka, Donetsk People's Republic

**Abstract.** The results of investigating the fuel efficiency and the speed properties of suburban and interurban category M<sub>3</sub> buses during their service in extra-urban conditions according to GOST P 54810-2011 are presented. The criteria for assessing the effectiveness of movement of large-sized class busses were the average driving fuel mass consumption in conditions of motorway driving cycles and the corresponding average speed. The fuel efficiency is in-

creased by increasing the overall efficiency of the engine and the power train due to an effective coordination of the characteristics and the duty of these units.

The investigation was conducted by the example of NEFAZ-5299 buses class II and III. The results were obtained by numerical simulation of the movement process with the help of developed computer programs. For the models of the suburban buses being investigated, an effective choice of their duties enables reducing the driving fuel consumption by 8-10 % as compared to that of optimization by the average speed of the driving cycle. For interurban buses, the corresponding improvement can be 6-7%. The results can be used for effective completing of perspective power plants in large-sized modern buses, as well as for designing and setting-up of power trains with automatic control.

**Key words:** driving fuel consumption, running time, driving cycle, unsteady conditions, transmission gear ratio, numerical simulation, optimization, internal combustion engine, power train, bus.

**FOR CITATION:** S.A. Gorozhankin, N.V. Savenkov. Optimization of category M<sub>3</sub> bus movement based on extra-urban driving cycles. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. № 2. Pp. 86-98.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_2\_86

На рынке грузовых автоперевозок в настоящее время идет жесткая конкурентная борьба за клиента, практически повсеместно предложение превышает спрос. В сфере между-городных и пригородных пассажирских перевозок конкуренция, к сожалению, проявляется не столь отчетливо. В еще большей мере это относится к массовым перевозкам в населенных пунктах. Рынок пассажирских перевозок располагает потенциальными ресурсами, но ему еще предстоит пройти определенные этапы становления. В перспективе можно предполагать, что потребитель (потенциальный пассажир) будет самостоятельно выбирать услуги по перевозкам в соответствии со своими финансовыми возможностями, соотношением цены и качества услуг.

Благодаря ряду преимуществ перед другими видами сообщений, автобусный транспорт получил значительное распространение. Традиционные автобусные перевозки пассажиров широко применяются в Российской Федерации, соответствующее их распределение по видам сообщений имеет следующую структуру: городские – 67 %, пригородные – 28 %, междугородные – 5 % [1]. В подавляющем большинстве малых городов и поселков городского типа автобус является основным видом массового пассажирского транспорта, а в сельской местности, как правило, единственным. Внутриобластные и сельские пассажирские перевозки обеспечивают связи малых населенных пунктов с магистральными видами транспорта дальнего сообщения. Автомобильный транспорт обслуживает также длительные перевозки пассажиров в районах, не имеющих развитых железнодорожных, воздушных и речных коммуникаций. Пригородные и междугородные маршруты имеют свои закономерности распределения пассажиропотоков по участкам маршрутов. Для пригородных маршрутов характерно постепенное нарастание, либо убывание пассажиропотоков по направлениям движения относительно города в зависимости от времени суток и дня недели; для междугородных отмечаются относительно постоянные пассажиропотоки. Для перевозчиков в условиях конкуренции, наряду с технико-технологическими, актуальными являются задачи экономической направленности: снижение себестоимости перевозок и обеспечение надлежащего качества услуг по обслуживанию пассажиров.

Соответственно, основная часть вопросов, рассматриваемых в настоящей работе, направлена на поиск путей улучшения топливно-экономичных эксплуатационных свойств автобусов на пригородных и междугородных маршрутах. Эти свойства определялись путем численного моделирования процесса движения автотранспортных средств на примере современных автобусов большого класса НЕФАЗ-5299 вагонной компоновки, доля которых в общем парке автобусов Российской Федерации и стран СНГ непрерывно растет [2].

Таким образом, основной целью работы является исследование топливной экономичности пригородных и междугородных автобусов категории M<sub>3</sub> при их эксплуатации в загородных условиях.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- разработана математическая модель движения автобуса с учетом характеристик его трансмиссии и установленного ДВС в условиях магистрального ездового цикла;
- на основе уравнения тягового баланса и разработанных вариантов моделей обоснована методика расчета параметров движения автобусов в таких циклах;
- выполнены расчеты топливной экономичности автобусов для движения в магистральных циклах на дороге в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54810-2011 [3].

Экономическая эффективность эксплуатации подавляющего большинства автотранспортных средств (АТС), оснащенных тепловыми двигателями, главным образом, определяется затратами на топливо, которые для коммерческих АТС составляют в среднем 51-64 % от общих эксплуатационных финансовых расходов [4]. Средний путевой расход топлива выражается, как правило, объемом или массой топлива, затраченного на единицу пути при строго определенных условиях движения.

Известные направления по снижению путевого расхода топлива учитываются при проектировании как АТС, так и их двигателей, трансмиссии и вспомогательных агрегатов. Как правило, это сопровождается возрастанием их стоимости. Так, например, уменьшение собственной массы автомобиля требует применения новых конструкционных материалов (чаще всего, более высокой стоимости) и соответствующих технологических процессов их обработки. Необходимость повышения КПД современных ДВС обычно предполагает применение дополнительных агрегатов и механизмов, специальных систем комплексного управления силовой установкой и других устройств. Все это влияет на экономическую эффективность эксплуатации. На топливную экономичность АТС, помимо конструктивных параметров и внешних условий, существенное влияние оказывают также эксплуатационные факторы, к которым следует отнести его техническое состояние, а также дорожные, режимные, погодноклиматические и другие условия эксплуатации (в том числе, стиль, опыт водителя и манера вождения). В Российской Федерации, в соответствии с требованиями ГОСТ 20306-90, устанавливаются следующие показатели и характеристики топливной экономичности АТС: расход топлива при заданных скоростях движения, расход топлива в магистральном цикле на дороге, расход топлива в городском цикле на дороге, топливная характеристика установившегося движения, контрольный расход топлива.

