УДК 629.083
DOI 10.23968/1999-5571-2026-23-4-138-149

© *В. О. Австрийский*, аспирант
© *И. М. Блянкинштейн*, проф., д-р техн. наук
© *Е. С. Трофимов*, аспирант
© *С. А. Воробьев*, доцент., канд. техн. наук
© *В. В. Белогрудов*, студент
(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: vsevolodavstrysky@yandex.ru, blyankinshtein@mail.ru, e001st178@yandex.ru, svorobev@list.ru, viktor.belogrudov60@gmail.com

© *V. O. Avstriisky*, post-graduate student
© *I. M. Blyakinstein*, Dr. Sci. Tech., Professor
© *E. S. Trofimov*, post-graduate student
© *S. A. Vorobyov*, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© *V. V. Belogrudov*, student
(Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)
E-mail: vsevolodavstrysky@yandex.ru, blyankinshtein@mail.ru, e001st178@yandex.ru, svorobev@list.ru, viktor.belogrudov60@gmail.com

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМНЫХ ФАКТОРОВ НА РАСХОД ТОПЛИВА АВТОБУСА В ГОРОДСКОМ ЦИКЛЕ

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF REGIME FACTORS ON BUS FUEL CONSUMPTION IN THE URBAN CYCLE

Представлены результаты экспериментального исследования влияния режимных факторов на расход топлива городского автобуса в реальных условиях мегаполиса. Методами корреляционно-регрессионного анализа выявлены факторы, наиболее тесно связанные с расходом топлива, и построены линейные, квадратичные модели, а также модели с парными эффектами. Сделан вывод о необходимости перехода к динамическим моделям для полного учета переходных процессов.

Ключевые слова: режимные факторы, расход топлива, городской автобус, корреляционно-регрессионный анализ, онлайн-мониторинг, нормирование расхода топлива.

The article presents the results of an experimental study of the influence of regime factors on the fuel consumption of city buses in real conditions of the megalopolis. Using correlation and regression analysis methods, the factors most closely related to fuel consumption have been identified, and linear, quadratic, and pair-effect models have been constructed It is concluded that it is necessary to switch to dynamic models for full consideration of transients.

Keywords: regime factors, fuel consumption, city bus, correlation and regression analysis, online monitoring, fuel consumption rationing.

Введение

В условиях современной российской экономики вопросы повышения эффективности и снижения издержек предприятий автомобильного транспорта выходят на первый план. Одним из ключевых элементов операционных расходов является стоимость горюче-смазочных материалов (ГСМ), доля которой в структуре себестоимости перевозок может достигать 30–40 %. В этой связи система нормирования расхода топлива играет очень важную роль, выступая не только инструментом планирования затрат, но и основой для контроля рационального использования ресурсов.

Действующей в России методологией нормирования, регламентированной распо-

ряжением Минтранса № АМ-23-р, устанавливаются *базовые* нормы расхода топлива для каждой модели транспортных средств, *транспортные* (в зависимости от применяемого ДВС типа топлива) и *эксплуатационные* нормы расхода топлива для конкретных условий эксплуатации, которые формируются с использованием системы поправочных коэффициентов. В целом данная методология достаточно широко охватывает весь круг условий эксплуатации и устанавливает предельные значения расхода моторного топлива, которые однако не в полной мере учитывают режимы движения на конкретном маршруте в конкретной поездке. Учет влияния режимных факторов позволит обосновать более совершенные, прогрессивные эксплуатационные нормы.

Вопросам оценки влияния эксплуатационных факторов на расход моторного топлива и разработки методов и методик его нормирования посвящены многочисленные работы [1–13].

В исследованиях [1–5] разработана математическая модель расхода компримированного газа, главными факторами которой являются время прохождения перегона между остановками ($t_{\text{инт}_i}$) и средний угол открытия дроссельной заслонки ($\overline{TPS_i}$):

$$Q_i = -0{,}197133 + 0{,}002649 \cdot t_{\text{инт}_i} + 0{,}1642 \cdot \overline{TPS_i}. \quad (1)$$

Создана методика нормирования — индивидуальная маршрутная норма расхода газа определяется суммированием расходов на всех перегонах маршрута, рассчитанных по формуле (1), в которую подставляются реальные параметры движения.

В работах [6–9] рассматривается более широкий перечень из 12 факторов, объединенных в пять групп: скоростные (средняя скорость, число остановок, число крутых поворотов), нагрузочные (число пассажиров, объем перевозок), природно-климатические (температура, осадки), возрастные (пробег, возраст автобуса), факторы графика работы (суточный пробег, тип дня, сменность). Разработаны математические модели для каждой из трех моделей автобусов, получены многофакторные линейные регрессионные уравнения. Например, для автобуса ЛиАЗ-529222 математическая модель эксплуатационного расхода топлива имеет следующий вид:

$$Q_э = 37{,}44 + 0{,}0051(V_с - 44{,}83)^2 + 2{,}52n_{ос} + 1{,}57n_{по} + 0{,}067N_{пасс} + 0{,}16p_{пасс} + 0{,}0016(T - 13{,}33)^2 + 0{,}26h_с - 0{,}036h_д + 0{,}0045L_{об} + 0{,}4В - 0{,}031L_с + 0{,}36Д, \quad (2)$$

где $V_с$ — средняя скорость сообщения на маршруте; $n_{ос}$ — удельное число технологических остановок на маршруте; $n_{по}$ — удельное число крутых поворотов на км; $N_{пасс}$ — среднее число пассажиров в салоне автобуса; $p_{пасс}$ — удельный объем перевозок на маршруте; T — средняя температура окружающего воздуха; $h_с$ — количество снеговых осадков; $h_д$ — количество дождевых осадков; $L_{об}$ — общий пробег с начала эксплуатации; В — возраст автобуса; $L_с$ — суточный пробег; Д — тип дня недели. Коэффициент детерминации в модели (2) $R^2 \approx 0{,}55…0{,}58$, погрешность прогноза за месяц — в пределах 5 %. На основе данной модели осуществляется нормирование расхода моторного топлива городских автобусов.

