DOI: 10.25515/PMI.2018.1.50

УДК 621.436.001.57

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

О.Н.ДИДМАНИДЗЕ[1], А.С.АФАНАСЬЕВ[2], Р.Т.ХАКИМОВ[3]
[1] *Российский государственный аграрный университет им. К.А.Тимирязева, Москва, Россия*
[2] *Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[3] *Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Россия*

В комплексной стратегии возрождения производства оборудования для горной промышленности и обеспечении ее конкурентоспособности предусмотрено широкое использование газовых двигателей различного назначения. Экспериментальные исследования рабочего цикла газового двигателя являются одной из основных задач при определении характеристики тепловыделения. Для этого на различных режимах были зафиксированы индикаторные диаграммы, которые были подвергнуты анализу с целью определения основных параметров, характеризующих внутрицилиндровые процессы. Согласно программе эксперимента были определены максимальное давление цикла, скорость нарастания давления, характеристика тепловыделения, показатели первой фазы тепловыделения, продолжительность второй фазы сгорания, а также влияние угла опережения зажигания на период воспламенения.

Представлены результаты экспериментального исследования влияния рабочего процесса газового двигателя с учетом изменения угла опережения зажигания на период воспламенения и определены параметры максимального давления цикла, скорости нарастания давления и характеристики тепловыделения. При обработке данных построены интегральные характеристики, рассчитаны параметры рабочего цикла и определена динамика тепловыделения двигателя.

***Ключевые слова*:** газовый двигатель, тепловыделение, сгорание, коэффициент избытка воздуха, индикаторные диаграммы, внешняя скоростная характеристика, эффективный КПД, температура, внутрицилиндровые процессы, дросселирование, газовоздушная смесь

***Как цитировать эту статью*:** Дидманидзе О.Н. Исследования показателей тепловыделения газовых двигателей / О.Н.Дидманидзе, А.С.Афанасьев, Р.Т.Хакимов // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 50-55. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.50

Введение. В горной отрасли задействовано значительное количество различных машин и механизмов, использующих тепловые двигатели [9]. Применение двигателей на газовом топливе дает возможность повысить их надежность, значительно сэкономить материальные средства и улучшить экологические параметры. Результаты показателей тепловыделения рабочих процессов транспортных двигателей, работающих на разных видах топлива (природный газ, дизельное топливо и бензин), влияют на основные технико-экономические и экологические показатели, что отражено в работах [1-8, 11, 14]. Одной из основных задач экспериментальных исследований являлось определение характеристики тепловыделения газовых двигателей (ГД). Для этого на различных режимах были зафиксированы индикаторные диаграммы, которые были подвергнуты анализу с целью определения основных параметров, характеризующих внутрицилиндровые процессы.

Методика исследования. Экспериментальные результаты исследований показывают, что изменения регулировочных и режимных параметров сложны в определении и непредсказуемо влияют на показатели тепловыделения газового двигателя. Экспериментально достаточно трудно определить влияние одного из существующих факторов, таких как скорость распространения фронта пламени, начальная температура подачи топлива, теплоемкость продуктов сгорания и т.д., на процесс тепловыделения. Как правило, некоторые из указанных факторов действуют одновременно и в некоторых случаях имеют противоположное направление. В экспериментах изменялись одновременно соотношение доли теплоты, подводимой на впуске с газом, частота вращения коленчатого вала (КВ), степень сжатия и угол опережения подачи газа. Влияние отдельных регулировочных показателей (коэффициент избытка воздуха, температура воздуха и газа, объем поступающего свежего заряда и т.д.) на смесеобразование позволили разработать комплекс регулировочных мероприятий, которые улучшили топливно-экономические и экологические показатели газового двигателя.

Исследование показателей тепловыделения газовых двигателей. В первую очередь был определен момент начала сгорания газовоздушной смеси. Следует отметить, что для определения момента начала сгорания был выбран метод наложения индикаторных диаграмм с различными установочными углами подачи газовоздушной смеси [12, 13, 15].

Согласно поставленным задачам экспериментальные исследования были проведены в несколько этапов [10, 16, 17].