В настоящей работе представлены результаты возможности повышения топливной экономичности пригородных и междугородных автобусов большого класса при их движении за счет увеличения общего КПД двигателя и трансмиссии путем рационального согласования характеристик и режимов работы этих агрегатов. В качестве критерия для оценки топливной экономичности автобусов выбран средний массовый путевой расход топлива в условиях магистральных ездовых циклов на дороге [5], который может быть определен как в ходе стендовых, так и дорожных испытаний. В мировой практике данный критерий является наиболее распространенным поскольку дополнительно учитывает неустановившиеся режимы, характерные для нормальных условий эксплуатации – разгон, торможение двигателем, режим холостого хода. Соответственно, для различных АТС в одинаковых ездовых циклах выбранный критерий становится достоверной характеристикой их совершенства, количественная оценка которого может быть определена суммарной массой топлива, израсходованного АТС в установленном ездовом цикле.

Рассматриваемое в данном исследовании направление по повышению топливной экономичности, фактически представляет собой задачу оптимизации, которая требует соответствия и строгого соблюдения параметров работы двигателя и трансмиссии с режимами движения автобуса на дороге – его скорости и продольного ускорения. Это предполагает необходимость использования методов математического моделирования как процесса движения автобуса на всех исследуемых режимах, так и вычислений частичных скоростных и нагрузочных характеристик двигателя, а также учета параметров трансмиссии. Результаты подобных вычислений не всегда дают однозначные решения вследствие наличия сложных связей между вышеперечисленными параметрами. Выбор вида ездового цикла зависит от категории

и класса исследуемого АТС и определяется государственными стандартами. В Российской Федерации для расчетов параметров циклов автотранспортных средств принят ГОСТ Р 54810-2011. Исследуемые в данной работе пригородные и междугородные автобусы относятся к категории М<sub>3</sub>. Для автобусов классов II (пригородные) и III (дальнего следования) принято движение в магистральных циклах на дороге (рис. 1).

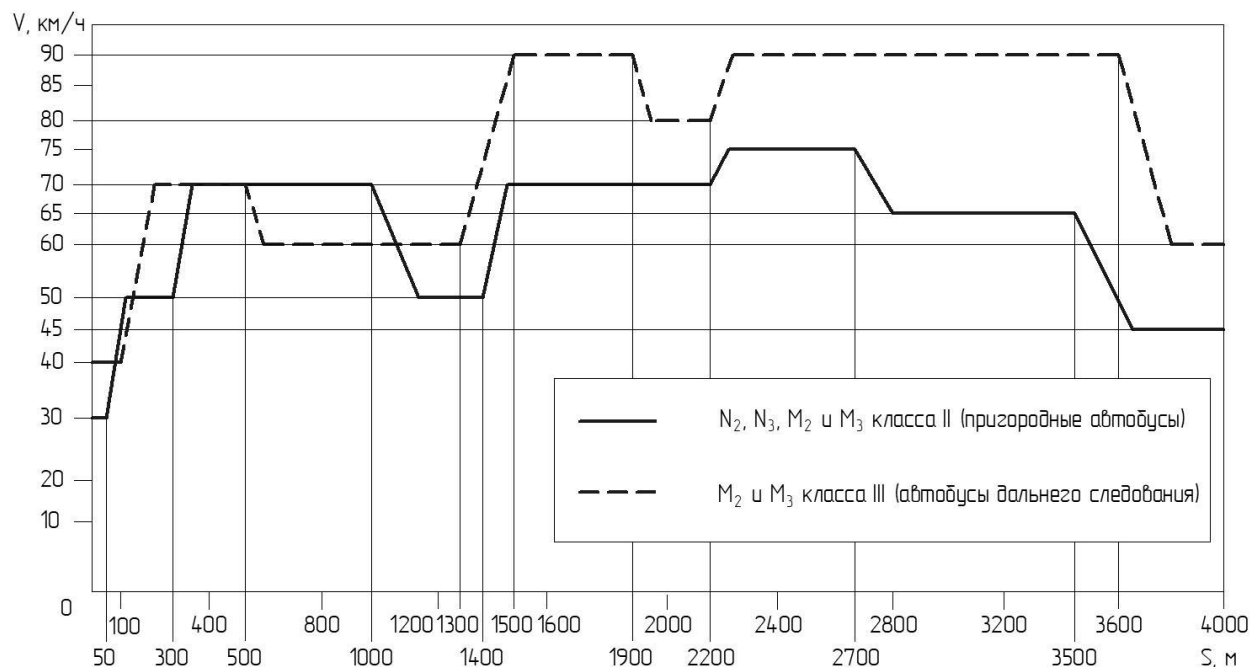


Рис. 1. Схема магистральных циклов на дороге для автобусов II и III классов

Fig. 1. Diagram of motorway driving cycles for class II and III buses

В ГОСТ Р 54810-2011, как и в ранее введенном ГОСТ 20306-90, не установлено время движения на отдельных участках ездового цикла, а также номера включенных передач. Соответственно, расчеты движения АТС по этому циклу являются в значительной мере ориентировочными, поскольку стандартом также не регламентированы значения их ускорений и замедлений. Отсутствие требований к номеру передачи и скорости движения при переключениях передач позволяет варьировать ускорениями и замедлениями, а также предусматривать возможность оценки других вариантов движения с целью оптимизации какого-либо из его параметров. При этом в качестве целевой функции критерия, кроме расхода топлива в ездовом цикле, становится возможным принимать и другие – время движения, среднюю скорость и т.д.

Проведенное рассмотрение материалов из источников информации дает возможность провести исследование на примере пригородных и междугородных автобусов марки НЕФАЗ-5299 большого класса, выпускаемых ПАО «НЕФАЗ», входящем в группу предприятий ПАО «КАМАЗ». Автобусы производятся на базе нескольких типоразмеров шасси и включают городские, пригородные и междугородные модификации, работающие как на газообразном, так и на дизельном топливе и соответствующие экологическим классам Евро-4 и Евро-5.