В одной из последних диссертационных работ (2026 г.) [10] изучается влияние погодных условий на расход газового топлива у городских автобусов. Автором был усовершенствован метод определения расхода по остаточному давлению. Традиционно температура газа в баллонах принималась равной температуре окружающего воздуха, что вносило ошибку. Автор теоретически и экспериментально доказал, что разница температур баллонов и воздуха ΔT зависит только от времени суток (суточный цикл) и незначительно меняется по сезонам. Выявлены значимые погодные факторы: температура воздуха, атмосферное давление и относительная влажность. Проведены инструментальные замеры на маршруте № 748 в Москве в разных сезонах и получены зависимости: коэф-

фициент корреляции расхода КПГ с температурой $R = -0{,}82$; с атмосферным давлением $R = 0{,}58$; с влажностью $R = 0{,}64$. Наибольшая связь в случае воздействия всех трех факторов одновременно — $R = 0{,}88$. Эти и другие работы [11–16] показывают актуальность проблемы нормирования расхода моторного топлива на автомобильном транспорте.

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных нормированию расхода топлива городских автобусов, следует отметить, что режимные факторы — параметры, характеризующие временную структуру движения (длительность и интенсивность разгонов и замедлений, распределение времени работы на неустановившихся режимах, доля движения накатом и пр.), — остаются недостаточно глубоко исследованными в контексте их прямого влияния на топливную экономичность.

С одной стороны, применение статических регрессионных моделей и усредняющих коэффициентов существенно упрощает процедуру корректировки маршрутных норм расхода топлива. Это позволяет автотранспортным предприятиям оперативно пересчитывать нормативы при изменении одного-двух интегральных показателей без необходимости сбора и обработки детальных временных рядов параметров движения. Однако, с другой стороны, такое упрощение неизбежно приводит к потере значительного объема полезной информации о реальном характере движения автобуса на маршруте. Различные комбинации элементарных режимов (разгон–установившееся движение–торможение–накат) могут давать одинаковые усредненные показатели (например, одну и ту же среднюю скорость или одно и то же число остановок на километр), но при этом приводить к разному фактическому расходу топлива из-за различий в интенсивности разгонов, длительности торможений двигателем, частоты переключения передач и других стохастических параметров.

Особенно остро эта проблема проявляется в условиях крупных мегаполисов, где транспортный поток характеризуется высокой вариабельностью и частыми нештатными ситуациями (заторы, смещение расписания, изменение дорожных условий по часам суток). В этих условиях даже для одного маршрута и одного типа автобуса режимные факторы могут изменяться в широких пределах, что делает использование статичных моделей с фиксированными усредняющими коэффициентами методологически несостоятельным для получения достоверных эксплуатационных норм.

Таким образом, в перспективе существует объективная необходимость в переходе к построению динамических моделей учета режимных факторов, основанных на регистрации и анализе непрерывных временных рядов параметров движения (мгновенная скорость, ускорения, крутящий момент двигателя и пр.) с последующим их прямым включением в модели нормирования расхода топлива. Это позволит, с одной стороны, сохранить информацию о реальной режимной нестационарности, а с другой — повысить точность и обоснованность индивидуальных маршрутных нормативов. Но чтобы построить динамические модели, необходимо статистически с использованием корреляционно-регрессионного анализа проанализировать влияние режимных факторов на расход топлива. А затем, определив наиболее значимые факторы, использовать для построения динамических моделей.

Поэтому была поставлена задача — проанализировать влияние режимных факторов работы силовой установки автобусов, работающих на городском маршруте в условиях мегаполиса, на формирование показателей топливной экономичности и получить количественные оценки их влияния на эксплуатационный расход топлива.

Методы и материалы

Поставленная задача решается путем планирования, организации и проведения на-

турного эксперимента. В качестве теоретического аппарата используются методы математического планирования эксперимента, статистической обработки и корреляционно-регрессионного анализа.

Объект исследования: автобус ЛиАЗ-529265 CITYMAX 12 (двигатель Weichai WP7 300E51, «Евро-5»), тип топлива — дизельное топливо, общий пробег автобуса на момент испытаний составлял 92 610,23 км.

Условия эксперимента: городской маршрут № 11 «Станция „Предпортовая“ — Музей истории Обуховского завода» (Санкт-Петербург). Его ключевые параметры: протяженность — 13,97 км; средняя эксплуатационная скорость — 25 км/ч; характер — городской, с интенсивным движением и регулярными остановками (рис. 1).

Время проведения первого испытания: 13 июня, 7:46, день недели четверг; второго испытания: 15 июня, 7:46, день недели суббота.

Применяемое оборудование: диагностический комплекс ДК-5, программный комплекс EDCDiags, портативный компьютер.

Элементы математического планирования эксперимента, а также регистрируемые

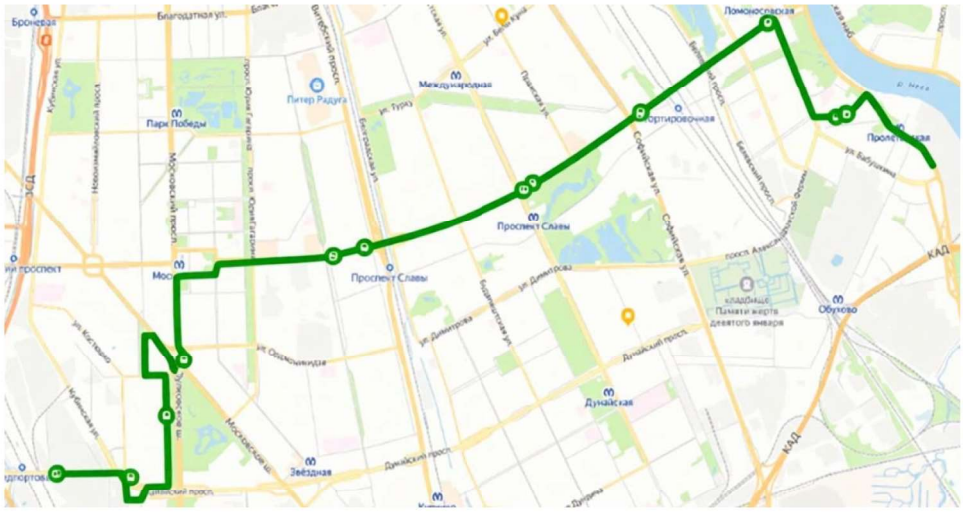


Рис. 1. Маршрут № 11 «Станция „Предпортовая“ — Музей истории Обуховского завода»

