

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА И ЕГО СМЕСИ С БЕНЗИНОМ В ПОРШНЕВОМ ДВИГАТЕЛЕ

С.А. Плотников, д.т.н., профессор кафедры
А.С. Зубакин, аспирант
Вятский государственный университет

Проведены стендовые испытания искрового двигателя 1Ч6,8/5,4 при работе на бензине, генераторном газе и их смеси. Определены регулировочные, экономические и эффективные показатели работы двигателя. Выполнена обработка индикаторных диаграмм двигателя по методике ЦНИДИ с построением графиков тепловыделения. Установлено, что добавка до 70 % генераторного газа не ухудшает эффективных показателей двигателя, снижает его теплонапряженность, улучшает экологические показатели.

Традиционные углеводородные топлива, такие как бензин или дизельное топливо (ДТ) становятся менее доступным из-за уменьшения запасов нефти, сложности ее добычи и переработки. Значимым фактором является также энергетическая политика. Вполне приемлемая альтернатива бензину как топливу — генераторный газ (ГГ). Его использование позволяет заменить бензин в установках с ДВС, для которых снижение максимальной мощности не так критично, поскольку ее снижение может достигать 40 % [1, 2]. К таким установкам относятся стационарные двигатели для привода насосов, электрогенераторы и т. д. Генераторный газ, произведенный из отходов древесины, обладает низкой стоимостью и общедоступностью. Оборудование для его производства компактно и легко масштабируемо [2]. Из недостатков можно отметить низкую удельную теплоту сгорания, изменения химического состава при хранении. Эффективная работа ДВС на ГГ обеспечивается настройкой системы зажигания, модернизацией системы подачи топлива [3], для чего требуется детальное изучение процесса сгорания.

Анализ проведенных работ [2, 4] выявил недостаточно полные данные по процессу сгорания генераторного газа в ДВС. Это связано с несовершенством технической и материальной базы в начале и середине прошлого века. В настоящее время очень много внимания уделяется процессам сгорания природного газа, водорода и их смесей [4] и необоснованно мало — процессу сгорания

ГГ. Отсутствие в современной литературе материалов, описывающих работу ДВС на ГГ, несомненно тормозит дальнейшее использование данного альтернативного топлива.

Необходимо также отметить возможность снижения вредных выбросов при сгорании ГГ, и поскольку постоянное ужесточение экологических требований к выбросам вредных веществ с отработавшими газами (ОГ) касается не только транспортных средств, но и стационарных двигателей. Соответственно, применение ГГ — один из возможных способов повысить экологический класс двигателя [2].

Цель данной работы — исследование возможных пределов замены бензина на ГГ или его смесь с бензином с целью экономии нефтяного топлива без существенного снижения эффективных показателей ДВС, а также улучшения его экологических показателей.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- создание соответствующего испытательного стенда;
- разработка модернизированной системы питания и зажигания двигателя;
- проведение стендовых испытаний ДВС на ГГ и его смесях с бензином;
- исследование рабочего процесса на основе данных индицирования и характеристик тепловыделения.

Известно, что вне зависимости от вида сырья для получения ГГ, его химический состав примерно следующий (табл. 1).

Увеличение доли водорода H_2 в топливе обычно приводит к повышению его детонационной стойкости, замедлению процессов поджигания и горения смеси. Наличие большого количества азота N_2 в составе топлива также снижает скорость сгорания смеси. Таким образом, влияние

Таблица 1

Химический состав генераторного газа

Наименование сырья	Горючие компоненты, %				Балласт, %		
	H_2	C_nH_m	CO	CH_4	O_2	N_2	CO_2
Древесные чурки, $\omega = 20$ %	14–18	0,1–0,3	18–22	2,1–2,5	1,4–1,8	48–52	8–10

отмеченных компонентов на показатели процесса сгорания достаточно неопределенно.