Ввиду значительного разнообразия мощности и характеристик двигателей, широкого диапазона передаточных чисел коробок передач (КП) и главной передачи, для проведения исследований выбраны современные модели автобусов, основные параметры которых представлены в табл. 1.

Таблица 1.

**Основные параметры исследуемых моделей  
междугородных и пригородных автобусов «НЕФАЗ 5299»**

Table 1.

**Basic parameters of investigated models of interurban and suburban buses NefAZ 5299**

Модель автобуса	Колесная формула	Снаряженная масса автобуса, кг	Количество мест для сидения	Пассажировместимость, чел.	Полная масса автобуса, кг	Тип ДВС, номинальная мощность, кВт	Коробка передач	Передаточное число главной передачи	Размер шин	Максимальная скорость, км/ч
междугородные										
НефАЗ-5299-17-33	4×2	12720	43 (45)	54	16900	КамАЗ-740.62-280, 206 кВт	ZF 6S 1200BO КамАЗ-144	5.11	11/70R22,5	90
НефАЗ-5299-37-52	4×2	12360	42 (44)	71 (69)	17900	Cummins ISB6.7e4 250B, 175 кВт	ZF 6S 1310BO	5.11	11/70R22,5	110
пригородные										
НефАЗ-5299-11-33	4×2	11340	45	77	16900	КамАЗ-740.62-280, 206 кВт	ZF 6S 1200BO КамАЗ-144	5.11	11/70R22,5	90
НефАЗ-5299-11-52	4×2	10980	45	45 (89)	17900	Cummins ISB6.7e4 250B, 175 кВт	ZF 6S 1310BO	5.11	11/70R22,5	110

Основные параметры двигателей КамАЗ-740, применявшихся и применяемых в автобусах НЕФАЗ-5299, приведены в табл. 2. В зависимости от периода разработки, двигатели КамАЗ-740 имеют разные экологические нормы: от Евро-0 до Евро-5.

В трансмиссии автобусов применяются как пятиступенчатые механические ступенчатые КП без делителя с ручным управлением (модели КамАЗ-141 и КамАЗ-144, передаточные числа соответственно: 5.62; 2.89; 1.64; 1; 0.742 и 7.82; 4.03; 2.5; 1.53; 1.00), так и шестиступенчатые автоматические (модель ZF 6S 1200 BO и ZF 6S 1310 BO, передаточные числа: 6.75; 3.87; 2.36; 1.47; 1.00; 0.83). В качестве ведущих мостов устанавливаются модели Raba A-209 и Raba A-718 с передаточными числами главной передачи 4.3, 5.117 или 6.194.

Таблица 2.  
Основные параметры ДВС для пригородных и междугородных автобусов ПАО «НЕФАЗ»

Table 2.

Basic ICE parameters for PJSC NEFAZ interurban and suburban buses

Модель ДВС	Номинальная мощность, кВт (л.с.), при частоте вращения, мин <sup>-1</sup>	Макс. крутящий момент, Н·м	Диаметр цилиндра, ход поршня, мм	Степень сжатия	Рабочий объем, л	Мин. удельный расход топлива (по ВСХ), г/кВт·ч (г/л.с.·ч)
740.11-240	176 (240), 2200	834	120x120	н/д	10,85	207 (152)
740.30-260	191 (260) 2200	1078	120x120	16.5	10,85	207 (152)
740.31-240	176 (240), 2200	980	120x120	16	10,85	н/д
740.62-280	206 (280), 1900	1177	120x130	16.8	11,76	205(151)
740.65-240	176 (240), 1900	981	120x130	16.8	11,76	205(151)

Внешние скоростные характеристики (ВСХ) двигателей группы КамАЗ-740.6, приводимые заводом-изготовителем, представлены на рис. 2а.

