


УДК 621.431

Анализ возможности работы двигателя с минимальным расходом топлива

А.Г. Кузнецов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Analysis of Possibility of Engine Operation with Minimum Fuel Consumption

A.G. KuznetsovBMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1 e-mail: kuzag441@mail.ru

i Рассмотрен способ повышения топливной экономичности двигателей внутреннего сгорания путем организации работы двигателя на режимах, соответствующих характеристике минимальных значений удельного эффективного расхода топлива. Разработана методика построения линии минимальных значений удельного эффективного расхода топлива на поле универсальной характеристики двигателя. Примеры применения предложенной методики проиллюстрированы для дизелей Liebherr, предназначенных для установки на тяжелые грузовики и агрегаты строительной техники. Проведенный анализ показал, что возможности задания экономичного режима работы двигателя в энергетических установках с механической трансмиссией весьма ограничены. В комбинированных установках с трансмиссией электрического типа существует гибкая связь между двигателем и элементами трансмиссии, что позволяет организовать работу двигателя на режимах, соответствующих минимальному удельному эффективному расходу топлива. Для оптимизации работы двигателя по топливной экономичности система управления должна задавать регулятору двигателя настройку скоростного режима в соответствии с оптимальной зависимостью частоты вращения вала двигателя от мощности. Оптимальные зависимости частоты вращения от мощности получены для рассматриваемых дизелей Liebherr.

Ключевые слова: дизель, удельный эффективный расход топлива, управление.

i The article describes a method of increasing fuel efficiency of internal combustion engines through organizing the work of the engine in the modes corresponding to the minimum values of specific efficient fuel consumption. A method for plotting the minimum value curve of the specific efficient fuel consumption on the field of engine universal characteristics was developed. The application of the proposed method is illustrated for Liebherr diesel engines that are used in heavy trucks and construction equipment. The analysis shows that the possibilities of economy mode setting for engines in power installations with mechanical transmission are rather limited. In combined power installations with an electrical type transmission there is a flexible link between the engine and transmission components, due to which the engine work can be organized in the modes that correspond to the minimum specific fuel consumption. In order to optimize engine fuel efficiency, the control system must set the engine governor in such a speed mode that corresponds to the optimal relationship between the engine shaft rotation speed and engine power. The optimal dependencies of the rotation speed on the power are obtained for Liebherr diesel engines.

Keywords: diesel engine, specific efficient fuel consumption, engine control.

Одним из способов влияния на экономичность двигателей внутреннего сгорания является выбор режима работы двигателя в составе энергетической установки. Наибольший эффект дает работа двигателя на режимах, соответствующих минимальным значениям удельного эффективного расхода топлива [1–7]. На поле режимов работы двигателя для различных величин развиваемой им мощности можно найти линию, соответствующую минимальным удельным эффективным расходам топлива [8].

Предлагается следующая методика построения такой линии. Исходной информацией является универсальная характеристика дизеля в координатах частота вращения вала n — крутящий момент M с нанесенными на поле этой характеристики линиями постоянных значений удельного эффективного расхода топлива $g_e = \text{const}$. На эту характеристику наносятся также линии постоянной мощности $N = \text{const}$, которые в данной системе координат имеют вид гипербол. Для каждой гиперболы (то есть заданного значения мощности дизеля N) определяется точка, соответствующая минимальному значению удельного эффективного расхода топлива $g_{e \text{ min}}$.

Примеры применения предложенной методики проиллюстрированы для дизелей Liebherr [9], предназначенных для установки на тяжелые грузовики и агрегаты строительной техники. Рассмотрены следующие типы двигателей: 8-цилиндровый дизель Liebherr V8 мощностью 505 кВт, 12-цилиндровый дизель Liebherr V12 мощностью 725 кВт и 12-цилиндровый дизель Liebherr V12 мощностью 1000 кВт. На рис. 1, а–в в координатах $M(n)$ приведены универсальные характеристики данных дизелей с линиями постоянных значений удельного эффективного расхода топлива $g_e = \text{const}$ и линиями постоянной мощности $N = \text{const}$.