Таблица 1

Регистрируемые режимные факторы и диапазоны их измерения

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Диапазон варьирования	Единицы измерения
1	Частота вращения коленвала (КВ)	n_e	650–2500	об./мин
2	Скорость автомобиля	V_a	0–70	км/ч
3	Положение педали акселератора	φ	0–100	%
4	Нагрузка при данной скорости	N	0–100	%
5	Крутящий момент двигателя	M_e	0–100	%
6	Расход воздуха двигателем	$Q_в$	1–1000	кг/ч
7	Масса пассажиров	$M_{гр}$	0–5000	кг
8	Пройденный путь	L	0–100	км
9	Время движения	t	0–5000	с
10	Мгновенный расход топлива	$Q_т$	0–70	л/ч

параметры (режимные факторы), диапазоны их изменения в кратком формате приведены в табл. 1.

Их выбор обусловлен, во-первых, необходимостью построения многофакторной модели расхода топлива, полноценно описывающей поведение сложной динамической системы «автобус–двигатель–трансмиссия–среда» в условиях реальной эксплуатации, а во-вторых, возможностями диагностического комплекса ДК-5. С целью объективной оценки влияния приведенных в табл. 1 факторов 1–7 на расход топлива на первом этапе было принято решение рассматривать их корреляцию с функцией отклика $Q_т$ в составе трех групп факторов: 1-я группа — факторы 1–7 в линейном виде; 2-я группа — факторы 1–7 во второй степени; 3-я группа — парные эффекты факторов 1–7. А на втором этапе незначимые факторы удалить, а все значимые факторы объединить в одном регрессионном уравнении.

Точность измерения параметров обусловлена возможностями применяемого оборудования (ДК-5 и EDCDiags).

Форма получаемых результатов и предварительная обработка. Программный комплекс EDCDiags записывает параметры в формате XLSX, в итоге данные имеют вид, представленный в табл. 2.

Для визуализации картины формирования и оценки взаимосвязи регистрируемых режимных параметров по полученным данным были построены диаграммы за интервал движения 60 с, которые иллюстрируют синхронную запись режимных параметров работы силовой установки автобуса и характерные тенденции их взаимосвязанности, а также наглядно показывают явную зависимость расхода топлива от некоторых из них (рис. 2).

На графике частоты вращения коленчатого вала двигателя можно увидеть гребенку — форму линии, отражающую изменение во время разгона частоты вращения КВ двигателя, на графике скорости можно увидеть уступы в тех же временных метках, это указывает на то, что именно в этих временных точках происходило переключение передач в АКПП автобуса. Если сравнить визуально графики положения педали акселератора и расхода топлива, то можно увидеть тесную зависимость между ними.

Для дальнейшей обработки данных использовалось программное обеспечение Microsoft Excel. Собранные параметры движения автобуса за каждый перегон маршрута (от остановки до остановки) усреднялись по каждому параметру и формировались в виде строк таким образом, что часть данных при скорости автобуса, равной нулю, исключалась из расчета с целью снижения влияния режима холостого хода на результаты. Пример формирования данных представлен

Таблица 2

Фрагмент данных, записанных в процессе исследования

Время, с	Частота вращения КВ двигателя, об./мин	Скорость автомобиля, км/ч	Положение педали акселератора, %	Нагрузка при данной скорости, %	Фактический крутящий момент двигателя, %	Расход воздуха двигателем, кг/ч	Масса пассажиров, кг	Расход топлива, л/ч
0,203	698	0	0	28	14	181,1	300	2,9
0,64	699,5	0	0	27	14	181,2	300	2,9
1,078	701	0	0	27	14	181,7	300	2,85
1,515	701	0	0	27	13	181,4	300	2,9
1,703	700,5	0	0	27	13	181,4	300	2,9
2,14	701,5	0	0	27	14	181,4	300	2,85
2,578	701	0	0	27	13	181,3	300	2,85
3,015	700,5	0	0	27	14	181,4	300	2,9