Отоброно

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.50

1. Определение параметров ГД при различных установочных углах опережения зажигания. В процессе экспериментальных исследований [18, 20] получены данные для различных установочных углов опережения зажигания при работе двигателя 8ГЧ12/12 в газовом рабочем режиме.

2. Определение параметров ГД при постоянном установочном угле опережения зажигания и различных вариантах подачи газа. Для оценки влияния подачи топлива были выбраны установочные углы опережения зажигания до верхней мертвой точки (ВМТ), при которых получены серии данных работы ГД на режиме номинальной мощности. Кроме того, рассчитаны внешние скоростные характеристики ГД для оценки влияния способов регулирования мощности [19, 21]. При обработке данных эксперимента получены интегральные характеристики, параметры рабочего цикла и динамика тепловыделения газовых двигателей.

Обсуждение результатов. В схеме установки предусмотрена возможность раздельного регулирования расходов воздуха $G_в$ и газа $G_г$, что позволяет оценить влияние коэффициента избытка воздуха на параметры двигателя и выбрать рациональные составы смеси на режимах внешней скоростной характеристики [22, 24].

При открытой дроссельной заслонке $У_{др}$ наблюдается практически линейное увеличение расхода воздуха с ростом частоты вращения (рис.1). Отношение расхода газа к расходу воздуха по мере снижения частоты вращения уменьшается. Так, при работе по внешней скоростной характеристике меньшим частотам соответствуют меньшие мощности (происходит обеднение смеси).

При закрытии дроссельной заслонки общая тенденция сохраняется, но наклон кривых уменьшается, так как влияние дросселирования на впуске более заметно при высокой частоте вращения.

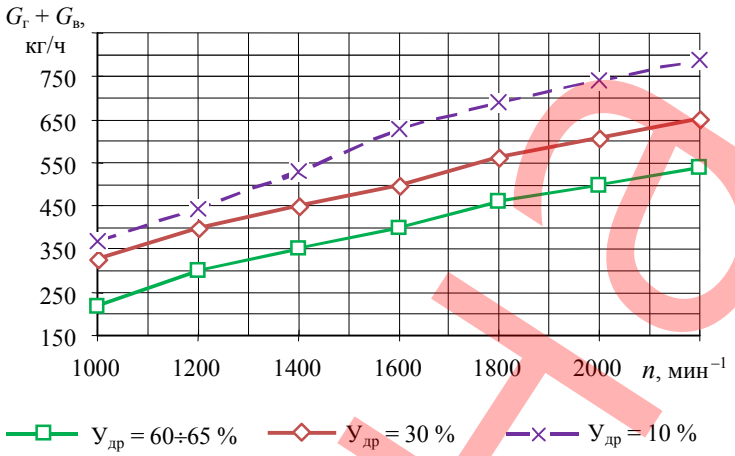


Рис.1. Расход воздуха и газа при работе по внешней скоростной характеристике с различным положением дроссельной заслонки и постоянным установочным углом опережения зажигания 12° поворота коленчатого вала (ПКВ)

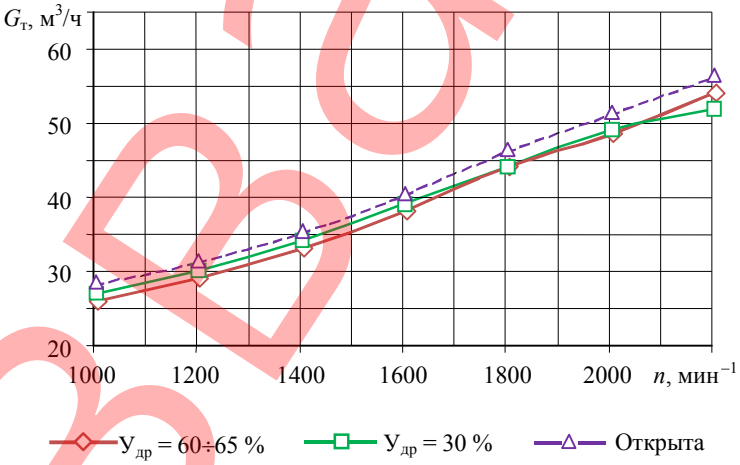


Рис.2. Расход газового топлива $G_т$ при работе по внешней скоростной характеристике с различными положениями дроссельной заслонки $У_{др}$ и постоянным установочным углом опережения зажигания $\varphi_{оз}$ = 12° ПКВ