Как видно из рис. 1, а–в, одну и ту же мощность N (различные точки одной гиперболы) дизель может развить при различных сочетаниях частоты вращения n и крутящего момента M . Линии I на рис. 1, а–в проходят через точки полей характеристик дизелей, соответствующие минимальным удельным расходам топлива дизелем $g_{e \text{ min}}$ для каждого значения мощности.

Реализация возможности работы дизеля на режимах минимального расхода топлива во многом зависит от типа энергетической установки и трансмиссии потребителя энергии. Тип энергетической установки определяет и способ управления двигателем. Рассмотрим два распространенных варианта энергетических уста-

новок: с механическим типом трансмиссии и с трансмиссией электрического типа.

Схема энергетической установки с механическим типом трансмиссии показана на рис. 2. Источником энергии является двигатель. Вал двигателя через коробку передач связан с движителем, например, колесами транспорт-

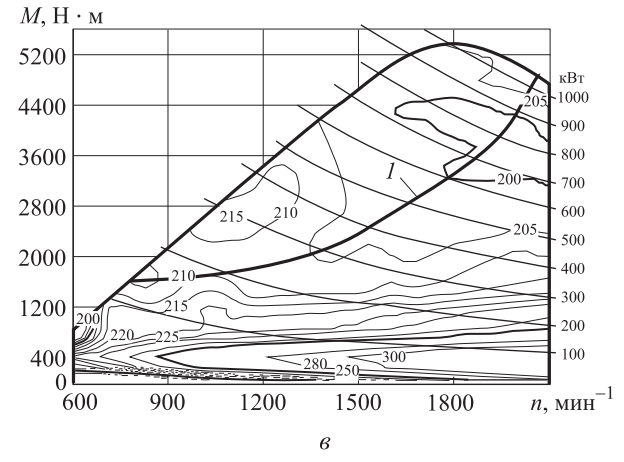
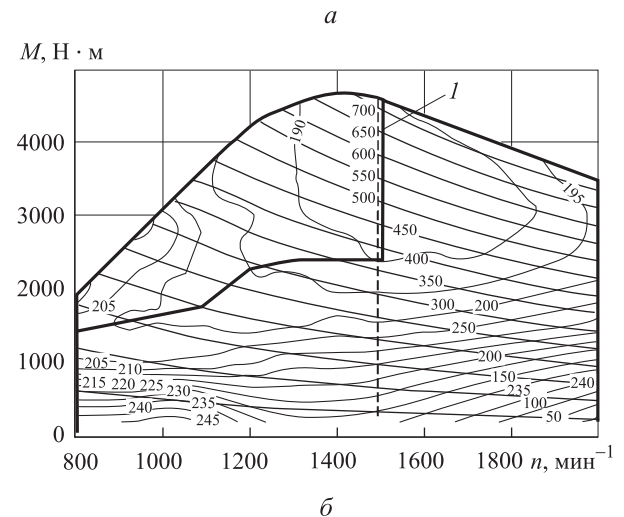
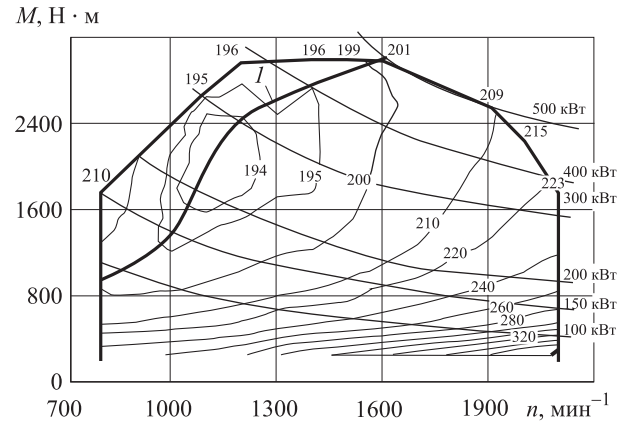


Рис. 1. Универсальная характеристика дизеля:
 а — Liebherr V8 мощностью 505 кВт;
 б — Liebherr V12 мощностью 725 кВт;
 в — Liebherr V12 мощностью 1000 кВт