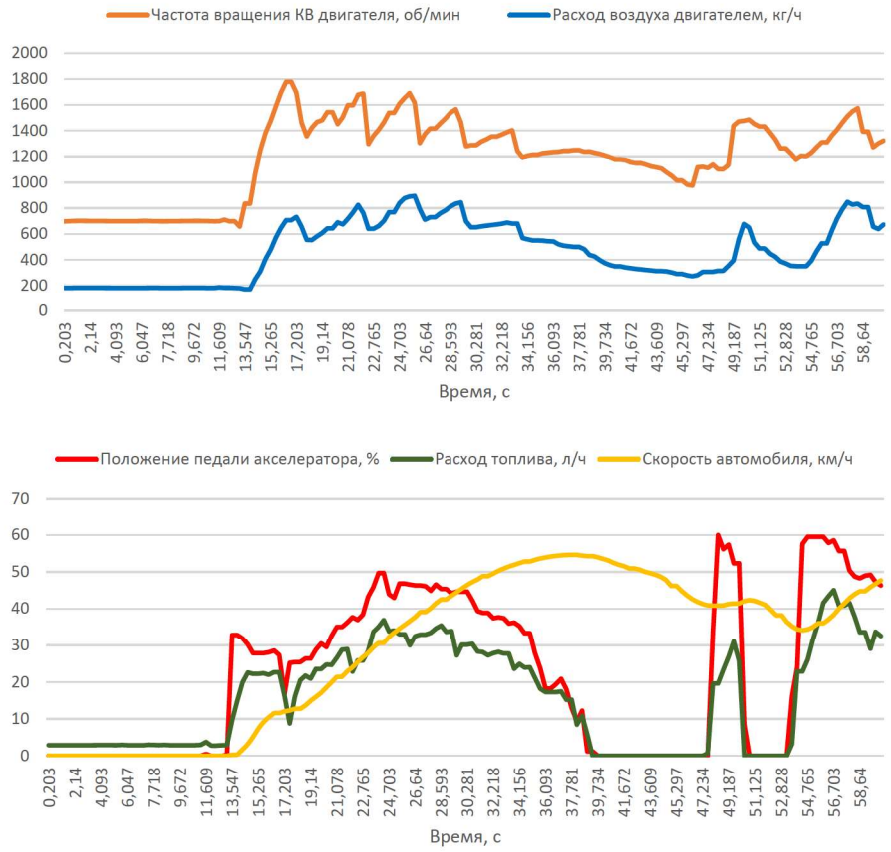


Рис. 2. Графики изменения параметров во времени за первый перегон

на рис. 3 — часть пути от остановки «Станция „Предпортовая“» до автобусной станции «Музей истории Обуховского завода». В большинстве случаев один перегон равен одному перемещению от одной автобусной остановки до другой либо до вынужденной остановки у светофора.

Результаты

В качестве первичного этапа обработки экспериментальных данных был проведен

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1		Частота вращения КВ двигателя, об/мин	Скорость автомобиля, км/ч	Положение педали акселератора, %	Нагрузка при данной скорости, %	Фактический крутящий момент двигателя, %	Расход воздуха двигателем, кг/ч	Масса пассажиров, кг	Пройденный путь, км	Время, с	Расход топлива, л/ч
3	перегон 2	1331.684615	38.42815385	47.92615385	51.20769231	47.87692308	555.6338462	300	0.515374916	48.281	19.80153846
4	перегон 3	1250.75942	39.40486957	32.0915942	37.32173913	35.46086957	494.5715942	300	1.414580088	129.235	14.79565217
5	перегон 4	1102.813636	19.00445455	21.09818182	32.74545455	26.13636364	407.0563636	300	0.216851384	41.078	10.28409091
6	перегон 5	1140.996154	25.16969231	27.25230769	37.31538462	31.11538462	433.0423077	375	0.337343793	48.25	13.61692308
7	перегон 6	1228.893204	30.84893204	30.29126214	35.87378641	31.76699029	474.5213592	375	0.327101509	38.172	13.74514563
8	перегон 7	1261.973684	26.56809211	33.58684211	40.16447368	34.33552632	495.7434211	375	0.41812273	56.656	15.59210526
9	перегон 8	1204.066591	25.4627991	30.50564334	38.61851016	32.39277652	469.8841986	375	1.35204634	191.156	14.44480813
10	перегон 9	1226.418981	32.48356481	28.60740741	36.23148148	31.76388889	463.9953704	450	0.728624405	80.75	13.19421296
11	перегон 10	1071.091216	13.37898649	18.95675676	33.36486486	23.62162162	367.0337838	675	0.273210053	73.515	9.771621622
12	перегон 11	1234.721354	26.25432292	31.89166667	40.171875	35.41666667	490.8963542	1050	0.629119213	86.265	15.89739583
13	перегон 12	1193.792818	21.6361326	33.58453039	41.28729282	34.56906077	464.6530387	975	0.583724827	97.125	15.73977901
14	перегон 13	1224.944444	34.06303419	27.99487179	34.53846154	30.19230769	464.584188	1125	1.205074454	127.36	13.22970085
15	перегон 14.1	1330.547445	46.30649635	40.33868613	47.43065693	43.75182482	529.529927	1425	0.657217812	51.094	18.72737226
16	перегон 14.2	1049.104396	37.26307692	9.41978022	19.97802198	15.89010989	336.9164835	1425	0.349662223	33.781	5.124725275
17	перегон 15	1100.00565	29.31118644	20.79322034	27.46892655	23.83050847	392.8502825	1800	0.538389501	66.125	9.661299435
18	перегон 16	1154.07716	24.44811728	20.38148148	33.36419753	27.05555556	399.392284	2025	0.864492218	127.297	10.05462963
19	перегон 17	1160.012605	26.8647479	23.24369748	32.4789916	27.32773109	413.7865546	2025	0.753474092	100.969	10.87394958
20	перегон 18	1109.80988	24.92844311	20.20239521	30.10479042	24.7005988	387.0811377	2175	0.985455979	142.313	9.572005988

Рис. 3. Усреднение снимаемых показателей

корреляционный анализ факторов между собой, а также с целевой функцией — фактическим мгновенным (л/ч) расходом топлива на маршруте. Рассчитанные коэффициенты парной корреляции Пирсона приведены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что высокая корреляция с мгновенным часовым расходом топлива $Q_т$ наблюдается у следующих факторов: положение педали акселератора φ (0,991); нагрузка при данной скорости N (0,923); фактический крутящий момент двигателя M_e (0,980) и расход воздуха двигателем $Q_в$ (0,942). Также можно констатировать высокую корреляцию между самими названными факторами, что свидетельствует о так называемой мультиколлинеарности.

Далее были построены однофакторные регрессионные модели, описывающие зависимость мгновенного часового расхода топлива (л/ч) от набора независимых переменных — режимных и нагрузочных факторов, фиксируемых в ходе эксперимента. В качестве зависимой переменной (функции отклика) использовался мгновенный часовой расход, что более точно отражает интенсивность потребления топлива в динамике, особенно на неустановившихся режимах работы силовой установки, характерных для городских перевозок пассажиров.

Анализ результатов в линейной модели. Для каждого параметра индивидуально была построена линейная регрессия и рассчитаны коэффициенты детерминации R^2 (табл. 4).