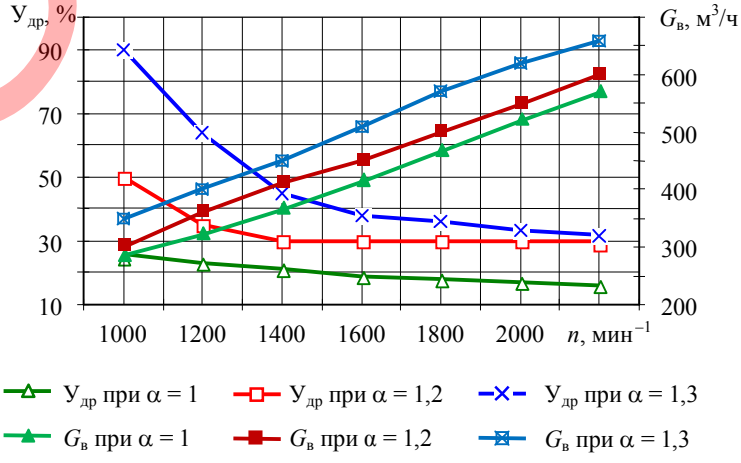


Рис.3. Расход воздуха $G_в$ при различных коэффициентах избытка воздуха α в газовоздушной смеси с различными положениями дроссельной заслонки $У_{др}$ и постоянным установочным углом опережения зажигания $\varphi_{оз}$ = 12° ПКВ

ОТОЗВАНО

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.50

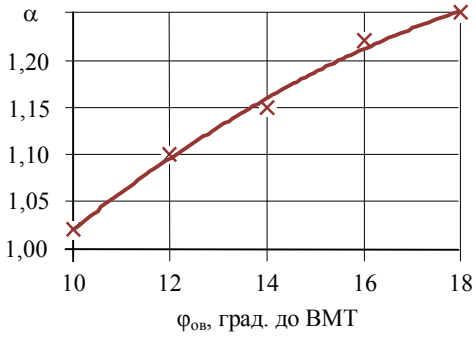


Рис.4. Изменение коэффициентов избытка воздуха α при различных углах опережения зажигания $\varphi_{оз}$ газового двигателя 8ГЧ12/12 и постоянной частоте вращения коленчатого вала $n = 2200$ мин$^{-1}$

Расход газа отражает работу газового дозатора от частоты вращения коленчатого вала (КВ) при работе по внешней скоростной характеристике с различными положениями газовоздушной заслонки.

При заданной частоте вращения, при неизменном эффективном коэффициенте полезного действия, расход теплоты, подведенной с газом, должен быть постоянным [25]. Кривые, приведенные на (рис.2), указывают на различие расходов газа при одних и тех же значениях частоты вращения, следовательно, должен различаться и эффективный КПД.

Коэффициент избытка воздуха является одним из основных параметров, определяющих условия сгорания в двигателях с принудительным воспламенением. В таких двигателях увеличение коэффициента избытка воздуха уменьшает скорость распространения пламени, способствуя затягиванию процесса сгорания с соответствующим ухудшением КПД [24]. Зависимость коэффициента избытка воздуха в газовоздушной смеси от частоты вращения при работе по внешней скоростной характеристике показана на рис.3.

Очевидным результатом является увеличение коэффициента избытка воздуха с уменьшением частоты вращения. При минимальных скоростях вращения и нагрузках коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1{,}3 \div 1{,}35$, т.е. приближается к пределу воспламеняемости смеси. С помощью дросселирования на впуске удается снизить коэффициенты избытка воздуха (α), что положительно сказывается на значениях КПД [17].

Следует обратить внимание на то, что при принятых условиях эксперимента существует взаимосвязь между КПД и коэффициентом избытка воздуха: рост избытка воздуха снижает КПД, при этом увеличивается расход газа, влияющий на избыток воздуха в обратном направлении.

Наблюдаемое на рис.4 уменьшение избытка воздуха при малых углах опережения определяется тем, что при практически постоянном расходе воздуха увеличивается расход газа, необходимый для сохранения мощности. Эта совокупность факторов должна учитываться при оценке причин влияния различных факторов на КПД двигателя.

