

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ И СНИЖЕНИЕ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ДИЗЕЛЯ НА РЕЖИМАХ ПОСТОЯННОЙ МОЩНОСТИ

А. Е. Свистула, Г. Д. Матиевский

Предлагается выбор способа корректировки зависимости оптимальной частоты вращения коленчатого вала от мощности двигателя. Показаны особенности работы дизеля по оптимизационной характеристике для решения задач снижения расхода топлива и токсичности отработавших газов на режимах постоянной мощности. Получена зависимость относительной оптимальной частоты вращения и потенциального снижения удельного расхода топлива от уровня мощности двигателя. Дан анализ снижения токсичности отработавших газов при работе дизеля по оптимизационной характеристике.

Ключевые слова: дизель, двигатель постоянной мощности, оптимизационная скоростная характеристика, удельный эффективный расход топлива, вредные выбросы двигателя

Важной научно-технической проблемой современного двигателестроения является обеспечение постоянно ужесточающихся норм по расходу топлива и токсичности отработавших газов (ОГ). Она решается комплексом разноплановых мероприятий, в том числе, выполнением ряда специфичных, связанных с особенностями работы потребителя. Так в дизель-генераторах с всережимным генератором и преобразователем частоты, используемых в энергетических комплексах на базе гибридных энергоустановок, предпочтительна работа дизеля по оптимизационной характеристике, обеспечивающей наименьший расход топлива на заданной мощности. Для дизелей промышленного и сельскохозяйственного назначения необходимо иметь значение коэффициента приспособляемости порядка 1,4, что дает преимущества в тягово-экономических показателях и разгонных качествах машино-тракторного агрегата.

Задачи оптимизации скоростного режима и условий обеспечения необходимого значения коэффициента приспособляемости по расходу топлива и воздуха имеют единый подход к решению. Он основан на проведении расчетно-экспериментальных исследований характеристик постоянной мощности (ХПМ) и разработке мероприятий, повышающих экономические и экологические показатели дизеля на этих режимах [1]. **Целью работы** является снижение расхода топлива и токсичности отработавших газов на режимах постоянной мощности оптимизацией частоты вращения коленчатого вала и регулировочных параметров топливной аппаратуры.

Экспериментальная установка и методика

Испытания опытного одноцилиндрового дизеля УК-2 размерностью 130/140 проводились

в лаборатории кафедры ДВС АлтГТУ им И.И. Ползунова, а многоцилиндровых – в лабораториях СКБ ОАО «ПО «АМЗ».

На электротормозной установке с дизелем УК-2 обеспечивалась имитация наддува, и осуществлялась работа с топливоподающей аппаратурой непосредственного действия типовой, опытной и аккумуляторной высокого давления (до 1800 бар) типа CR.

Система CR имела типовое исполнение и укомплектована в основном узлами отечественного производства. Электрогидравлическая форсунка, аккумулятор и топливопроводы высокого давления производства Алтайского завода прецизионных изделий (АЗПИ). Блок управления работой дизеля выполнен фирмой «Абит» (С.-Петербург). Программа управления с ключом доступа позволяет вносить оперативные изменения в таблицы калибровок, что обеспечивает управление параметрами топливоподачи во время работы дизеля.

В основу методики исследований положен сравнительный метод. Сбор, обработка и хранение данных быстропротекающих процессов осуществляется компьютерным комплексом Н-2000. Анализ индикаторного и эффективного КПД дизеля выполнен по методике и программе, разработанной на кафедре ДВС АлтГТУ им. И.И. Ползунова, основанной на использовании уравнения

$$h_e = 1 - \Delta X_{nn} - d_{\text{э}} - d_{nc} - d_k - d_w - \frac{l_{mp}^{n_2} - l_{mp}^n - l_a - l_{nn} - l_o - l_n - l_{np}}{1}, \quad (1)$$

и позволяет дифференцировать потери ΔX_{nn} и неиспользование теплоты в цикле $\sum d_i$, а также затраты индикаторной работы на преодоление

механических потерь в двигателе $\sum l_m$ на составляющие: в эталонном цикле δ_z от несвоевременности сгорания $\delta_{нс}$, от изменения показателя адиабаты δ_k , от теплообмена δ_w , трение в цилиндро-поршневой группе l_{mp}^{nz} , трение в подшипниках $l_{мп}^n$, привод агрегатов l_a , насосные потери $l_{нп}$ и прочие [2].