В качестве критерия выбора параметров для дальнейшего многофакторного анализа было принято пороговое значение коэффициента детерминации R^2: если его значение у параметра ≥ 0,85, то данный параметр включается в анализ, если $R^2 < 0,85$, то параметр исключается из дальнейшего анализа. Затем на основе этих параметров была построена многофакторная линейная регрессия, имеющая вид:

$$Q_т = -4,072 + 0,012Q_в + 0,01M_e + \\ + 0,123N + 0,246φ; \quad (3)$$
$$R^2 = 0,99172.$$

В отличие от однофакторных зависимостей, многофакторная модель позволяет одновременно учитывать влияние нескольких параметров на результирующий показатель и оценивать их совместный вклад в функцию отклика $Q_т$.

Далее с использованием критерия Стьюдента проводилась оценка статистической значимости коэффициентов регрессии путем сравнения величины коэффициента с его стандартной ошибкой. Если при заданном уровне доверительной вероятности β = 0,95

Таблица 3

Матрица парных корреляций исследуемых факторов

	n_e	$V_а$	φ	N	M_e	$Q_в$	$M_{гр}$	L	t	Q
n_e	1									
$V_а$	0,7112	1								
φ	0,7757	0,6002	1							
N	0,562	0,329	**0,893**	1						
M_e	0,7204	0,5285	**0,965**	**0,964**	1					
$Q_в$	**0,914**	0,6834	**0,951**	0,7756	0,9017	1				
$M_{гр}$	0,3183	0,3568	0,1113	0,0278	0,1378	0,2292	1			
L	0,3244	0,4259	0,2285	0,0903	0,1819	0,2854	0,1859	1		
t	–0,102	–0,144	–0,115	–0,076	–0,11	–0,124	–0,008	0,8068	1	
$Q_т$	0,7574	0,5625	**0,991**	**0,923**	**0,98**	**0,942**	0,1134	0,2181	–0,102	1

Таблица 4

Коэффициенты детерминации факторов, влияющих на расход топлива

n_e	V_a	φ	N	M_e	$Q_в$	$M_{гр}$
0,574	0,316	**0,982**	**0,852**	**0,960**	**0,887**	0,013

и в числе степеней свободы стандартная ошибка коэффициента регрессии не превышает половины величины коэффициента, то коэффициент значим, если превышает, то коэффициент статистически незначим, следовательно, этот фактор можно удалить из уравнения без потери его качества и в дальнейшем не рассматривать. По результатам этой проверки из уравнения (3) был удален фактор M_e и уравнение получило вид:

$$Q_т = -4{,}233 + 0{,}013Q_в + 0{,}13N + 0{,}247\varphi; \quad (4)$$
$$R^2 = 0{,}99171.$$

Анализ результатов в модели второго порядка. Коэффициенты детерминации линейных регрессий квадратичных факторов, влияющих на расход топлива, приведены в табл. 5.

После отбора параметров с $R^2 \geq 0{,}85$ было получено регрессионное уравнение со статистически значимыми факторами:

$$Q_т = -2{,}265 + 0{,}00006Q^2_в - 0{,}006M^2_e + 0{,}006N^2 + 0{,}00132\varphi^2; \quad (5)$$
$$R^2 = 0{,}97568.$$

Анализ результатов в модели с парными эффектами. Рассчитанные коэффициенты детерминации парных эффектов приведены в табл. 6.

Выбрав в табл. 6 параметры с коэффициентом детерминации выше $R^2 \geq 0{,}85$, получили многофакторную регрессию с парными эффектами:

Таблица 5

Коэффициенты детерминации линейных регрессий квадратичных факторов, влияющих на расход топлива

n_e^2	V_a^2	φ^2	N^2	M_e^2	$Q_в^2$
0,601	0,340	**0,910**	**0,852**	**0,896**	**0,912**

Таблица 6

Коэффициенты детерминации линейных регрессий парных факторов, влияющих на расход топлива

n_eV_a	$n_e\varphi$	n_eN	n_eM_e	$n_eQ_в$	$n_eM_{гр}$
0,427	**0,971**	**0,932**	**0,958**	0,839	0,034
	$V_a\varphi$	V_aN	V_aM_e	$V_aQ_в$	$V_aM_{гр}$
	0,856	0,822	0,823	0,621	0,085
		φN	φM_e	$\varphi Q_в$	$\varphi M_{гр}$
		0,929	**0,917**	**0,960**	0,315
			NM_e	$NQ_в$	$NM_{гр}$
			0,892	**0,959**	0,199
				$M_eQ_в$	$M_eM_{гр}$
				0,954	0,252
					$Q_вM_{гр}$
					0,093

$$Q_т = 1{,}8619 + 0{,}00085V_a\varphi + 0{,}00085NQ_в + 0{,}0006\varphi Q_в - 0{,}025\varphi M_e + 0{,}0196\varphi N + 0{,}00036n_eM_e - 0{,}00043n_eN - 0{,}00012n_e\varphi; \quad (6)$$
$$R^2 = 0{,}99170.$$

С учетом процедуры оценки значимости коэффициентов полученной регрессии (6) в уравнение (7) допущены факторы φM_e, φN, n_eM_e, n_eN:

$$Q_т = 2{,}8957 - 0{,}0291\varphi M_e + 0{,}02976\varphi N + 0{,}00076n_eM_e - 0{,}00052n_eN; \quad (7)$$
$$R^2 = 0{,}98492.$$

Комплексное уравнение со значимыми факторами из всех трех групп (линейные, квадратичные и парные):

$$Q_т = 3{,}78389 - 0{,}03797\varphi M_e + 0{,}02482\varphi N + 0{,}00021n_eM_e - 0{,}0004n_eN + 0{,}00007Q^2_в + 0{,}01241M^2_e - 0{,}00433N^2 + 0{,}00445\varphi^2 - 0{,}02947Q_в + 0{,}30354N + 0{,}21181\varphi; \quad (8)$$
$$R^2 = 0{,}99495.$$

После удаления незначимых факторов уравнение (8) имеет вид:

$$Q_т = -5{,}89282 - 0{,}0372\varphi M_e + 0{,}00569\varphi N - 0{,}00031n_eN + 0{,}00006Q^2_в - 0{,}00132M^2_e + 0{,}50209N; \quad (9)$$
$$R^2 = 0{,}99029.$$

Критерием отнесения фактора к несущественным служит условие, при котором отношение наклона к стандартной ошибке равно двум по модулю или менее.