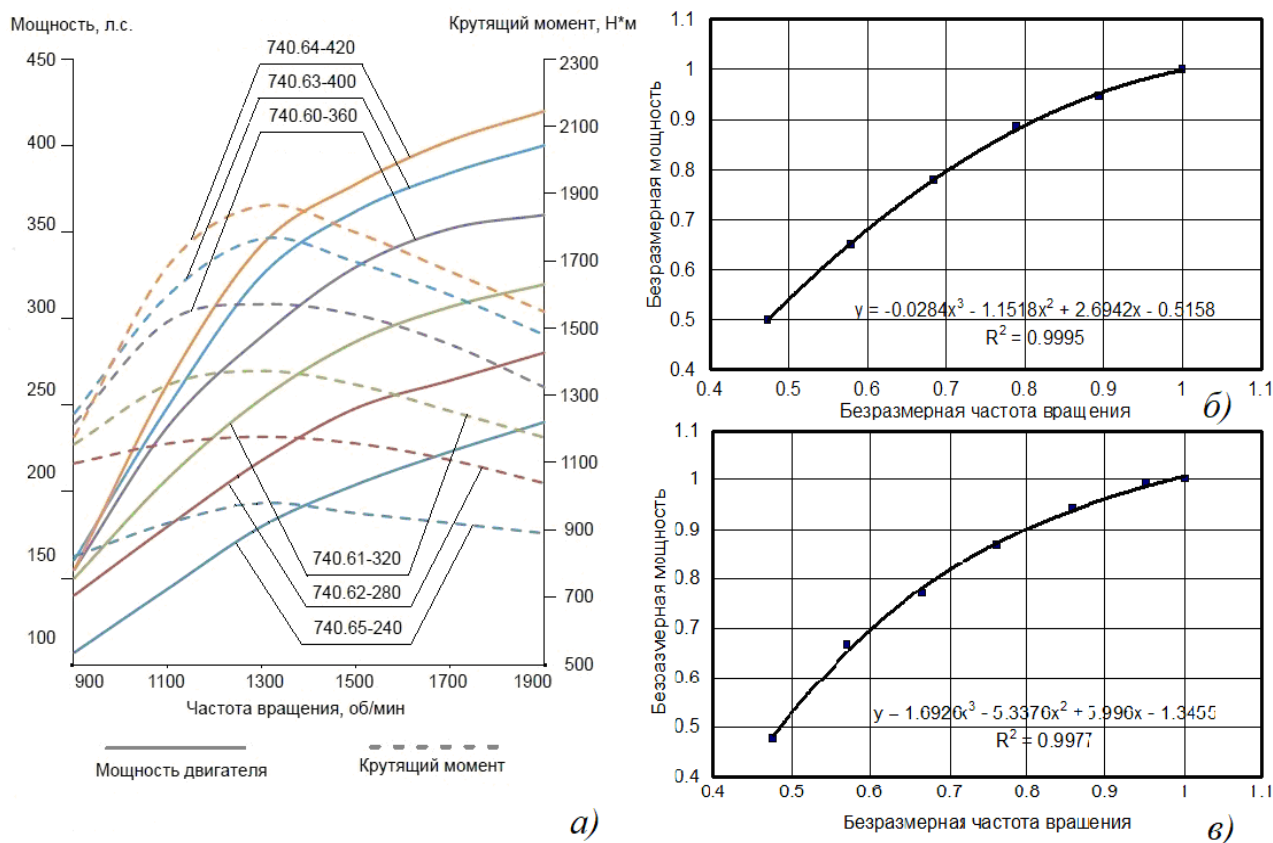


Рис. 2. Внешние скоростные характеристики двигателей:

- а) ДВС группы КамАЗ-740.6;
- б) аппроксимация ВСХ двигателя КамАЗ-740.62-280 (коэффициент корреляции 0.9995);
- в) аппроксимация ВСХ двигателей Cummins (коэффициент корреляции 0.9977)

Fig. 2. Full-load curves of engines:

- a) ICE of the KamAZ-740.6 group;
- b) approximation of the full-load curve (FLC) of the KamAZ-740.62-280 engine (correlation index 0.9995);
- c) approximation of the FLC of the Cummins engines (correlation index 0.9977)

Для расчета внешних и частичных скоростных характеристик ДВС в исследовании применена полиномиальная зависимость (1):

$$N_e = f(k, n) = k \cdot N_{e \max} \cdot \left[ -0.0284 \cdot \left( \frac{n}{n_N} \right)^3 - 1.151 \cdot \left( \frac{n}{n_N} \right)^2 + 2.6942 \cdot \left( \frac{n}{n_N} \right) - 0.5158 \right], \quad (1)$$

где:  $n$ ,  $n_N$  – текущее и номинальное значение частоты вращения коленчатого вала ДВС соответственно,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $N_{e \max}$  – эффективная мощность на номинальном режиме, кВт;  $k$  – коэффициент использования мощности ДВС.

Коэффициенты выражения (1) получены на основании безразмерной ВСХ – рис. 2б. Диапазон изменений частоты вращения коленчатого вала принят в интервале от  $750 \text{ мин}^{-1}$  до  $1900 \text{ мин}^{-1}$  (номинальной). Расчет эффективного удельного расхода топлива при полных и частичных нагрузках двигателя выполнен с использованием универсальной зависимости, предложенной И.С. Шлиппе [6], которая для дизельного двигателя КамАЗ-740.62-280 принимает вид (2):

$$g_e = f(k, n) = 240 \cdot (1.55 - 1.55 \cdot k + k^2) \cdot \left[ 1.7 - 2.62 \cdot \frac{n}{n_N} + 1.92 \cdot \left( \frac{n}{n_N} \right)^2 \right], \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)} \quad (2)$$

Аналогичные вычисления проведены для двигателей Cummins 6 ISBe 270B, Cummins ISB6.7e4 270B и Cummins ISB6.7e4 250B. Их внешние скоростные характеристики [4] приведены на рис. 2в. Отличительной особенностью этих ДВС является более высокая номинальная частота вращения ( $2100 \text{ мин}^{-1}$ ), а расчетный диапазон от  $850 \text{ мин}^{-1}$  до  $2100 \text{ мин}^{-1}$ .

Рассмотрение уравнения процесса движения автобуса при любых внешних условиях приводит к необходимости введения в него большого числа параметров как собственно автомобиля, так и его двигателя, коробки передач (КП), главной передачи, колес и шин. В общем случае процесс движения автобуса по горизонтальной дороге можно представить в виде уравнения баланса мощности (3):

$$N_K = N_D + N_B + N_I, \quad (3)$$

где  $N_K$  – тяговая мощность автобуса (на ведущих колесах);

$N_D$  – мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления качению;

$N_B$  – мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления воздуха;

$N_I$  – мощность, затрачиваемая на преодоление сил и моментов инерции.

Потребная мощность двигателя  $N_e$  определяется также с учетом дополнительных потерь в трансмиссии. При этом уравнение (3) для горизонтального участка дороги при движении со скоростью  $V$  и продольным ускорением  $j$  в общем случае приобретает вид (4):

$$N_e(V, J) = \frac{1}{\eta_t} \left( V(\psi \cdot m_a \cdot g + W \cdot V^2 + m_a \cdot j) + (J_K \cdot n_k + J_T \cdot U_{ГП}^2 + J_M \cdot U_n^2 \cdot U_{ГП}^2) \frac{j \cdot V}{r_k^2} \right), \quad (4)$$

где  $\psi$  – коэффициент сопротивления качению колес автобуса;

$m_a$  – испытательная масса автобуса;

$W$  – фактор обтекаемости кузова;

$J_K$  – момент инерции колеса;

$n_k$  – количество колес на автобусе;

$J_T$  – момент инерции маховых масс трансмиссии, приведенной к оси карданной передачи;

$J_M$  – момент инерции ДВС;

$U_{ГП}$  – передаточное число главной передачи,

$U_n$  – передаточное число КП при включенной передаче с номером  $n$ ;

$r_k$  – радиус качения ведущего колеса.

Коэффициент полезного действия трансмиссии  $\eta_t$  в проведенных расчетах принят равным 0,913 в соответствии с рекомендацией для двухосных шасси грузовых автомобилей [7].