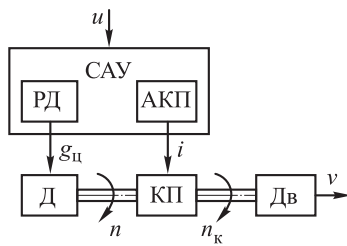


Рис. 2. Схема энергетической установки с механическим типом трансмиссии:
 Д — двигатель; КП — коробка передач; Дв — движитель;
 САУ — система автоматического управления;
 РД — регулятор двигателя; АКП — автоматическая коробка передач

ного средства. Частоты вращения валов двигателя n и движителя n_k связаны передаточными отношениями ступеней коробки передач. Режим работы энергетической установки задается положением педали водителя u , поступающим в систему автоматического управления. Система управления может воздействовать на двигатель через регулятор двигателя и коробку передач — через автомат коробки передач. Такой вариант компоновки энергетической установки характерен для традиционного автомобильного транспорта и сельскохозяйственной техники.

С учетом специфики движения транспорта в городских условиях, когда необходимо ограничивать скорость движения и темп разгона автомобиля, обычно водитель педалью управления задает одну из скоростных характеристик цикловой подачи топлива, а регулятор двигателя формирует величину цикловой подачи g_u , корректируя ее в зависимости от частоты вращения n для обеспечения устойчивой работы двигателя в сочетании с характеристикой потребителя энергии — моментом сопротивления движению.

Для сельскохозяйственной техники чаще используется управление движением со стабилизацией частоты вращения вала двигателя. Водитель задает желаемую частоту вращения вала двигателя, а регулятор поддерживает ее, изменяя цикловую подачу топлива g_u в соответствии с моментом сопротивления.

Автомат коробки передач устанавливает заданную ступень коробки передач с передаточным отношением i . Частота вращения вала движителя n_k определяет скорость транспортной установки v .

Для иллюстрации работы двигателя с механической трансмиссией на рис. 3 приведены характеристики движителя (колес автомобиля) в виде зависимости момента на колесах M_k от

частоты вращения колес n_k при установке на автомобиль дизеля Liebherr V8 мощностью 505 кВт с пятиступенчатой механической коробкой передач КамАЗ 142. На рис. 3 даны характеристики двигателя, приведенные к колесам автомобиля с учетом передаточных отношений механической трансмиссии на четвертой (характеристика IV) и пятой (характеристика V) передачах. Линии I_{IV} и I_V соответствуют минимальным удельным эффективным расходам топлива для разных частот вращения вала двигателя (см. рис. 1). На рис. 3 показаны также гиперболы постоянной мощности дизеля N_e , равной 150 кВт (линия 2) и 300 кВт (линия 3). Заштрихована зона перекрытия полей характеристик трансмиссии на четвертой и пятой передачах.

На рис. 3 видно, что, если для движения автомобиля со скоростью, соответствующей частоте вращения колес $n_k = 1\,200$ об/мин, требуется мощность двигателя $N_e = 300$ кВт (точка А), возможна работа механической трансмиссии как на четвертой, так и на пятой передачах. При этом расход топлива на пятой передаче минимальный, так как в зоне характеристики V точка А лежит на линии минимального удельного эффективного расхода топлива I_V . На четвертой передаче расход топлива выше, поскольку в зоне характеристики I_V режим работы двигателя находится в стороне от линии наилучшей экономичности I_{IV} .

Если для движения автомобиля с той же скоростью требуется мощность $N_e = 150$ кВт, то точка Б режима работы двигателя не находится на линиях наилучшей экономичности ни в зоне характеристики V пятой передачи, ни в зоне характеристики IV четвертой передачи, и минимальный расход топлива недостижим ни на четвертой, ни на пятой передачах. Из расположения линий постоянных значений удельного эффективного расхода топлива $g_e = \text{const}$ на по-