Методика построения ХГМ

По влиянию на величину коэффициента приспособляемости K_n , характер изменения $\eta_e = f(n)$, величину максимума КПД η_e при выборе оптимизационной функции $n_{опт} = f(N_{econst})$ можно выделить две зоны ХГМ с мощностью большей и меньшей $N_{econst} = (0,75-0,80) N_{eном}$.

Для ХГМ обеих зон характерно наличие наименьшего расхода топлива при некоторой частоте $n_{опт}$ и ее снижение с уменьшением мощности N_{econst} . Разделяющая их ХГМ с $N_{econst} = (0,75-0,80) N_{eном}$ отличается пологостью $g_e = f(n)$, высокими значениями КПД η_e и достижением коэффициента $K_n = 1,4$ только корректировкой топливоподачи [3-5]. В первой зоне мощностей $N_{econst} > (0,75-0,80) N_{eном}$ зависимость $g_e = f(n)$ пологая с приемлемыми значениями КПД η_e со слабо выраженным максимумом в относительно узком диапазоне частот $n_m \div n_n$ и соответственно с коэффициентом приспособляемости $K_n < 1,4$. Последний снижается до 1 с увеличением мощности N_{econst} до номинальной $N_{eном}$. Для внешней скоростной характеристики (ВСХ) за оптимальную частоту $n_{опт}$ можно принять постоянную номинальную частоту n_n или n_m из зависимости $N_e = f(n)$.

Создание ХГМ с коэффициентом $K_n = 1,4$ невозможно без расширения поля режимов работы и соответствующего изменения вида ВСХ организацией на ней участка постоянной мощности $N_{econst} = N_{en}$ в диапазоне частот $(1,0-0,7)n_n$. Для чего необходимо исключить главную причину снижения индикаторного (и эффективного) КПД – падение расхода воздуха с уменьшением частоты n меньше значения n_n , что осуществимо только с введением регулируемого наддува.

Во второй зоне с $N_{econst} < (0,75-0,80) N_{eном}$ достигаются значения коэффициента $K_n > 1,4$, отмечается снижение КПД η_e , особенно заметное на режимах высоких частот n и малых мощностей N_{econst} по причине низкого механического КПД. Явно выражен максимум КПД η_e при $n_{опт}$. В этой зоне мощностей реализация ХГМ нецелесообразна. Предпочтительнее работа дизеля по

оптимизационной скоростной характеристике с наибольшим КПД η_e для заданных значений N_{econst} [3-5].

Итак, в зоне высоких мощностей $N_{econst} \geq (0,75 \div 0,80) N_{eном}$ целесообразна работа двигателя по ХГМ, в зоне малых мощностей – работа на скоростном режиме $n_{опт}$ наилучшей экономичности.

Анализом КПД по статьям неиспользования теплоты в цикле и затратам работы на преодоление механических потерь по ХГМ дизеля 4ЧН 13/14 в зоне мощностей $N_{econst} \geq 0,80 N_{eном}$, представленными на рисунке 1, выявлены наибольшие потенциальные возможности повышения КПД уменьшением коэффициентов несвоевременности сгорания $\delta_{нс}$, изменения показателя адиабаты $\delta_k = \delta_t \delta_c$, отвода теплоты теплообменом δ_w и насосных потерь $l_{нп}$ [2].

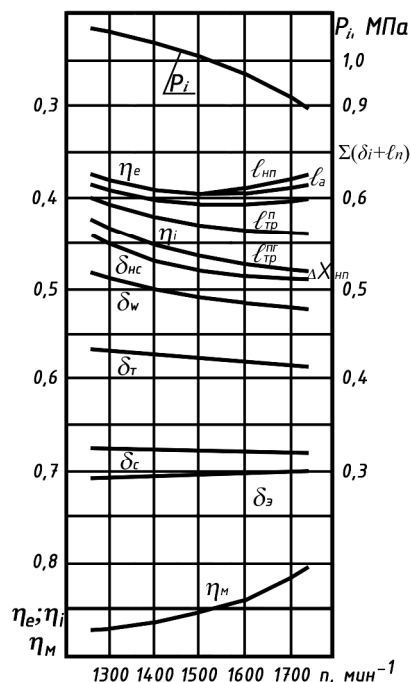


Рисунок 1 – Анализ эффективного КПД дизеля 4ЧН13/14 по ХГМ [2]