В уравнении (9) существенными оказываются не все факторы, поэтому, удалив несущественные, окончательно имеем следующее уравнение:

$$Q_т = -7{,}18626 - 0{,}00037 n_e N + 0{,}00007 Q^2_в + 0{,}6106 N; \quad (10)$$
$$R^2 = 0{,}98674.$$

Обсуждение

Как следует из проведенного анализа, из рассмотренных семи режимных факторов, представленных в линейной интерпретации, семи их квадратичных предикторов и 42 парных эффектов от линейных факторов в итоговое уравнение (10) вошли три параметра:

N — нагрузка при данной скорости;

$Q^2_в$ — квадрат расхода воздуха;

$n_e N$ — произведение частоты вращения КВ двигателя на нагрузку при данной скорости.

При этом коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0{,}98674$ — он снизился всего на 0,01 по сравнению с комплексным уравнением (8), включающим 11 факторов. Это говорит о том, что по уровню достоверности модель (10) с тремя параметрами практически не уступает модели (8) с 11 параметрами.

В ходе анализа в качестве параметра «мгновенный часовой расход топлива, л/ч» использовался логированный сигнал, снимаемый диагностическим прибором ДК-5 с электронного блока управления двигателем. Авторы осознают, что фактический расход топлива двигателем может несколько отличаться от его логированного параметра вследствие изменения технического состояния топливной аппаратуры и самого двигателя в процессе эксплуатации. Это обусловлено тем, что логированный сигнал соответствует рассчитанному электронным блоком заданному значению топливоподачи; на самом же деле, вследствие износа форсунок и прочих элементов двигателя, фактическая подача может отличаться от заданного значения. В работе [5] приведено уравнение связи фактического расхода моторного топлива с его расчетным значением, снимаемым логированием сигнала, оно имеет линейный вид и подтверждает, что разница очень незначительная, но все же она имеется.

При утверждении окончательной регрессионной модели, основанной на использовании рассматриваемых параметров (факторов), кроме соображений относительно точности расчета фактически потребляемого топлива, необходимо учитывать чувствительность, стабильность и информативность регистрируемых параметров во времени и при изменении технического состояния транспортного средства, а также удобство их передачи через существующую систему онлайн-мониторинга автобусов. Также немаловажное значение может иметь требование по ограничению объема передаваемой информации. С этой точки зрения при необходимости минимизации передаваемого объема информации может использоваться единственный параметр — положение педали акселератора φ и, соответственно, однофакторная модель мгновенного расхода топлива в функции от φ (рис. 4).

Полноценный анализ причин повышенного расхода топлива чисто по его логированному сигналу сделать невозможно, так как логированный сигнал расхода топлива сам по себе не дает ответа на вопрос: «А сколько должен был израсходовать топлива автобус на конкретном перегоне с такими-то режимными параметрами?» Ответ на этот вопрос может дать математическая модель, которая отражает устойчивые зависимости расхода от управляемых и неуправляемых факторов.

Выводы и заключение

Проведен натурный эксперимент по сбору данных для анализа степени влияния режимных факторов работы силовой установки автобусов, работающих на городском

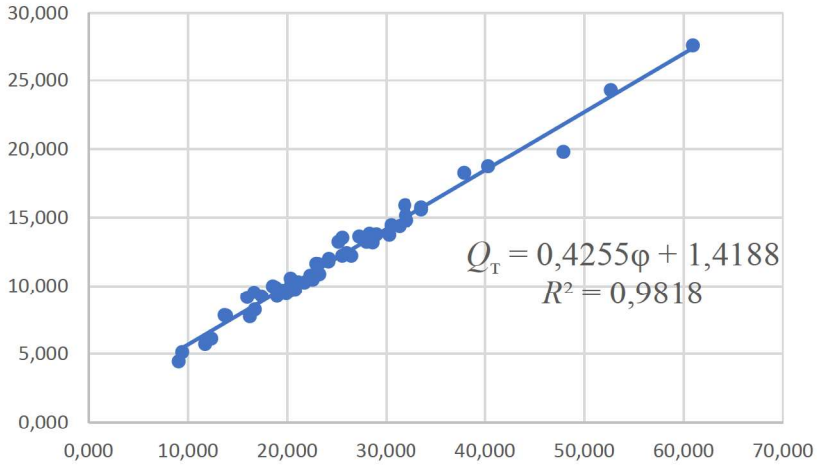


Рис. 4. Линейное уравнение по фактору φ

маршруте в условиях мегаполиса, на формирование показателей топливной экономичности.

В результате применения последовательной процедуры корреляционно-регрессионного анализа данных эксперимента получены оценки степени влияния семи режимных факторов на расход топлива автобуса в городском цикле движения.

Установлено, что высокая корреляция с мгновенным часовым расходом топлива $Q_т$ наблюдается у следующих факторов: положение педали акселератора φ (0,991); нагрузка при данной скорости N (0,923); фактический крутящий момент двигателя M_e (0,980) и расход воздуха двигателем $Q_в$ (0,942). Остальные исследованные параметры также влияют на расход топлива, но в меньшей степени.

Построены регрессионные уравнения, связывающие рассмотренные факторы с мгновенным часовым расходом топлива:

- в линейной интерпретации после удаления из модели статистически незначимых факторов уравнение имеет вид формулы (3), при этом коэффициент детерминации $R^2 = 0{,}99172$;
- в модели второго порядка уравнение имеет вид формулы (5), при этом коэффициент детерминации $R^2 = 0{,}97568$;
- в модели с парными эффектами уравнение имеет вид формулы (7), при этом коэффициент детерминации $R^2 = 0{,}98492$;
- в итоговой модели с участием линейных, квадратичных и парных эффектов после удаления статистически незначимых факторов уравнение имеет вид формулы (10) при $R^2 = 0{,}98674$.