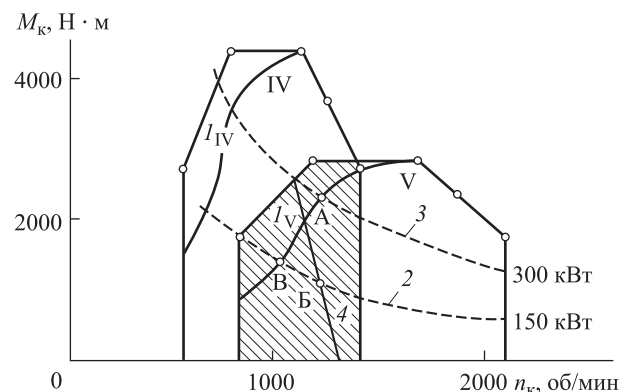


Рис. 3. Характеристики движителя на 4 и 5 передачах

ле характеристики дизеля Liebherr V8 на рис. 1 следует, что точка Б при движении автомобиля на пятой передаче на поле характеристики двигателя находится в зоне меньших значений g_e , чем при движении на четвертой передаче. Поэтому при движении на пятой передаче расход топлива в этом случае также будет меньше.

При мощности двигателя $N_e = 150$ кВт минимальному расходу топлива соответствует движение автомобиля на пятой передаче со скоростью, соответствующей частоте вращения колес двигателя $n_k = 1000$ об/мин (точка В на рис. 3). Однако такая скорость может быть неприемлема по условиям дорожного движения. Практика вождения автомобилей подтверждает результаты данного анализа.

При управлении двигателем способом стабилизации частоты вращения режимы работы двигателя располагаются на регуляторной характеристике, определяемой положением педали управления (линия 4 на рис. 3). Анализ показывает, что закономерности определения режима работы двигателя при данном способе управления сходны с теми, которые соответствуют способу непосредственного управления. Разница заключается в том, что при непосредственном управлении подачу топлива определяет водитель, а при стабилизации — регулятор частоты вращения. Если для движения автомобиля со скоростью, соответствующей частоте вращения колес $n_k = 1200$ об/мин, требуется мощность $N_e = 150$ кВт, регулятор установит подачу топлива, соответствующую точке Б на рис. 3. Как видно из рисунка, данный режим работы не располагается на линии наилучшей экономичности.

Основным свойством трансмиссии механического типа является то, что с учетом передаточных отношений ступеней коробки передач скорость автомобиля или сельскохозяйственной машины жестко связана с частотой вращения вала двигателя, а крутящий момент на движителе (колесах автомобиля) — с эффективным моментом двигателя. Возможности задания экономичного режима работы двигателя здесь весьма ограничены, так как необходимая в конкретных условиях дорожного движения скорость транспортного средства, а значит и частота вращения, и мощность двигателя, чаще всего не соответствуют зоне экономичной работы.

На рис. 4 приведена схема энергетической установки с электрической трансмиссией [10]. Энергия от двигателя передается к движителю через электрическую трансмиссию, содержащую

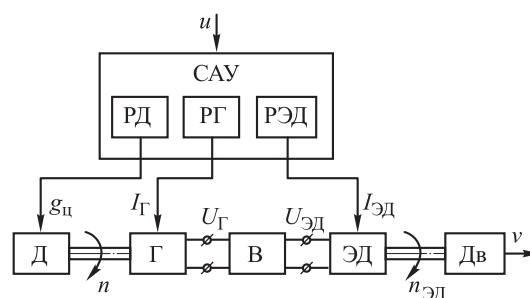


Рис. 4. Схема энергетической установки с электрической трансмиссией:

- САУ — система автоматического управления;
- РД — регулятор двигателя; РГ — регулятор генератора;
- РЭД — регулятор электродвигателя; Д — двигатель;
- Г — генератор; В — выпрямитель;
- ЭД — электродвигатель; Дв — движитель

генератор и электродвигатели. Нередки случаи, когда передача мощности осуществляется по электрической цепи переменного-постоянного типа, например, используются синхронный генератор и электродвигатели постоянного тока. Для согласования различных частей такой цепи применяется выпрямитель, на котором переменное напряжение на выходе генератора U_G преобразуется в постоянное напряжение питания электродвигателей $U_{ЭД}$ [11, 12].