После группировки констант формулы (4) получаем уравнение баланса мощности (5):

$$N(V, J) = K_V \cdot V + K_{VJ} \cdot V \cdot J + K_{V3} \cdot V^3. \quad (5)$$

В полученном уравнении коэффициенты  $K_V$ ,  $K_{VJ}$ ,  $K_{V3}$  определяются для любой модели автомобиля. В дальнейшем, в сочетании с нагрузочно-скоростными характеристиками двигателя, выражение (5) принято при расчете параметров ездового цикла для рассматриваемых моделей автобусов. Таким образом, уравнение движения автобуса (5) в любом ездовом цикле на дороге предполагает формирование соответствующей целевой функции, которая детально описывает параметры его движения на всех участках этого цикла. Эта целевая функция большого числа аргументов является математической зависимостью (обычно неявной), необходимой для решения задачи оптимизации. В качестве критерия оптимизации могут выступать многие параметры движения, либо силового агрегата. Таковым может быть принят и комплекс из нескольких параметров.

Для проведения расчетов (достаточно многочисленных) режимов движения автобусов в условиях ездовых циклов и оптимизации соответствующих параметров авторами составлены соответствующие компьютерные программы, которые позволяют на основе баланса мощности (5) вычислять удельный расход топлива ДВС на каждом нагрузочно-скоростном режиме, а также расход топлива по участкам цикла и за цикл в целом. Программы составлены на языке программирования TurboC++, их работа на ПЭВМ осуществляется с применением программного обеспечения BorlandC++. Алгоритм этих программ позволяет в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54810-2011 для всех участков циклов определять текущие значения скорости, ускорения, пройденного пути, частоты вращения ДВС, его мощности и удельного расхода топлива. В целом это позволяет имитировать динамику движения автобуса на загородных дорогах.

Для строгого выполнения всех условий движения автобусов классов II и III по ездовым циклам разработанные программы имеют следующие ограничения:

- 1) длина каждого участка должна соответствовать требованиям стандарта; часть участка с ускоренным или замедленным движением может быть либо меньше длины всего участка, либо равной этой длине;
- 2) расчетная скорость в конце каждого участка должна строго соответствовать требованиям стандарта;
- 3) максимальная тяговая мощность  $N_k$  с учетом КПД трансмиссии определена для номинальной мощности двигателя при номинальной частоте вращения;
- 4) частота вращения двигателя автобуса на любом из режимов не должна превышать номинальное значение;
- 5) коэффициент использования мощности двигателя  $k$  на любом из режимов движения должен принадлежать диапазону  $[0 \leq k \leq 1]$ .

Движение автобусов класса II в магистральном ездовом цикле предусматривает изменение его скорости в пределах от 30 до 75 км/ч [3]. Поскольку в процессе движения номера включаемых передач КП каждом из участков цикла стандартом не установлены, то скорости движения, при которых осуществляются переключения (их может быть несколько даже для одного участка) могут существенно отличаться. Кроме того, от участка к участку таких переключений может и не быть. Это характерно именно для магистральных циклов.

При моделировании движения автобусов категории M<sub>3</sub> классов II и III становится возможным разделение отдельных участков ЕЦ на отдельные элементарные участки, движение в пределах которых осуществляется без переключения передач. Определяющими величинами являются параметры зависимости (5). В процессе расчета и оптимизации режимов движения становится возможным устанавливать практически любое число расчетных участков. Приводимые в литературных источниках рекомендации по выбору режимов движения АТС [7] указывают на необходимость обеспечения запаса мощности около 30 %, причем частота вращения двигателя при этом не должна превышать  $0.6n_{\max}$ . Для автобусов большого



класса эти рекомендации практически недостижимы ввиду относительно небольшой энерговооруженности. Это в большей мере проявляется при движении на затяжных подъемах или ускорениях при скорости выше 60 км/ч.

В испытательных магистральных циклах остановки автобусов не предусмотрены, однако для них характерны участки движения с замедлением. Если частота принудительного вращения двигателя при этом превышает установленное значение, в расчетах учитывается переход системы питания ДВС на режим принудительного холостого хода. При моделировании движения автобуса на нейтральной передаче работа двигателя рассматривается в режиме холостого хода, поскольку остановка ДВС опасна с позиции снижения эффективности систем рулевого и тормозного управления. Частота вращения коленчатого вала при этом поддерживается несколько выше минимальной устойчивой. Вследствие этого, в расчетные уравнения движения автобуса вводятся зависимости для расхода топлива на режимах холостого хода. Время переключения передач принято 2 с.

В качестве оптимизируемых величин разработанные программы дополнительно позволяют выделить следующие параметры движения.

1. Минимальное время прохождения автобусом суммарного отрезка пути ездового цикла (4 000 м), что соответствует прохождению цикла с максимально возможной средней скоростью. При таком движении работа двигателя сопряжена с максимальными нагрузками, коэффициент использования мощности достигает единицы ( $k = 1$ ). Второй характерной особенностью такого режима является также возрастание на отдельных участках частоты вращения двигателя до номинальной. Общий расход топлива за цикл в этом случае значителен, ресурс двигателя снижается. Вследствие этих причин такой режим не может быть рекомендован для длительной эксплуатации автобусов.

2. Минимальный средний путевой расход топлива за весь ездовой цикл. Это соответствует прохождению всех фиксированных стандартом отрезков цикла с минимальным расходом топлива по участкам. При движении на таком режиме двигатель работает при  $k = 0,6 \dots 0,8$ , что примерно соответствует минимальному удельному расходу топлива. Водителю в процессе движения поддерживать такой режим затруднительно, однако современные системы управления принципиально позволяют это осуществлять.

Для обоих приведенных вариантов можно рассматривать и сравнительно сложные законы изменения параметров движения в процессе прохождения цикла на дороге. Так, например, можно рассматривать движение на участках разгона автобуса с ограничениями по значениям продольных ускорений, а также с переменными значениями этих ускорений на участках разгона в цикле. Такие исследования в настоящее время ведутся, однако задачи оптимизации в этом случае существенно усложняются.