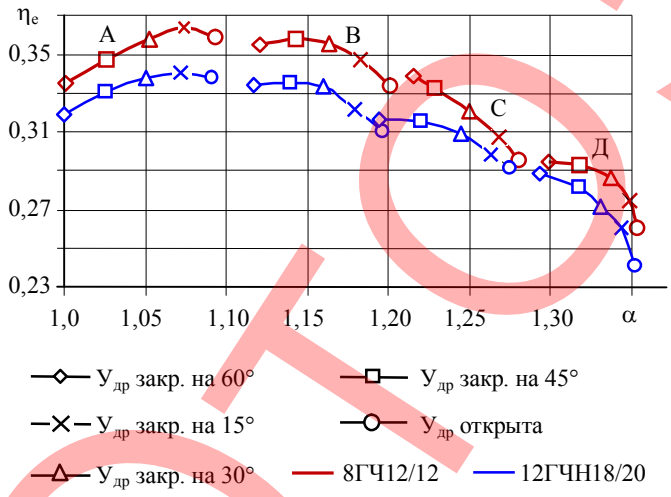


Рис.5. Зависимость эффективного КПД от коэффициента избытка воздуха при различных положениях газовоздушной заслонки в условиях работы газовых двигателей по внешней скоростной характеристике с постоянными установочными углами опережения зажигания

8ГЧ12/12: $\varphi_{оз} = 12°$ ПКВ, А = 2200 мин$^{-1}$, В = 1800 мин$^{-1}$, С = 1500 мин$^{-1}$, 57 кВт, Д = 1200 мин$^{-1}$;
12ГЧН18/20: $\varphi_{оз} = 21 \div 22°$ ПКВ, А = 1500 мин$^{-1}$, В = 1300 мин$^{-1}$, С = 1150 мин$^{-1}$, 57 кВт, Д = 1000 мин$^{-1}$ [17];
А, В, С, Д – частота вращения коленчатых валов двигателей

Эффективный КПД η_e определяется протеканием рабочего процесса и механическими потерями. При прочих равных условиях протекание рабочего процесса в поршневом двигателе зависит, главным образом, от состава смеси, поэтому значения КПД при работе по внешней скоростной характеристике нанесены в функции коэффициента избытка воздуха (рис.5).

Общая тенденция к снижению КПД по мере перехода к малой частоте вращения КВ определяется относительным увеличением механических потерь, поскольку зависимость момента потерь от частоты вращения – линейная, а эффективного момента – квадратичная. Поэтому судить здесь о влиянии состава смеси на КПД можно лишь по точкам, соответствующим постоянным значениям частоты вращения [10, 26].

Сравнение кривых рис.5 позволяет сделать вывод, что максимум эффективного КПД на различных участках скоростной ха-

ОТОЗВАНА

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.50

рактеристики соответствует разным положениям газовоздушной заслонки. Так, при малых значениях частоты вращения максимум КПД соответствует закрытому положению заслонки, по мере приближения к номинальному режиму работы максимум КПД смещается в область открытого положения заслонки. Очевидной причиной является уменьшение скорости распространения пламени при большом избытке воздуха. Согласно этому можно сделать вывод о необходимости смешанного качественно-количественного регулирования для обеспечения максимально эффективного КПД во всем диапазоне частоты вращения двигателя [23].

На рис.6 и 7 приведены массовый расход газового топлива, соотношения количества подведенной теплоты; при этом по оси абсцисс отложены фактические углы начала подачи, определенные по индикаторным диаграммам [10]. Зависимости показывают, что у судового двигателя 12ГЧН18/20 часовой расход топлива в 4-5 раз больше, чем у двигателя 8ГЧ12/12.

При уменьшении угла начала подачи топлива на 8,5 град. расход газового топлива возрастает приблизительно на 40 %, такой рост объясняется падением эффективного КПД при уменьшении фактического угла опережения зажигания (рис.8).