Ранее выполненными исследованиями установлено, что химический состав генераторного газа достаточно нестабилен. Это усложняет расчет процесса его сгорания, а также получение устойчивых моторных характеристик. Для исключения отмеченного влияния все исследования проводились на древесном угле, показатели которого соответствовали ГОСТ 7657–84. Для получения генераторного газа был использован газогенератор (рис. 1, а) оригинальной конструкции [5–7].

В эксперименте использовался искровой двигатель воздушного охлаждения 1Ч6,8/5,4 в составе модернизированного испытательного стенда (рис. 1) на основе КИ-541 ГОСНИТИ. Запись индикаторных диаграмм производилась при помощи цифрового комплекса DiaMag-2 (рис. 2), включающего 6-канальный осциллоскоп, датчик индицирования, установленный в головке блока (рис. 2, поз. 1). Полученный цифровой сигнал в дальнейшем обрабатывался соответствующим программным обеспечением. Для защиты датчика

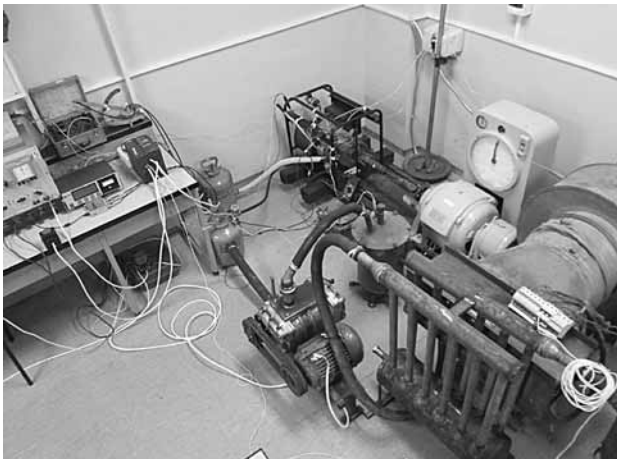


Рис. 1. . Общий вид испытательного стенда

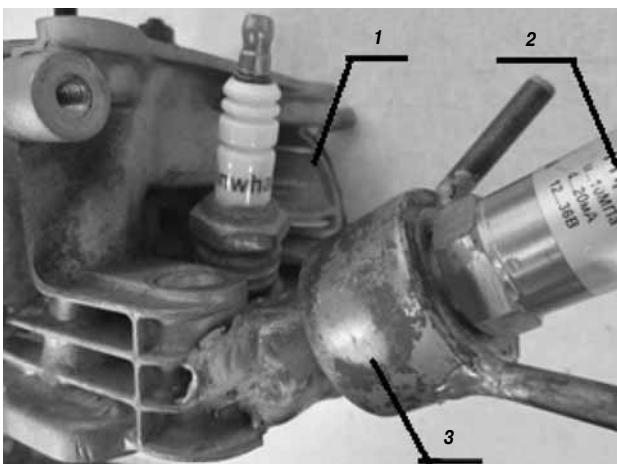


Рис. 2. Головка блока цилиндров:

1 – головка блока; 2 – холодильник; 3 – датчик давления

давления от высокой температуры использовался жидкостный теплообменник (рис. 2, поз. 3).

Положение ВМТ коленчатого вала определялось индуктивным датчиком типа 2112-3847010, определение момента искрообразования осуществлялось датчиком типа DIS-6. Температура отработавших газов (ОГ) измерялась термопарой TP-01А, объемы генераторного газа и воздуха измерялись расходомерами Вентури, состав ОГ — газоанализатором «Инфраклар» с функцией вывода результатов в графическом виде на компьютер. Системе зажигания была придана возможность регулирования угла опережения зажигания. Генераторный газ подавался через смеситель типа «тройник». Дополнительная подача бензина осуществлялась с помощью карбюратора, установленного последовательно со смесителем [3].

Первый этап стендовых испытаний предусматривал определение регулировочной характеристики двигателя по установочному углу опережения зажигания (рис. 3).