Способы управления комбинированными энергетическими установками, содержащими дизель как источник энергии и электрическую трансмиссию, более разнообразны по сравнению с установками с механическим типом трансмиссии [8]. В трансмиссии с механической коробкой передач при жесткой связи валов двигателя и колес транспортного средства для того, чтобы транспортное средство двигалось с максимальной скоростью, приходится задавать и максимальную частоту вращения вала двигателя. Энергетическим установкам комбинированного типа присуща большая гибкость выбора и сочетания режимов работы двигателя и электрической части трансмиссии в связи с отсутствием жесткой механической связи между валом двигателя и колесами, т. е. между частотами вращения n и $n_{ЭД}$. При балансе работы разных элементов энергетической установки по мощности двигатель внутреннего сгорания и тяговые электродвигатели могут работать на разных режимах по сочетанию частоты вращения и крутящего момента. Так, при необходимой для движения мощности $N = 150$ кВт (см. рис. 3) двигатель может работать не в точке Б, как при использовании механической трансмиссии, а в точке В на линии минимальных расходов топлива (см. рис. 3).

Система автоматического управления энергетической установкой комбинированного типа может быть построена по-разному в зависимости от принятого способа управления. Система управления может воздействовать на отдельные элементы энергетической установки через соответствующие регуляторы. Сигнал управления и задает режим работы двигателя по частоте вращения, а регулятор двигателя осуществляет стабилизацию заданной частоты, изменяя цикловую подачу топлива g_d в соответствии с моментом нагрузки со стороны генератора.

Способы регулирования электрических машин зависят от типов используемых в трансмиссии генератора и электродвигателей. Регулятор генератора может определять ток якоря генератора I_r , а регулятор электродвигателя — ток в цепи питания электродвигателя $I_{эд}$.

Энергетические установки комбинированного типа позволяют организовать работу двигателя с минимальным расходом топлива на различных режимах. Для этого при требуемой в конкретных условиях движения мощности двигатель должен работать на режимах, соответствующих характеристике минимальных удельных эффективных расходов топлива для каждого значения мощности энергетической установки. Для реализации такой задачи должна быть определена зависимость задаваемого режима работы двигателя по частоте вращения от потребляемой мощности $n_0(N)$.

Зависимость $n_0(N)$ соответствует линии минимальных удельных эффективных расходов топлива на универсальной характеристике двигателя. На рис. 5 показаны зависимости оптимальной с точки зрения топливной экономичности частоты вращения вала дизеля n_0 от потребляемой мощности N , полученные путем перестроения линий 1 с рис. 1, а–в соответственно для дизелей: Liebherr V8 мощностью 505 кВт — линия 1, Liebherr V12 мощностью 725 кВт — линия 2 и Liebherr V12 мощностью 1000 кВт — линия 3. Работа дизелей по линиям минимальных расходов топлива предусматривает изменение частоты вращения вала двигателя при изменении требуемой мощности.

По результатам проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

Для оптимизации топливной экономичности двигателя требуется его работа на режимах,

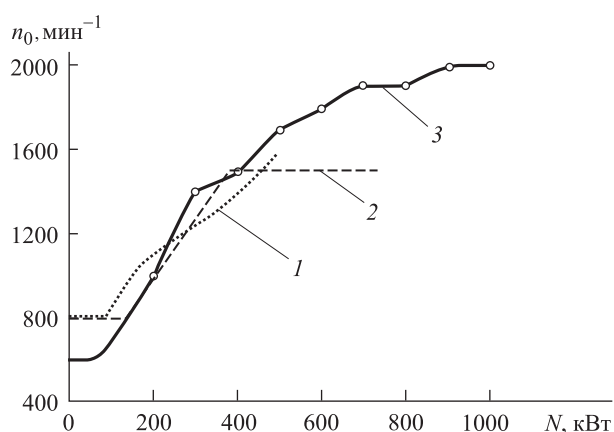


Рис. 5. Зависимости частоты вращения вала дизеля от мощности, соответствующие оптимальной экономичности:

- 1 — для дизеля Liebherr мощностью 505 кВт;
- 2 — для дизеля Liebherr мощностью 725 кВт;
- 3 — для дизеля Liebherr мощностью 1 000 кВт

лежащих на линии, соответствующей минимальному удельному эффективному расходу топлива для различных значений мощности. Предложена методика построения линий наилучшей топливной экономичности двигателя на поле универсальной характеристики двигателя. Иллюстрация применения предложенной методики проведена для трех типов двигателей Liebherr с мощностями 505, 725 и 1000 кВт.