К другим вариантам следует отнести комплексы режимов, обеспечивающих нахождение экстремального значения «комплексного» параметра. К таковому, в качестве примера, можно отнести и комбинацию их ранее рассмотренных показателей, а именно: пару «средняя скорость – расход топлива» с соответствующими «весовыми» коэффициентами.

## Результаты исследований для автобусов класса II

Исследования режимов движения автобусов НЕФАЗ-5299-11-33 с КП КамАЗ-144, задним мостом Raba с передаточным числом (ПЧ) 4,3, а также с двигателем КамАЗ-740.62-280 мощностью 206 кВт показали, что мощности такой силовой установки недостаточно для движения АТС с полной массой (16 900 кг) со строгим соблюдением отрезков пути магистрального цикла для автобусов II класса (рис. 1). Определено, что все требования цикла в полном объеме обеспечиваются лишь при массе автобуса 14 120 кг. Расчетная максимальная скорость при этом не превышает 80 км/ч. Этого явно недостаточно. Практически такие автобусы могут использоваться только с целью перевозки детей, где скорость ограничена величиной 60 км/ч. Замена КП на этом же автобусе на модель КамАЗ-141 с тем же двигателем и

задним мостом Raba с ПЧ 5.11 дает возможность расширить возможности АТС при работе на пригородных маршрутах – максимальная скорость повышается до 90 км/ч, что соответствует паспортным данным. При такой конфигурации силовой установки обеспечивается выполнение всех требований магистрального цикла для автобусов класса II. Соответствующие результаты расчетов и оптимизации параметров движения в магистральном цикле для этого автобуса приведены на рис. 3а.

Установлено, что оптимизацию целесообразно осуществлять по минимальному путевому расходу топлива. Преимущества такой оптимизации для автобусов категории M<sub>3</sub> класса II проявляются более отчетливо, чем, например, для грузовых автомобилей. Такой вывод следует из сравнения с результатом оптимизации по минимальному времени прохождения цикла, как это следует из графиков (рис. 3а). Уменьшение путевого расхода топлива (при оптимизации именно по этому расходу) весьма существенно и составляет от 9,5 % до 11 % в зависимости от загрузки автобуса. Средняя скорость движения в цикле при этом снижается незначительно – на 2,5-4 %.

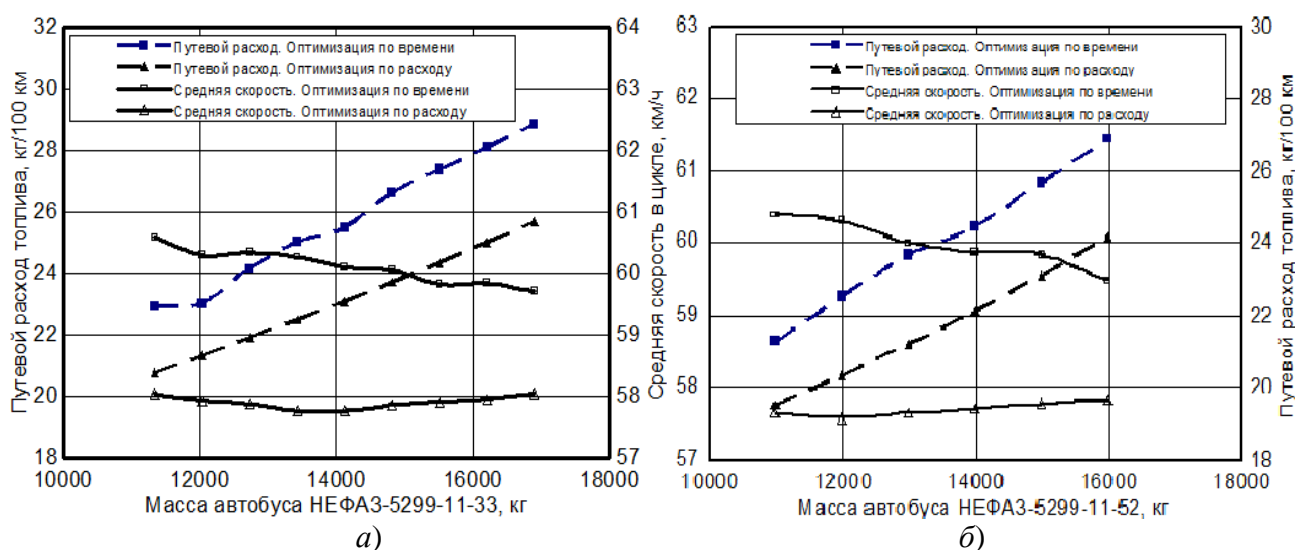


Рис. 3. Путевой расход топлива и средняя скорость автобусов категории M<sub>3</sub> II класса при движении в условиях магистрального ЕЦ:

- а) НЕФАЗ-5299-11-33 с двигателем мощностью 206 кВт;
- б) НЕФАЗ-5299-11-52 с двигателем Cummins ISB6.7e4 250В мощностью 175 кВт

Fig. 3. Driving fuel consumption and average speed of buses category M<sub>3</sub> class II while driving in conditions of a motorway driving cycle:

- a) NEFAZ-5299-11-33 with a 206 kW engine;
- b) NEFAZ-5299-11-52 with a 175 kW Cummins engine ISB6.7e4 250B

Аналогичный комплекс исследований проведен для пригородного автобуса НЕФАЗ-5599-11-52 с КП ZF 6S 1310BO, задним мостом Raba с ПЧ 4.3 и двигателем Cummins ISB6.7e4 250В мощностью 175 кВт. Расчеты показали, что мощности этого двигателя также недостаточно для движения автобуса с полной массой (17 900 кг) в магистральном цикле при соблюдении всех длин отрезков пути. Вычисления позволили установить, что все требования ЕЦ в полном объеме обеспечиваются лишь при массе АТС до 16 000 кг. В то же время следует отметить, что максимальная расчетная скорость автобуса с указанной трансмиссией благодаря использованию 6-й передачи составляет 113 км/ч, что соответствует паспортным данным. На рис. 3б представлены графики изменений путевого расхода топлива и средней скорости прохождения магистрального цикла в зависимости от массы этого автобуса.