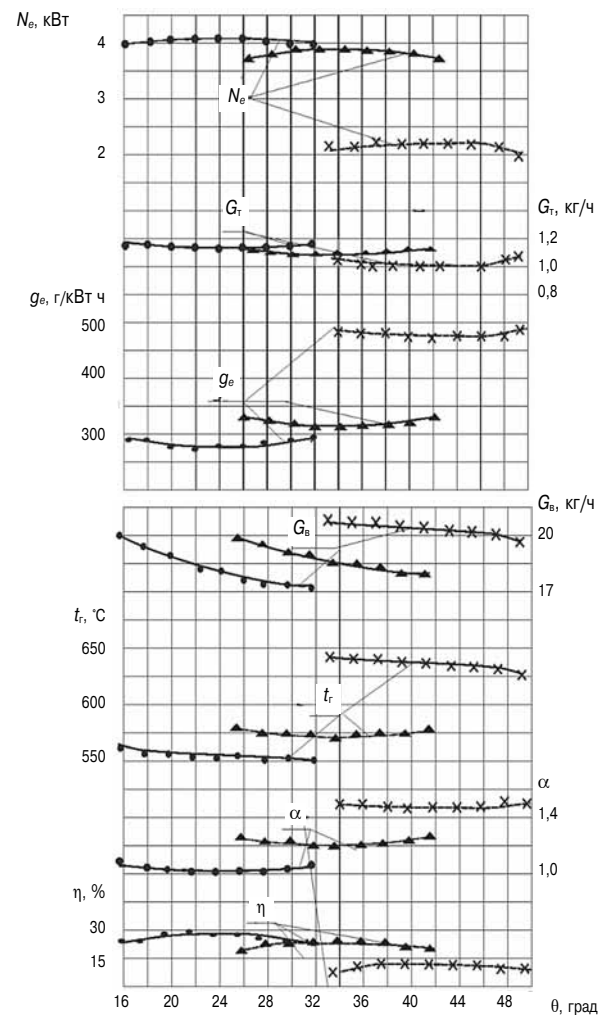


Рис. 3. Регулировочная характеристика двигателя 1Ч6,8/5,4 при $n = 3000$ об/мин:

● — бензин; × — генераторный газ; ▲ — 30 % бензин + 70 % генераторный газ

Оптимальное значение установочного угла опережения зажигания θ_3 для различных видов топлива определялось по значениям наименьшего удельного эффективного расхода топлива g_e и максимального значения эффективной мощности N_e для каждого вида топлива. Характеристика снималась не менее чем при восьми значениях θ_3 с шагом два градуса поворота коленчатого вала (ПКВ).

Как видно из графиков (рис. 3), максимальное значение эффективной мощности $N_e = 4,1$ кВт достигается при $\theta_3 = 25^\circ$ в случае работы на бензине, для генераторного газа, соответственно, эти значения равны $N_e = 2,3$ кВт при $\theta_3 = 40^\circ$. При ра-