При необходимости минимизации регистрируемых параметров может использоваться однофакторная модель мгновенного расхода топлива от положения педали акселератора, $R^2 = 0{,}9818$.

Анализ режимных факторов проводился на основе статических регрессионных моделей, построенных на средних значениях всех рассмотренных параметров на перегонах маршрута. На самом же деле эти параметры в пределах перегонов изменяются и имеют вид реализации случайных процессов во времени. Регрессионные модели не содержат в своей структуре параметр «текущее время», и поэтому свойства и характеристики быстроизменяющихся нестационарных переходных процессов, протекающих в силовой установке автомобиля, не могут в полной мере быть отображены в статических регрессионных моделях. Поэтому следующим этапом планируется построение динамических моделей, и проведенная в данной статье оценка влия-

ния факторов на показатели топливной экономичности будет учтена при выборе управляемых переменных динамических моделей.

Можно предположить, что использование динамических моделей позволит решать задачи моделирования и нормирования расхода топлива на более высоком уровне.

Библиографический список

1. *Назаров А. А., Бушуев П. В.* Опыт эксплуатации газовых автобусов «Икарус» в зимний период // Автотранспортное предприятие. 2006. № 5. С. 29–30.

2. *Бушуев П. В., Панов Ю. В.* Газовые системы питания автобусов и их сравнительные данные по расходу топлива // Автозаправочный комплекс + альтернативное топливо. 2007. № 1 (31). С. 47–51.

3. *Бушуев П. В., Зенченко В. А., Панов Ю. В.* Методика оценки эксплуатационного расхода компримированного природного газа автотранспортными средствами при помощи бортовой системы управления двигателем // Проблемы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта: сб. науч. тр. по материалам 65-й науч.-метод. и науч.-исслед. конф. МАДИ (ГТУ). Москва, 30 января – 1 февраля 2007 г. М.: МАДИ (ГТУ), 2007. С. 93–99.

4. *Бушуев П. В., Панов Ю. В., Зенченко В. А., Назаров А. А.* Современные методы оценки эксплуатационного расхода газового топлива городскими автобусами // Автотранспортное предприятие. 2007. № 4. С. 29–34.

5. *Бушуев П. В.* Разработка методики нормирования расхода компримированного природного газа городскими автобусами, оснащенными электронной системой управления двигателем: дис. … канд. техн. наук. М., 2007. 161 с.

6. *Максимов В. А., Нгуен В. Т.* Оценка влияния условий графика работы на расход топлива городских автобусов в эксплуатации // Грузовик. 2023. № 5. С. 15–20.

7. *Максимов В. А., Нгуен В. Т.* Построение регрессионных моделей расхода топлива городских автобусов // Грузовик. 2023. № 10. С. 40–45.

8. *Максимов В. А., Нгуен В. Т.* Прогнозирование расхода топлива городских автобусов // Актуальные вопросы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта: сб. науч. тр. по материалам 82-й науч.-метод. и науч.-исслед. конф. МАДИ. Москва, 30 января – 1 февраля 2024 г. М.: МАДИ, 2024. С. 8–15.

9. *Нгуен В. Т.* Разработка методики определения эксплуатационных норм расхода топлива городских автобусов с использованием современных информационных систем учёта работы: дис. … канд. техн. наук. М., 2024. 232 с.

10. *Почукаев М. И.* Разработка методики нормирования расхода компримированного природного газа городскими автобусами с учетом погодных условий: автореф. дис. … канд. техн. наук. М., 2026. 20 с.

11. *Кириллов А. Г.* Оперативное управление работоспособностью автомобилей по критерию расхода топлива с применением новых информационных технологий: дис. … канд. техн. наук. Владимир, 2000. 210 с.

12. *Булатов С. В.* Комплекс мероприятий, обеспечивающий безопасную и эффективную эксплуатацию городских автобусов в зимний период // Вестник Брянского государтсвенного технического университета. 2020. № 10 (95). С. 37–41.

13. *Фалькевич Б. С.* Теория автомобиля. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машгиз, 1963. 239 с.

14. *Панов Ю. В., Зенченко В. А., Корякин А. А.* Исследование расхода дизельного и газового топлива газодизельными автобусами «Икарус-280» на маршруте // Тезисы докл. 3-й Междунар. науч.-техн. конф. «Решение экологических проблем в автотранспортном комплексе». М.: МАДИ (ГТУ), 1999. С. 128–129.

15. *Панов Ю. В., Зенченко В. А., Корякин А. А.* Исследование закономерностей нормирования расхода топлива газодизельных автобусов. // Тезисы докл. 4-й Междунар. науч.-техн. конф. «Решение экологических проблем в автотранспортном комплексе». М.: МАДИ (ГТУ), 2000. С. 117–118.

16. *Корякин А. А.* Разработка методики маршрутного нормирования расхода топлива для газодизельных автобусов: дис. … канд. техн. наук. М., 2000. 220 с.

References

1. Nazarov A. A., Bushuev P. V. *Opyt ekspluatatsii gazovykh avtobusov «Ikarus» v zimniy period* [Operation of Ikarus gas buses in winter]. *Avtotransportnoe predpriyatie – Motor Transport Enterprise*, 2006, no. 5, pp. 29–30.

2. Bushuev P. V., Panov Yu. V. *Gazovye sistemy pitaniya avtobusov i ikh sravnitel'nye dannye po raskhodu topliva* [Gas power supply systems for buses and their comparative data on fuel consumption]. *Avtozapravochniy kompleks + al'ternativnoe toplivo – Petrol station + alternative fuel*, 2007, no. 1 (31), pp. 47–51.