Снижение путевого расхода топлива при оптимизации составляет от 8,5-10 % в зависимости от массы автобуса (рис. 3б). Средняя скорость движения в ЕЦ при этом уменьшает-

ся также на 2,5-4,5 %. Расчеты показали, что при применении двигателя *Cummins ISB6.7e4* 270В мощностью 188 кВт становится возможным соблюдение всех требований по динамике в магистральном цикле для автобусов класса II.

### Исследования для автобусов класса III

Первая группа расчетов движения в цикле для автобусов дальнего следования выполнена для режимов движения автобуса НЕФА3-5299-17-33 с КП КамАЗ-141, задним мостом *Raba* с ПЧ 5.117 и двигателем КамАЗ-740.62-280 мощностью 206 кВт. Результаты показали, что такой ДВС не обеспечивает движение автобуса в магистральном цикле для автобусов класса III даже со снаряженной массой 12 720 кг. На данный автобус для выполнения всех требований движения в ЕЦ с полной массой следует устанавливать двигатель с номинальной мощностью не менее 280 кВт, а для движения со снаряженной массой – не менее 221 кВт.

Таким образом, установлено, что современные междугородные автобусы большого класса НЕФА3-5299 обладают еще меньшей энерговооруженностью, чем пригородные, с точки зрения обеспечения движения их в магистральном цикле. Так, например, расчетная максимальная скорость автобуса НЕФА3-5299-17-33 с вышеприведенной трансмиссией составляет 91 км/ч, что соответствует паспортным данным, но явно недостаточно для уверенного выполнения разгонов в цикле до скорости 90 км/ч и длительного движения с этой скоростью. Сходные результаты получены при исследованиях движения автобусов НЕФА3-5299-37-52, оснащенных КП ZF 6S 1310BO, задним мостом *Raba* с ПЧ 4.3 и двигателем *Cummins ISB6.7e4* 250В мощностью 175 кВт. Для этой модели с полной массой 17 900 кг с целью обеспечения строгого выполнения ездового магистрального цикла требуемая номинальная мощность двигателя должна быть не менее 308 кВт. Достоинством данного силового агрегата является возможность движения автобуса с расчетной максимальной скоростью 113 км/ч.

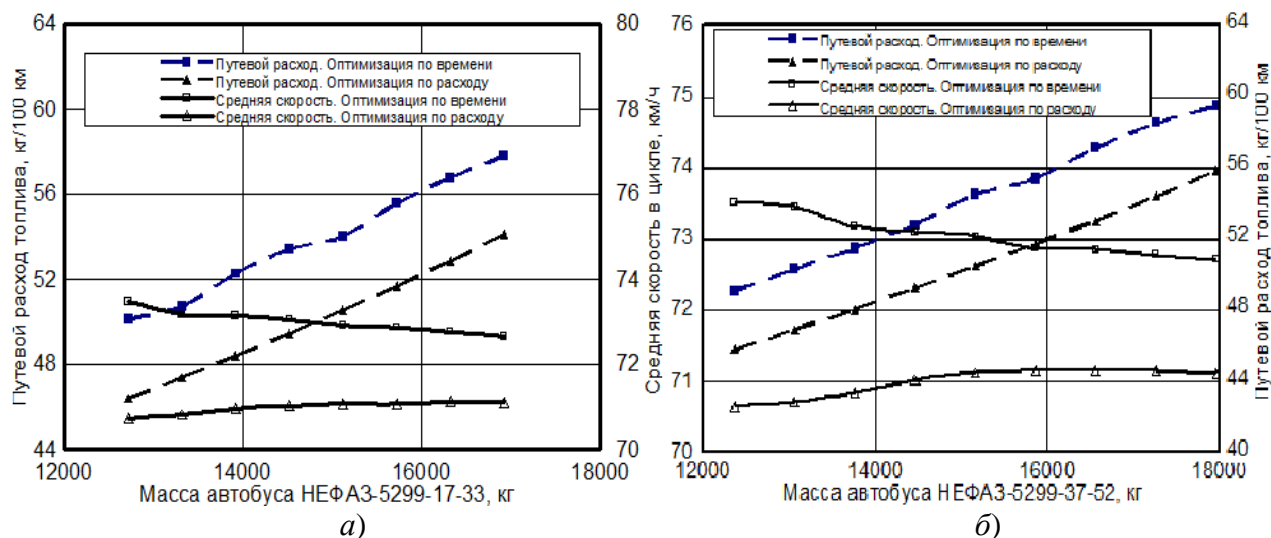
Полученные результаты приводят к необходимости рассмотреть два пути в оценке топливной экономичности автобусов категории М<sub>3</sub> класса III.

Первый путь предусматривает аналитическое вычисление минимального значения номинальной мощности ДВС, соответственно – выбор его трансмиссии, обеспечивающих строгое выполнение всех требований движения в стандартизованном магистральном цикле. Такая операция выполняется сравнительно простым путем, но полученный результат (требуемая номинальная мощность двигателя) может оказаться завышенным. Этот подход и позволил установить вышеуказанные мощности двигателей (280 кВт и 308 кВт) для исследуемых моделей автобусов.

Второй путь – метод модификации магистрального цикла на дороге для автобусов исследуемого класса. «Модифицированный магистральный цикл для автобусов» может быть предложен и для оценки топливной экономичности автобусов класса III. Для реализации такого цикла предлагается увеличить суммарную длину кинематически подобного магистрального цикла до 8 000 м. При этом остальные условия движения остаются неизменными, поскольку основные требования стандарта не нарушены. Это позволяет выполнить количественную оценку и провести сравнительный анализ параметров движения различных моделей автобусов. Операционная карта движения незначительно видоизменяется – длины отрезков пути удваиваются. На рис. 3.6 представлены графические зависимости путевого расхода топлива и средней скорости прохождения «модифицированного магистрального цикла для автобусов» в зависимости от массы автобуса НЕФА3-5299-17-33. Расчеты показали, что мощности двигателя и в этом случае недостаточно для движения с соблюдением всех параметров движения, она должна быть увеличена до 216 кВт.