Разработка методики определения оптимизационной зависимости $n_{опт} = f(N_{econst})$ и потенциального эффекта в снижении расхода топлива основана на учете значения мощности N_{econst} и принятого условия построения ВСХ. Если условие – получение N_{emax} для каждой частоты n , то в диапазоне $N_{econst} \geq (0,7 \div 1,0) N_{eном}$ – это нагрузочная характеристика с $n = n_n = const$, для мощностей менее $0,7 N_{eном}$ – это настроенная

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ И СНИЖЕНИЕ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ДИЗЕЛЯ НА РЕЖИМАХ ПОСТОЯННОЙ МОЩНОСТИ

переменная частота n_{onm} . Если условие – максимальная экономичность, то оптимизационная характеристика есть ВСХ. Если комбинация условий (сначала по экономичности, затем по мощности), то при $N_{econst} \geq (1,0 \div 0,70) N_{eном}$ – это ВСХ, при меньшей мощности – настройка оптимальной частоты. Настройка сводится к расчету частоты, для которой загрузка двигателя по заданному значению N_{econst} будет составлять $K_3 = 70 \div 80$ % от развиваемой мощности на ВСХ по известному выражению [6] (2)

$$\frac{1}{K_3} = \frac{N_{eном}}{N_{econst}} \left[b \left(\frac{n}{n_H} \right)_{onm} + d \left(\frac{n}{n_H} \right)_{onm}^2 - \left(\frac{n}{n_H} \right)_{onm}^3 \right],$$

здесь β и δ коэффициенты в аппроксимационной зависимости мощности от частоты для ВСХ.

Результаты экспериментального исследования по снижению расхода топлива и токсичности ОГ на режимах ХПМ

Для двигателя постоянной мощности (ДПМ) на базе 4Ч 13/14 выполнено построение ХПМ с уровнями мощности номинальным и $0,8 N_{eном}$ по методике, основанной на использовании функциональных зависимостей индикаторного КПД η_i и среднего давления механических потерь от коэффициента избытка воздуха (для η_i), эффективного давления и частоты вращения вала. Полученные зависимости (рисунок 2) устанавливают изменения основных факторов обеспечения работы дизеля по ХПМ – это часового расхода топлива G_m и давления наддува P_k . Для обоих вариантов расчета достаточно полагая зависимость $g_e = f(n)$ допускает построение управления подачей топлива по ХПМ из условия постоянства часового расхода топлива. В варианте $N_{econst} = N_{eном}$ необходимо в диапазоне частот $n_H - n_M$ обеспечить увеличение давления наддува порядка 20 % от значения P_k в номинальном режиме.

Выбор варианта оптимизационной зависимости осуществлен проведением экспериментальных исследований на дизеле 6ЧН13/14. Результаты исследований на рисунке 3 подтверждают предпочтительность (в случае наименьшего расхода топлива) оптимизации частоты по варианту ОВСД как комбинации ВСХ (линия ОВ) при $N_{econst} = (1,0 - 0,65) N_{eном}$ и ветви СД настройки n_{onm} по выражению (2) при $N_{econst} < 0,65 N_{eном}$ в полном соответствии с условиями построения характеристики этого дизеля: на высоких частотах – обеспечение экономичности, на пониженных – достижение мощности.