На основании приведенных данных можно утверждать, что предпочтительными являются режимы меньших углов опережения зажигания, поскольку среднее эффективное давление достигается при меньших расходах газа. Рост эффективного КПД при увеличении угла опережения зажигания для газового режима хорошо согласуется с теоретическими предпосылками. При сравнении эффективного КПД для газового режима обращает на себя внимание тот факт, что работа по газовому рабочему циклу при углах опережения зажигания менее 19 град. до ВМТ приводит к снижению КПД. Различный характер влияния угла опережения на КПД объясняется различными механизмами сгорания в газовом двигателе [13, 15, 16].

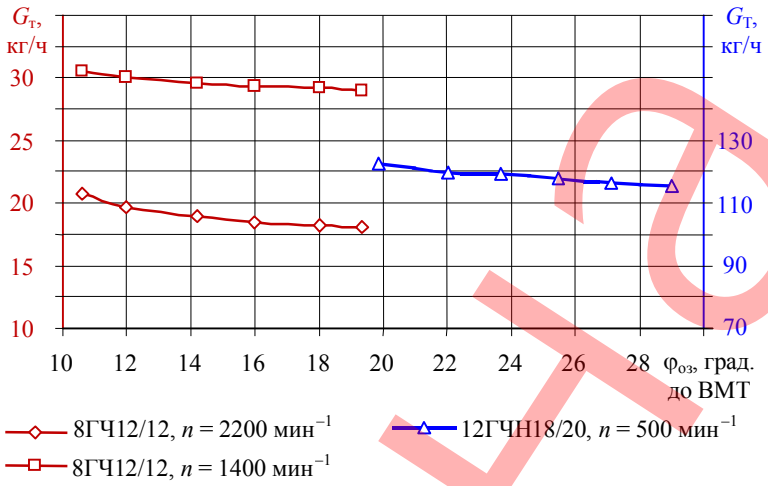


Рис.6. Расход газового топлива $G_т$ на среднем и номинальном режимах работы ГД при различных углах опережения зажигания $\varphi_{оз}$, коэффициенте избытка воздуха α = 1,25 и положении дроссельной заслонки $У_{др}$ = 25 %

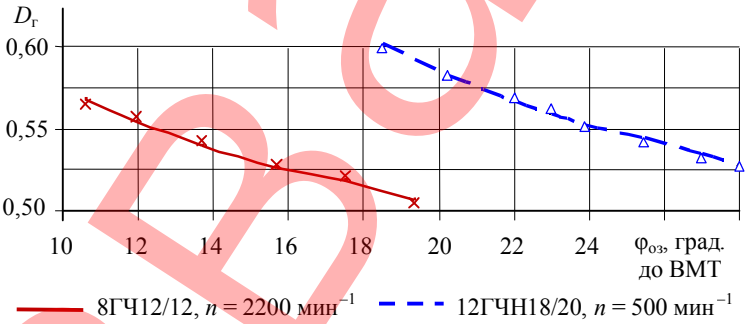


Рис.7. Доля теплоты $D_г$, подведенной с газовым топливом, при различных углах опережения зажигания и постоянных значениях частоты вращения КВ

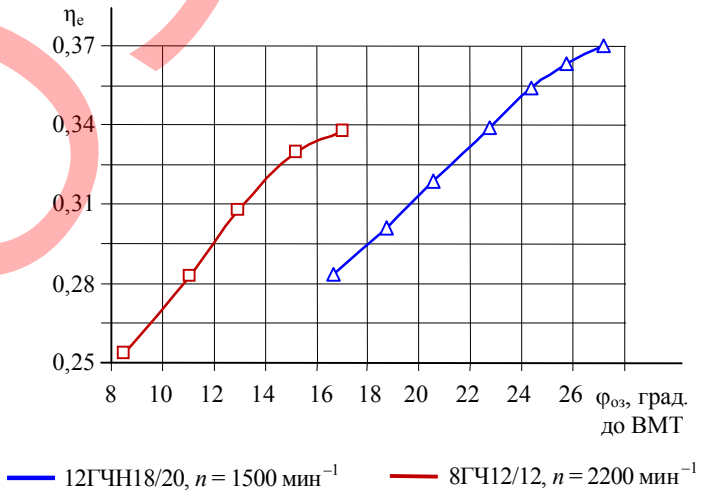


Рис.8. Эффективный КПД в зависимости от угла опережения зажигания при постоянных оборотах КВ