3. Bushuev P. V., Zenchenko V. A., Panov Yu. V. *Metodika otsenki ekspluatatsionnogo raskhoda komprimirovannogo prirodnogo gaza avtotransportnymi*

sredstvami pri pomoshchi bortovoy sistemy upravleniya dvigatelem [Methodology for estimating the operational consumption of compressed natural gas by motor vehicles using the on-board engine control system]. *Problemy tekhnicheskoy ekspluatatsii i avtoservisa podvizhnogo sostava avtomobil'nogo transporta. Trudy 65-y nauch.-metodicheskoy i nauch.-issled. konf. MADI (GTU). Moskva, 30 yanvarya — 1 fevralya 2007 g.* [Problems of technical operation and car service of road transport rolling stock. Proceedings of the 65-th scientific-methodological and scientific-research. conf. MADI (GTU). Moscow, January 30 - February 1, 2007]. Moscow, MADI (GTU), 2007, pp. 93–99.

4. Bushuev P. V., Panov Yu. V., Zenchenko V. A., Nazarov A. A. *Sovremennye metody otsenki ekspluatatsionnogoraskhoda gazovogo topliva gorodskimi avtobusami* [Modern methods for assessing the operational consumption of gas fuel by city buses]. *Avtotransportnoe predpriyatie – Motor Transport Enterprise*, 2007, no. 4, pp. 29–34.

5. Bushuev P. V. *Razrabotka metodiki normirovaniya raskhoda komprimirovannogo prirodnogo gaza gorodskimi avtobusami, osnashchennymi elektronnoy sistemoy upravleniya dvigatelem. Diss. kand. tekhn. nauk* [Development of a methodology for rationing the flow of compressed natural gas by city buses equipped with an electronic engine control system. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2007, 161 p.

6. Maksimov V. A., Nguen V. T. *Otsenka vliyaniya usloviy grafika raboty na raskhod toplivagorodskikh avtobusov v ekspluatatsii* [Assessment of the impact of schedule conditions on the fuel consumption of city buses in operation]. *Gruzovik – Truck*, 2023, no. 5, pp. 15–20.

7. Maksimov V. A., Nguen V. T. *Postroenie regressionnykh modeley raskhoda topliva gorodskikh avtobusov* [Construction of regression models of fuel consumption of city buses].*Gruzovik – Truck*, 2023, no. 10, pp. 40–45.

8. Maksimov V. A., Nguen V. T. *Prognozirovanie raskhoda topliva gorodskikh avtobusov* [Forecasting of city bus fuel consumption]. *Aktual'nye voprosy tekhnicheskoy ekspluatatsii i avtoservisa podvizhnogo sostava avtomobil'nogo transporta. Trudy 82-y nauch.-metodicheskoy i nauch.-issled. konf. MADI. Moskva, 30 yanvarya — 1 fevralya 2024 g.* [Actual issues of technical operation and car service of road transport rolling stock. Proceedings of the 82-nd scientific-methodological and scientific-research. conf., MADI, Moscow, January 30 – February 1, 2024]. Moscow, MADI, 2024, pp. 8–15.

9. Nguen V. T. *Razrabotka metodiki opredeleniya ekspluatatsionnykh norm raskhoda topliva gorodskikh avtobusov s ispol'zovaniem sovremennykh informatsionnykh sistem ucheta raboty. Diss. kand. tekhn. nauk* [Development of a methodology for determining the operating rates of fuel consumption of city buses using modern information systems for recording work. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2024, 232 p.

10. Pochukaev M. I. *Razrabotka metodiki normirovaniya raskhodakomprimirovannogo prirodnogo gaza gorodskimi avtobusami s uchetom pogodnykh usloviy. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* Development of a methodology for rationing the consumption of compressed natural gas by city buses, taking into account weather conditions. Author`s thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2026, 20 p.

11. Kirillov A. G. *Operativnoe upravlenie rabotosposobnost'yu avtomobiley po kriteriyu raskhoda topliva s primeneniem novykh informatsionnykh tekhnologiy. Diss. kand. tekhn. nauk* [Operational control of vehicle performance according to the criterion of fuel consumption using new information technologies. PhD in Sci. Tech. diss.]. Vladimir, 2000, 210 p.

12. Bulatov S. V. *Kompleks meropriyatiy, obespechivayushchiy bezopasnuyu i effektivnuyu ekspluatatsiyu gorodskikh avtobusov v zimniy period* [Complex of measures ensuring safe and effective operation of city buses in winter]. *Vestnik Bryanskogo gos. tekhn. un-ta – Bulletin of the Bryansk State. Tech. University*, 2020, no. 10 (95), pp. 37–41.

13. Fal'kevich B. S. *Teoriya avtomobilya* [Automobile theory]. 2-nd ed., revised. Moscow, Mashgiz Publ., 1963, 239 p.

14. Panov Yu. V., Zenchenko V. A., Koryakin A. A. *Issledovanie raskhoda dizel'nogo i gazovogo topliva gazodizel'nymi avtobusami «Ikarus-280» na marshrute* [Study of diesel and gas fuel consumption by Ikarus-280 gas diesel buses on the route]. *Trudy 3-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Reshenie ekologicheskikh problem v avtotransportnom komplekse»* [Proceedings of the 3-rd International scientific and technical conf. "Solving environmental problems in the motor transport complex"]. Moscow, MADI (GTU), 1999, pp. 128–129.

15. Panov Yu. V., Zenchenko V. A., Koryakin A. A. *Issledovanie zakonomernostey normirovaniya raskhoda topliva gazodizel'nykh avtobusov* [Study of the laws of rationing fuel consumption of gas-diesel buses]. *Trudy 4-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Reshenie ekologicheskikh problem v avtotransportnom komplekse»* [Proceedings of the 4th International. scientific and technical conf. "Solving environmental problems in the motor transport complex."]. Moscow, MADI (GTU) Publ., 2000, pp. 117–118.

16. Koryakin A. A. *Razrabotka metodiki marshrutnogo normirovaniya raskhoda topliva dlya gazodizel'nykh avtobusov. Diss. kand. tekhn. nauk* [Development of a methodology for route rationing of fuel consumption for gas-diesel buses. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2000, 220 p.