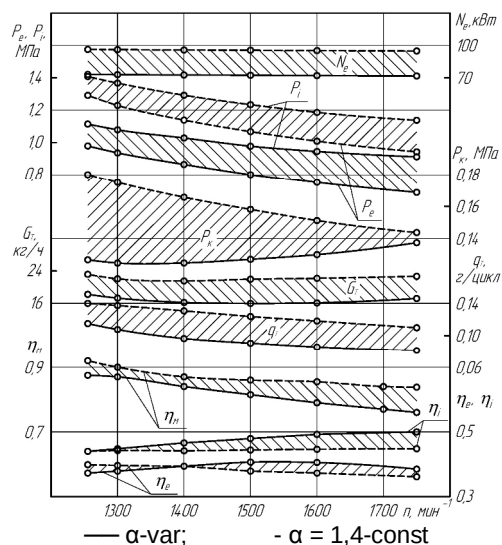


Рисунок 2 – Расчётная внешняя скоростная характеристика ДПМ 4ЧН13/14

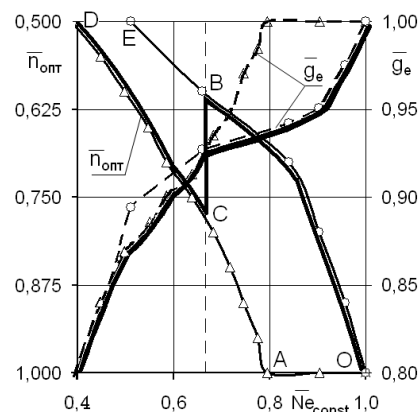


Рисунок 3 – Оптимизационная частота $\bar{n}_{onm}$ и эффект снижения расхода топлива $\bar{g}_e$ в зависимости от мощности $\bar{N}_{econst}$ для вариантов оптимизации

В этом варианте оптимизации частоты снижение g_e по отношению к расходу на нагрузочной характеристике (НХ) при $n = n_H$ происходит во всем диапазоне уменьшения мощности и достигает 20 % при $N_{econst} = 0,4 N_{eном}$. Вместе с тем, содержание окислов азота (рисунок 4) оказывается выше на участке ОВ работы двигателя по ВСХ как по прямым измерениям, так и по приведенным (на 30-40 %) к одинаковым расходам воздуха с нагрузочной характеристикой при $n = n_H$.

Эффективность использования аккумуляторной системы впрыска топлива CR в сравнении с типовой системой непосредственного действия выяснялась испытаниями на одноцилиндровом отсеке. Результаты сравнительных испытаний на рисунке 5 показывают, что с системой CR при давлении впрыска до 120 МПа расход топлива

снизились в среднем на 4-5 % во всем диапазоне частот ХПМ с коэффициентом приспособляемости $K_p=1,4$. Косвенное подтверждение этому – уменьшение температуры ОГ на 50-70 °С. «Жесткость» $(dp/d\varphi)_{max}$ и максимальное давление сгорания $P_{z\ max}$ возросли в среднем на 25 % и 1 МПа на пониженных частотах при одновременном сокращении периода задержки воспламенения примерно на 15-20 %. Существенно снизилось содержание продуктов неполного сгорания по окислам углерода (на 30-50) % и, в особенности, по саже (в 1,5 раза) на средних и высоких частотах и в несколько раз на малых. Значительно, в 1,7-2 раза, возросло содержание окислов азота, что согласуется с увеличением динамики цикла.

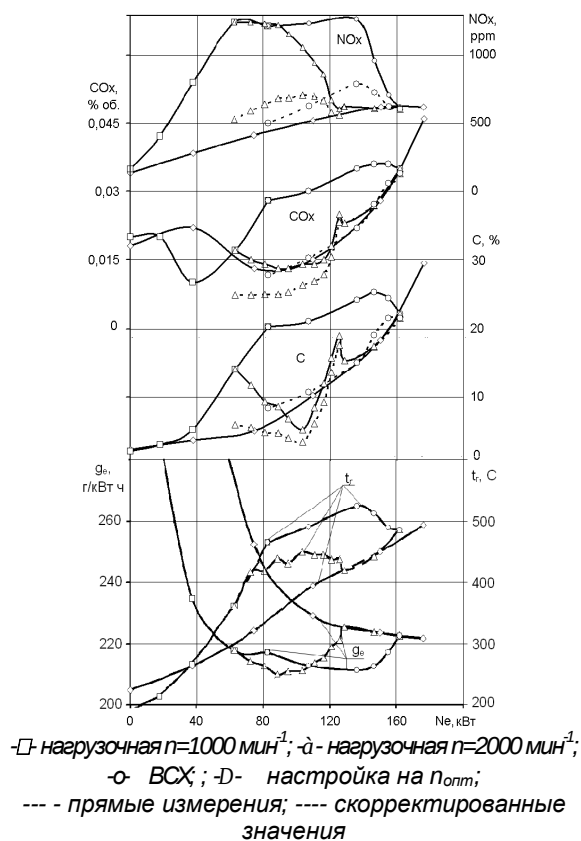


Рисунок 4 - Зависимости удельного расхода топлива, температуры газов, содержания вредных веществ в ОГ по характеристикам