Энергетические установки с трансмиссией механического типа не обеспечивают работу двигателя на режимах наилучшей экономичности из-за жесткой связи между валами двигателя и движителя. В комбинированных установках с трансмиссией электрического типа существует гибкая связь между двигателем и элементами трансмиссии, что позволяет организовать работу двигателя на режимах, соответствующих минимальному удельному эффективному расходу топлива.

Для оптимизации работы двигателя по топливной экономичности система автоматического управления должна задавать регулятору двигателя настройку скоростного режима в соответствии с оптимальной зависимостью частоты вращения вала двигателя от мощности. Задачей регулятора двигателя является стабилизация заданного системой управления значения частоты вращения.

Литература

- [1] Кузнецов А.Г., Марков В.А., Шатров В.И., Фурман В.В., Афанасьев В.Н. Методика оценки расхода топлива и выбросов токсичных компонентов отработавших газов

- транспортного дизеля на неустановившихся режимах. *Международ. симп. «Образование через науку», посвященный 175-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана*, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005, с. 94.
- [2] Леонов Д.И., Леонов И.В. Методы улучшения экономичности машин с двигателями внутреннего сгорания при проектировании. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2008, № 2, с. 39–51.
- [3] Барбашов Н.Н., Леонов И.В. Выбор оптимальной мощности двигателя внутреннего сгорания гибридной силовой установки. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроения*, 2010, № 4, с. 47–54.
- [4] Леонов И.В. Снижение расхода энергии подъемно-транспортных машин в цикле разгон-торможение. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2014, № 1(94), с. 99–110.
- [5] Robert «Bobby» Grisso, John V. Perumpral, Gary T. Roberson, Robert Pitman. *Predicting Tractor Diesel Fuel Consumption*. 2014, pp. 1–11. URL: https://pubs.ext.vt.edu/442/442-073/442-073_pdf.pdf (дата обращения 12 мая 2015).
- [6] Дарьенков А.Б., Хватов О.С. Система управления автономным дизель-генератором переменной частоты вращения. *Тр. Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеев*, 2013, № 5(102), с. 303–308.
- [7] Дарьенков А.Б., Хватов О.С., Юрлов Ф.Ф., Усов Н.В. Технико-экономическое обоснование применения дизель-генераторных электростанций с переменной частотой вращения вала. *Тр. Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеев*, 2014, № 3(105), с. 210–214.
- [8] Иващенко Н.А., Кузнецов А.Г., Харитонов С.В., Кузнецов С.А. Моделирование процессов управления транспортным средством с дизелем и электрической трансмиссией. *Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10. Инновационная деятельность*, 2014, № 5(14), с. 68–77.
- [9] *Diesel Engines by Liebherr*. URL: https://docviewer.yandex.ru/?url=ya-serp%3A%2F%2Fwww.liebherr.com%2FCP%2Fen-GB%2Fdefault_cp.wfw%2Ftab-131726%3Ffile%3D~%2FCMS%2Fdownloads%2FBP_Dieselmotoren_28S_en_web.pdf&lang=en&c=5559cddf3525 (дата обращения 12 мая 2015).
- [10] *Это дизель-электрическая трансмиссия*. URL: <http://www.liebherr.com/CP/ru-RU/132422.wfw> (дата обращения 12 мая 2015).
- [11] Кузнецов А.Г. Динамическая модель энергетической установки тепловоза. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2009, № 3, с. 49–56.
- [12] Кузнецов А.Г., Харитонов С.В., Латочкин А.А. Математическая модель дизеля как источника энергии транспортной установки с электрической трансмиссией. *Грузовик*, 2014, № 7, с. 11–14.