Снижение путевого расхода топлива при оптимизации по этому расходу в таком цикле меньше, чем для пригородных моделей автобусов и составляет 6,5-7 %, а средняя скорость движения снижается при этом на 2-3,5 %. Для такого ездового цикла проявляется влияние

значительных (по своим длинам) участков движения с постоянными скоростями, что характерно для загородных дорог.



**Рис. 4. Путевой расход топлива и средняя скорость автобусов класса III при движении в модифицированном магистральном ездовом цикле:**  
 а) НЕФА3-5299-17-33 с двигателем мощностью 216 кВт;  
 б) НЕФА3-5299-37-52 с двигателем Cummins ISB6.7e4 250В мощностью 234 кВт

**Fig. 4. Driving fuel consumption and average speed of buses class III while driving in conditions of a modified motorway driving cycle:**  
 а) NEFAZ-5299-17-33 with a 216 kW engine;  
 б) NEFAZ-5299-37-52 with a 234 kW Cummins engine ISB6.7e4 250B

Аналогичные результаты получены для наиболее современного автобуса дальнего следования НЕФА3-5299-37-52. Его полная масса составляет 17 900 кг, что на 1 000 кг больше, чем у предыдущей модели. Поэтому расчетная требуемая мощность двигателя для этого автобуса выше и составляет уже 234 кВт. Результаты приведены на рис. 4б. Уменьшение путевого расхода топлива при оптимизации по путевому расходу в таком модифицированном магистральном цикле лежит в пределах 6-6,5 %, а средняя скорость движения в ЕЦ при этом снижается на 2-3,5 %.

### Выводы

1. Прогресс в развитии конструкций рассмотренных моделей автобусов ПАО «НЕФА3» позволяет констатировать, что в настоящее время существует возможность снизить их расход топлива в условиях магистрального ездового цикла в соответствии с ГОСТ Р 54810-2011. При этом существенный интерес представляет повышение энерговооруженности АТС, определяемой мощностью двигателя. Соответствующая оптимизация процессов движения нескольких вариантов комплектации автобусов классов II и III позволила выработать рекомендации для рационализации режимов их движения.

2. Определено, что пригородные автобусы модели НЕФА3-5299-11-33, оснащенные двигателями КамАЗ-740.62-280 и КП модели КамАЗ-144 не обеспечивают выполнение требований магистрального цикла для автобусов класса II категории М<sub>3</sub>. Их максимальная скорость движения составляет 80 км/ч. Автобусы НЕФА3-5299-11-33 с тем же двигателем и КП обеспечивают строгое выполнение требований магистрального цикла для автобусов класса III категории М<sub>3</sub> при массе до 16 000 кг. Междугородные автобусы НЕФА3-5299-17-33 и НЕФА3-5299-37-52 также не обеспечивают выполнение требований магистрального цикла

для автобусов класса III категории М3. Вследствие этого для сравнений параметров обосновано применение «модифицированного» магистрального цикла для автобусов класса III категории М3, составлена соответствующая карта параметров их движения по участкам такого цикла.

3. Подтвержден принцип оптимизации параметров движения в магистральных циклах для автобусов по минимальному путевому расходу топлива, в соответствии с которым для исследуемых моделей пригородных автобусов возможность уменьшения путевого расхода топлива составляет 8-10 % в сравнении с оптимизацией по средней скорости ездового цикла, а для междугородных автобусов – соответственно 6-7 %, что объясняется большей осредненной нагрузкой их двигателей в сравнении с двигателями пригородных автобусов.

4. Результаты работы могут быть применены в процессе рационального комплектования перспективных силовых агрегатов современных пригородных и междугородных автобусов большого класса, а также при конструировании и настройке трансмиссий с автоматическим управлением.

### Библиографический список

- 1 **Ларин, О.Н.** Организация пассажирских перевозок: учебное пособие / О.Н. Ларин. – Челябинск: Изд-во Южно-уральского государственного университета, 2005. – 104 с.
- 2 Российский рынок автобусов 2019. Первая дюжина / Режим доступа: <https://st-kt.ru/articles/rossiiskii-rynok-avtobusov-2019-pervaya-dyuzhina/>, свободный. – (дата обращения: 18.02.2020).
- 3 ГОСТ Р 54810-2011. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. – М.: Стандартиформ, 2012. – 23 с.
- 4 Грузовые автомобили и автобусы КАМАЗ / Режим доступа: [https://kamaz.ru/upload/printed\\_catalogs/new/katalog-kamaz-gruzovye-avtomobili-i-avtobusy-na-russkom-yazyke-2019.pdf](https://kamaz.ru/upload/printed_catalogs/new/katalog-kamaz-gruzovye-avtomobili-i-avtobusy-na-russkom-yazyke-2019.pdf) - (дата обращения: 18.12.2020).
- 5 **Горожанкин, С.А.** Оптимизация режимов работы силового агрегата автомобиля в городском цикле / С.А. Горожанкин, Н.В. Савенков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. - Донецк 2019, №1. – С.73-78.
- 6 **Горожанкин, С.А.** Расчет тягово-скоростных и топливно-экономических свойств автомобилей в современных эксплуатационных условиях / С.А. Горожанкин, А.Д. Бумага, Н.В. Савенков. – Макеевка, 2019. -245 с.
- 7 **Бортницкий, И.П.** Тягово-скоростные качества автомобилей / И.П. Бортницкий, В.И. Задорожный. – Киев: Вища школа, 1978. – 176 с.

**Дата поступления  
в редакцию: 29.05.2021**