В качестве мероприятий, уменьшающих выход окислов азота, рассматривается оптимизация регулировок по давлению P_{fuel} и углу опережения впрыска топлива. Для чего получены соответствующие регулировочные характеристики на режимах ХПМ с $n = 1750, 1500$ и 1250 мин^{-1} для значений давления P_{fuel} и угла опережения впрыска топлива (УОВТ) в интервалах 60-160 МПа и 0-20 ° до ВМТ.

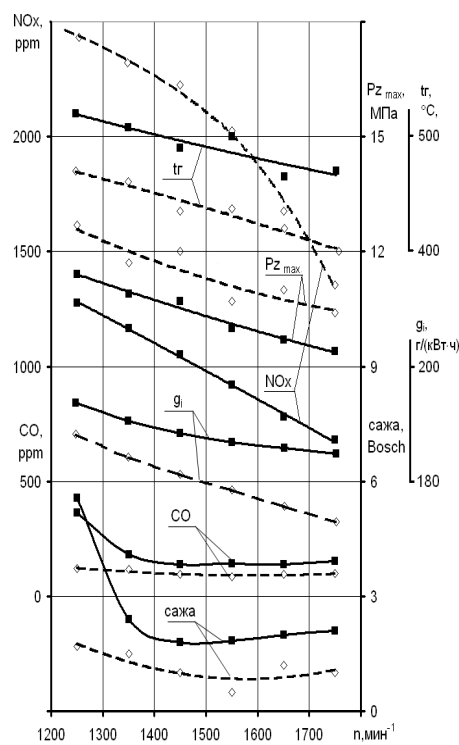


Рисунок 5 - Показатели работы дизеля 1С 13/14 по ХПМ

Типичный характер влияния давления P_{fuel} на показатели работы дизеля представлен на рисунке 6.

Существует зона давления P_{fuel} , в которой оно наиболее существенно влияет на показатели экономичности. Для данного режима это - 60-110 МПа. Рост P_{fuel} более 110 МПа практически не изменяет КПД η_i , мало влияет на содержание СО и сажи, существенно увеличивает выход NO_x , максимальные значения давления и температуры в цилиндре. Для их снижения в диапазоне частот 1250-1750 мин^{-1} рекомендовано линейное изменение давления P_{fuel} от 100-110 МПа до 130-140 МПа и УОВТ от 8-10° до 14-16° до ВМТ. Однако, даже при настройке P_{fuel} и УОВТ на меньшие значения, не выходящие из зоны слабого влияния на КПД η_i , снизить содержание NO_x до уровня штатной топливной аппаратуры не удастся. Оно оказывается выше на 30 %. Для дальнейшего снижения содержания NO_x можно рекомендовать использование каталитического нейтрализатора окисного типа. Такое решение предопределено высокими значениями температур ОГ при работе на режимах ХПМ и низким содержанием продуктов неполного сгорания при использовании системы CR. Достижимый эффект – снижение NO_x не менее 40 %, дополнительное снижение окиси углерода СО и углеводородов C_xH_y ; температура отрабо-

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ И СНИЖЕНИЕ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ДИЗЕЛЯ НА РЕЖИМАХ ПОСТОЯННОЙ МОЩНОСТИ

тавших газов на режимах ХПМ и оптимизационной должна составлять 400-550 °С [7].

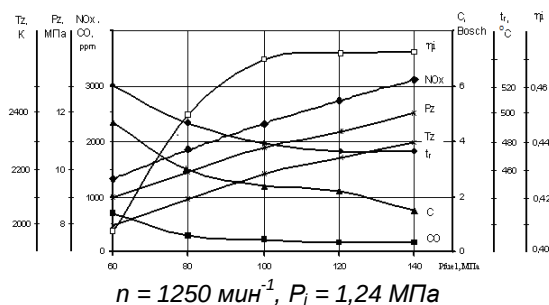


Рисунок 6 - Характеристика по давлению впрыска топлива P_{fuel}

Основные результаты и выводы

1 Предложена классификация ХПМ по значению мощности N_{const} как основного фактора, определяющего величину коэффициента приспособляемости K_n , вид зависимости $\eta_e = f(n)$ и величину КПД η_e , выбор оптимизационной частоты $n_{opt} = f(N_{const})$.