References

- [1] Kuznetsov A.G., Markov V.A., Shatrov V.I., Furman V.V., Afanas'ev V.N. Metodika otsenki raskhoda topliva i vybrosov toksichnykh komponentov otrabotavshikh gazov transportnogo dizelia na neustanovivshikh rezhimakh [Methodology to evaluate fuel consumption and emissions of toxic components of exhaust gases of diesel vehicle in the transient regime]. *Mezhdunarodnyi simpozium «Obrazovanie cherez nauku», posviashchennyi 175-letiiu MGTU im. N.E. Baumana* [International Symposium «Education through Science», dedicated to the 175th anniversary of the BMSTU]. Moscow, Bauman Press, 2005, p. 94.
- [2] Leonov D.I., Leonov I.V. Metody uluchsheniia ekonomichnosti mashin s dvigateliami vnutrennego sgoraniia pri proektirovanii [Methods to Improve Efficiency of Machines with Internal Combustion Engines in Designing]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering]. 2008, no. 2, pp. 39–51.
- [3] Barbashov N.N., Leonov I.V. Vybior optimal'noi moshchnosti dvigatel'ia vnutrennego sgoraniia gibridnoi silovoi ustanovki [Selection of Optimal Power of Internal Combustion Engine of Hybrid Power Plant]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of

- the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering]. 2010, no. 4, pp. 47–54.
- [4] Leonov I.V. Snizhenie raskhoda energii pod"emno-transportnykh mashin v tsikle razgontormozhenie [Reduction in Power Consumption of Hoisting and Transport Cars in Acceleration-Deceleration Cycle]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering]. 2014, no. 1(94), pp. 99–110.
- [5] Robert «Bobby» Grisso, John V. Perumpral, Gary T. Roberson, Robert Pitman. *Predicting Tractor Diesel Fuel Consumption*. 2014, pp. 1–11. Available at: https://pubs.ext.vt.edu/442/442-073/442-073_pdf.pdf (accessed 12 May 2015).
- [6] Dar'enkov A.B., Khvatov O.S. Sistema upravleniia avtonomnym dizel'-generatorom peremennoi chastoty vrashcheniia [Control system of autonomous diesel generator characterized by alternating frequency rotation of shaft]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseev* [Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev]. 2013, no. 5(102), pp. 303–308.
- [7] Dar'enkov A.B., Khvatov O.S., Iurlov F.F., Usov N.V. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie primeneniia dizel'-generatornykh elektrostantsii s peremennoi chastotoi vrashcheniia vala [Technical-economic basis of the use of diesel electric power station characterized by alternating frequency rotation of shaft]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseev* [Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev]. 2014, no. 3(105), pp. 210–214.
- [8] Ivashchenko N.A., Kuznetsov A.G., Kharitonov S.V., Kuznetsov S.A. Modelirovanie protsessov upravleniia transportnym sredstvom s dizelem i elektricheskoi transmissiei [Simulation of the processes of driving transport vehicle with diesel and electric drivetrain]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 10. Innovatsionnaia deiatel'nost'* [Science Journal of Volgograd State University. Technology and innovations]. 2014, no. 5(14), pp. 68–77.
- [9] *Diesel Engines by Liebherr*. Available at: https://docviewer.yandex.ru/?url=ya-serp%3A%2F%2Fwww.liebherr.com%2FCP%2Fen-GB%2Fdefault_cp.wfw%2Ftab-131726%3Ffile%3D~%2FCMS%2Fdownloads%2FBP_Dieselmotoren_28S_en_web.pdf&lang=en&c=5559cddf3525 (accessed 12 May 2015).
- [10] *Eto dizel'-elektricheskaiia transmissiia* [This diesel-electric powertrain]. Available at: <http://www.liebherr.com/CP/ru-RU/132422.wfw> (accessed 12 May 2015).
- [11] Kuznetsov A.G. Dinamicheskaiia model' energeticheskoi ustanovki teplovoza [Dynamic Model of Power Generating Unit for Diesel Locomotive]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering]. 2009, no. 3, pp. 49–56.
- [12] Kuznetsov A.G., Kharitonov S.V., Latochkin A.A. Matematicheskaiia model' dizelia kak istochnika energii transportnoi ustanovki s elektricheskoi transmissiei [Mathematical model of diesel engine as energy generator for vehicle with electrical transmission]. *Gruzovik* [Truck]. 2014, no. 7, pp. 11–14.

Статья поступила в редакцию 25.05.2015

Информация об авторе

КУЗНЕЦОВ Александр Гаврилович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Теплофизика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: kuzag441@mail.ru).

Information about the author

KUZNETSOV Aleksandr Gavriilovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Thermal Physics. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: kuzag441@mail.ru).