Отозвана

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.50

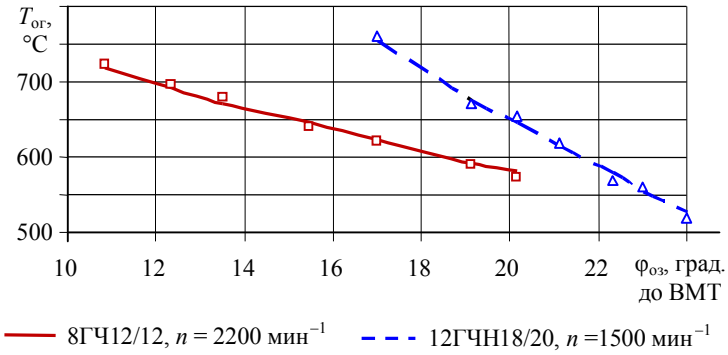


Рис.9. Температура отработавших газов в зависимости от угла опережения зажигания при постоянных оборотах КВ

Температура отработавших газов газового двигателя при больших углах опережения уменьшается. С уменьшением фактического угла опережения зажигания температура в газовом двигателе возрастает быстрее (рис.9). Это вполне согласуется с соответствующими данными по коэффициенту избытка воздуха.

Заключение. Анализ развития горной промышленности и результаты экспериментальных исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Структурная перестройка в минерально-сырьевых и топливо-энергетических отраслях промышленности свидетельствует о все большем использовании газовых двигателей.

2. Перевод дизельного двигателя на газовый рабочий процесс обеспечивает возможность сохранения мощности базового двигателя без ухудшения показателей экономичности и существенного повышения нагрузок на детали кривошипно-шатунного механизма.

3. Основными факторами, влияющими на протекание рабочего процесса, являются применение смешанного регулирования газовоздушной смеси, использование дополнительного информационно-измерительного канала системы электронного управления ГД, угол опережения зажигания, а также изменение коэффициента избытка воздуха. Последний фактор играет решающую роль в изменении параметров двигателя при работе по нагрузочной характеристике.

4. Данные, полученные при исследовании влияния дросселирования газовоздушной смеси на эффективный КПД, позволяют сделать вывод о предпочтительности смешанного регулирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Афанасьев А.С.* Влияние режимов использования дизеля на дымность отработавших газов / А.С.Афанасьев, Р.Т.Хакимов, С.М.Загорский // Технико-технологические проблемы сервиса. 2014. № 2 (28). С. 56-58.

2. *Афанасьев А.С.* Моделирование процессов энергопреобразования дизельных двигателей / А.С.Афанасьев, А.А.Третьяков // Записки Горного института. 2016. Т. 222. С. 839-844.

3. *Афанасьев А.С.* Обоснование режимов оценки экологической безопасности дизелей автомобильной техники / А.С.Афанасьев, Р.Т.Хакимов, С.М.Загорский // Вестник Таджикского технологического университета. 2015. № 3 (31). С. 225-227.

4. *Асланян Г.С.* Программа расчета состава, термодинамических и переносных свойств многокомпонентных химически реагирующих гетерогенных систем / Г.С.Асланян, П.П.Иванов, С.С.Мунвез. Препринт ИВТАН. № 2-374. М.: ИВТАН, 1994. 54 с.

5. *Дидманидзе О.В.* Энергетические установки автомобиля нового поколения / О.В.Дидманидзе, С.А.Иванов, С.В.Козлов // Приводная техника. 2014. № 4. С. 36-53.

6. *Долганов К.Е.* Система питания и регулирования для переоборудования дизелей в газодизели / К.Е.Долганов, А.А.Лисовал, Ю.И.Колесник // Двигателестроение. 1995. № 2. С. 6-10.

7. *Жоу Д.* Расширенная необратимая термодинамика / Д.Жоу, Х.Касас-Баскес, Дж.Лебон. М. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хоатическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2006. 528 с.

8. *Зайченко В.М.* Пиролиз на углеродных матрицах / В.М.Зайченко, И.Л.Майков. М.: ООО «Издательский дом Недра», 2014. 235 с.

9. Интервью с генеральным директором НП «Горнопромышленники России» А.П.Вержанским // Горная промышленность. 2017. № 6 (136). С. 30.