Выделены две зоны ХПМ, разделяемые ХПМ с $N_{const} = (0,75 \div 0,80) N_{ном}$, отличающейся пологостью $\eta_e = f(n)$, высокими значениями КПД η_e и величиной коэффициента $K_n = 1,4$. Ее можно реализовать в двигателях с двумя уровнями мощности корректировкой топливоподачи.

2 Разработанная методика поиска оптимальной частоты применительно к дизелям производства ОАО «ПО «АМЗ» позволила выявить возможность повышения КПД мероприятиями, уменьшающими неиспользование теплоты от несвоевременности сгорания, теплообмена и уменьшения показателя адиабаты и снижающими насосные потери; определить алгоритм управления цикловой подачей топлива (из условия постоянства часового расхода топлива) и давлением наддува; предложить алгоритм зависимости $n_{opt} = f(N_{const})$, согласованный с особенностями комбинационного варианта построения ВСХ.

3 Экспериментальными исследованиями дизеля Д-461 подтверждено прогнозируемое получение наибольшей экономии топлива при работе по предлагаемой оптимизационной зависимости $n_{opt} = f(N_{const})$.

4 На режимах ХПМ повышение давления впрыска P_{fuel} системой типа CR является эффективным средством снижения сажи и продуктов неполного сгорания (в два и более раза) при увеличении топливной экономичности до 6 %.

Одновременно в (1,7-2,0) раза, возрастает содержание NO_x . Предложен алгоритм оптимизации

защиты давления и угла впрыска топлива, позволяющий без снижения положительного эффекта воздействия на экономичность и продукты неполного сгорания существенно уменьшить содержание NO_x . Для дальнейшего снижения содержания NO_x рекомендовано использование каталитического нейтрализатора окисного типа с эффектом очистки от окислов азота не менее 40 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Матиевский, Г.Д. Скоростная характеристика дизеля в режиме постоянной мощности / Г.Д. Матиевский // Повышение экологической безопасности автотракторной техники: сб. статей; АлтГТУ. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2010. - С. 84- 89.
- 2 Матиевский, Г.Д. Анализ показателей работы дизеля по характеристике постоянной мощности / Г.Д. Матиевский, С. П. Кулманаков // Ползуновский вестник. - 2010. - № 1. - С. 13-20.
- 3 Любимов, А.Н. Использование внешней скоростной характеристики дизеля для анализа показателей работы на режимах постоянной мощности / Г.Д. Матиевский, А.Н. Любимов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - 2010. - № 2. - С. 260-267.
- 4 Свиштула, А.Е. Оптимизационная скоростная характеристика двигателя / Г.Д. Матиевский, А.Е. Свиштула // Вестник Сибирского отделения академии военных наук. - 2011. - № 10. - С. 111-117.
- 5 Свиштула, А.Е. Исследование оптимизационной скоростной характеристики двигателя постоянной мощности / Г.Д. Матиевский, А.Е. Свиштула // Двигатели внутреннего сгорания (Двигуни внутрішнього згорання). - 2011. - №2. - С.46-49.
- 6 Дьяченко, Н.Х. Быстроходные поршневые двигатели внутреннего сгорания / Н.Х. Дьяченко, С.Н. Райков, В.С. Мусатов, П.М. Белов, Ю.И. Будыко; под ред. д.т.н., проф. Н.Х. Дьяченко. - М., Л.: Машиностроение, 1962. - 359 с.
- 7 Матиевский, Г.Д. Выбор и исследование нейтрализатора отработавших газов на эффективность очистки для дизеля, работающего на режимах постоянной мощности с системой топливоподачи CR / В.А. Синецын, С.П. Кулманаков, Г.Д. Матиевский // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - 2011. - № 2. - С. 42-48.

Свиштула А.Е., д.т.н., проф., заведующий кафедрой ДВС, e-mail: Sae59@mail.ru

Матиевский Г.Д., инженер кафедры ДВС, e-mail: D21200403@mail.ru
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», 656038, Барнаул, просп. Ленина, 46, тел. (83852) 260516.