10. *Иссерлин А.С.* Основы сжигания газового топлива: Справочное руководство. Л.: Недра, 1980. 263 с.

11. *Кочинев Ю.Ю.* Техника и планирование эксперимента / Ю.Ю.Кочинев, В.А.Серебренников. Л.: ЛПИ, 1986. 70 с.

12. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. 7-е изд. М.: Дрофа, 2003. 840 с.

13. *Майков И.Л.* Математическое моделирование. Гидродинамика. Химическая кинетика. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. 215 с.

14. Математическое моделирование гидродинамики и теплообмена в движущихся жидкостях: Монография / И.В.Кудинов, В.А.Кудинов, А.В.Еремин, С.В.Колосенков; под. ред. Э.М.Карташова. СПб: Лань, 2015. 208 с.

15. *Михеев В.П.* Газовое топливо и его сжигание. Л.: Недра, 1966. 327 с.

16. *Николаенко А.В.* Математическое моделирование и расчет рабочего процесса газовой модификации дизеля // А.В.Николаенко, Р.Т.Хакимов // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей: Сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. СПб: СПбГАУ, 2006. С. 363-387.

17. *Николаенко А.В.* Энергетические установки и машины. Двигатели внутреннего сгорания: Учеб. пособие / А.В.Николаенко, В.С.Шкрабак. СПб: СПбГАУ, 2004. 438 с.

СТОЭВАНО

DOI: *10.25515/PMI.2018.1.50*

18. *Прибытков И.А*. Теоретические основы теплотехники / И.А.Прибытков, И.А.Левицкий. М.: Академия, 2004. 464 с.
19. *Русинов Р.В.* Двигатели автомобилей и тракторов. Устройство и расчет систем двигателей. СПб: СПбГТУ, 1998. 120 с.
20. *Хакимов Р.Т.* Влияние характеристик выгорания на показатели рабочего цикла газового двигателя при использовании электронной системы управления // Грузовик. 2008. № 4. С. 27-29.
21. *Цой П.В.* Системные методы расчета краевых задач тепломассопереноса. М.: Изд-во МЭИ, 2005. 568 с.
22. *Шашков А.Г.* Волновые явления теплопроводности: системно-структурный подход / А.Г.Шашков, В.А.Бубнов, С.Ю.Яновский; 2-е изд., доп. М.: Едиториал УРСС, 2004. 296 с.
23. *Liss W.E.* Natural Gas as a Stationary Engine and Vehicular Fuel / W.E.Liss, W.H.Thrasher. SAE Technical Paper 912364. v. SP-888, 1991. URL:https://doi.org/104271/912364 (date of access 5.05.2017).
24. Strategic assessment aspect of vehicles' technical condition influence upon the ecosystem in regions / R.Khakimov, S.Shirokov, A.Zykin, E.Vetrova. // Transportation Research Procedia 12th International Conference «Organization and Traffic Safety Management in Large Cities», SPbOTSIC-2016. 2017. P. 295-300.
25. Study on Performance and Exhaust Gas Characteristics of Directly Injected CNG Engine / W.Lee, Doo-Sung Baik, T.Rogers, P.Petersen // International Journal of Bio-Science and Bio-Technology. 2014. Vol. 6. N 2. P.179-186.
26. *Weaver C.S.* Dual Fuel Natural Gas/Diesel Engines: Technology, Performance, and Emissions / C.S.Weaver, S.H.Turner. SAE Paper Number 940548, 1994. URL:https://doi.org/104271/940548 (date of access 5.05.2017).

***Авторы*: О.Н.Дидманидзе**, *д-р* техн. *наук*, *профессор*, член-кор. РАН, *didmanidze@rgau-msha.ru* (*Российский государственный аграрный университет им. К.А.Тимирязева*, *Москва*, *Россия*), **А.С.Афанасьев**, *канд. воен. наук*, *профессор*, *a.s.afanasev@mail.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*), **Р.Т.Хакимов**, *канд. техн. наук*, *доцент*, *haki7@mail.ru* (*Санкт-Петербургский государственный аграрный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*).
Статья принята к публикации 24.05.2017.

Отозвана