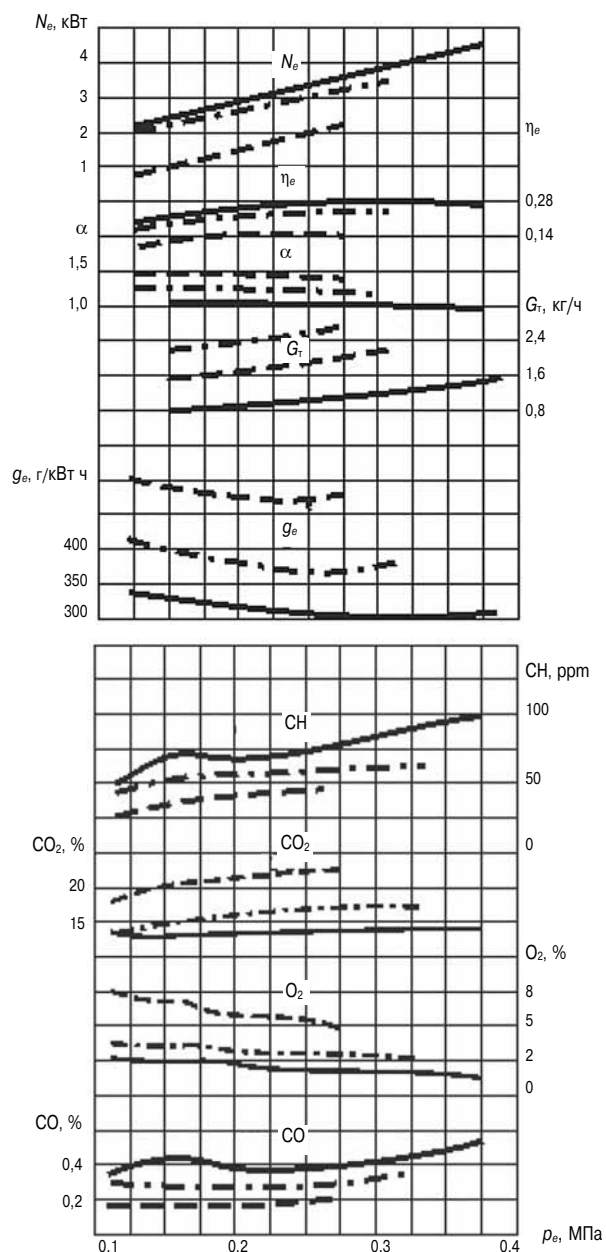


Рис. 4. Нагрузочные характеристики двигателя 1C6,8/5,4:
 — бензин; -- генераторный газ;
 - · - 30 % бензин + 70 % генераторный газ

боте на смешевом топливе максимальное значение эффективной мощности составляет $N_e = 3,6$ кВт при $\theta_3 = 34^\circ$. Минимальные значения удельного эффективного расхода топлива достигаются при этих углах и составляют, соответственно, $g_e = 275$ г/кВт·ч, $g_e = 468$ г/кВт·ч и $g_e = 329$ г/кВт·ч. Увеличение удельного эффективного расхода ГГ можно объяснить его пониженной теплотой сгорания.

Следующий этап стендовых испытаний предусматривал снятие нагрузочных характеристик при частоте вращения $n = 3000$ об/мин. Характеристики снимались при оптимальных углах опережения зажигания для каждого вида топлива (рис. 4).

Как видно, работа двигателя на ГГ приводит к снижению его эффективной мощности на 45 % (рис. 4) в сравнении с работой на бензине. В то же время снижение эффективной мощности двигателя при его работе на смеси 70 % ГГ и 30 % бензина составляет всего 15 %.

Работа по нагрузочным характеристикам дает возможность оценить изменение состава ОГ при работе ДВС на различных видах топлива.

Видно, что содержание углекислого газа CO_2 в ОГ при работе на ГГ больше, чем на бензине, что, очевидно, связано со значительным содержанием CO_2 в исходном топливе. В то же время выбросы оксидов углерода CO в ОГ при работе на ГГ ниже, чем на бензине. Это можно объяснить более полным сгоранием топлива.

Влияние добавок ГГ на эффективные и экологические показатели работы двигателя 1C6,8/5,4 можно рассмотреть и по скоростным характеристикам (рис. 5). Как видно, во всем рассматриваемом скоростном диапазоне имеет место снижение эффективной мощности, увеличение значений часового и удельного эффективного расходов топлива. При работе двигателя на ГГ снижение мощности составляет 47 %, а при работе на смеси 70 % ГГ и 30 % бензина всего лишь 13 %. Соответственно, увеличение роста удельного эффективного расхода топлива составляет 70,2 и 19,6 %.

Во всем рассматриваемом скоростном диапазоне имеет место снижение выбросов CO и несгоревших углеводородов C_nH_m .

На рис. 6 приведены совмещенные индикаторные диаграммы работы двигателя на различных видах топлива при $n = 3000$ об/мин и оптимальных значениях θ_3 .

В случае работы ДВС на бензине, оптимальным значением установочного угла опережения зажигания следует считать $\theta_3 = 25^\circ$. Максимальное давление цикла при этом достигается при угле поворота коленчатого вала $11-13^\circ$ после ВМТ и составляет $p_z = 3,65$ МПа.

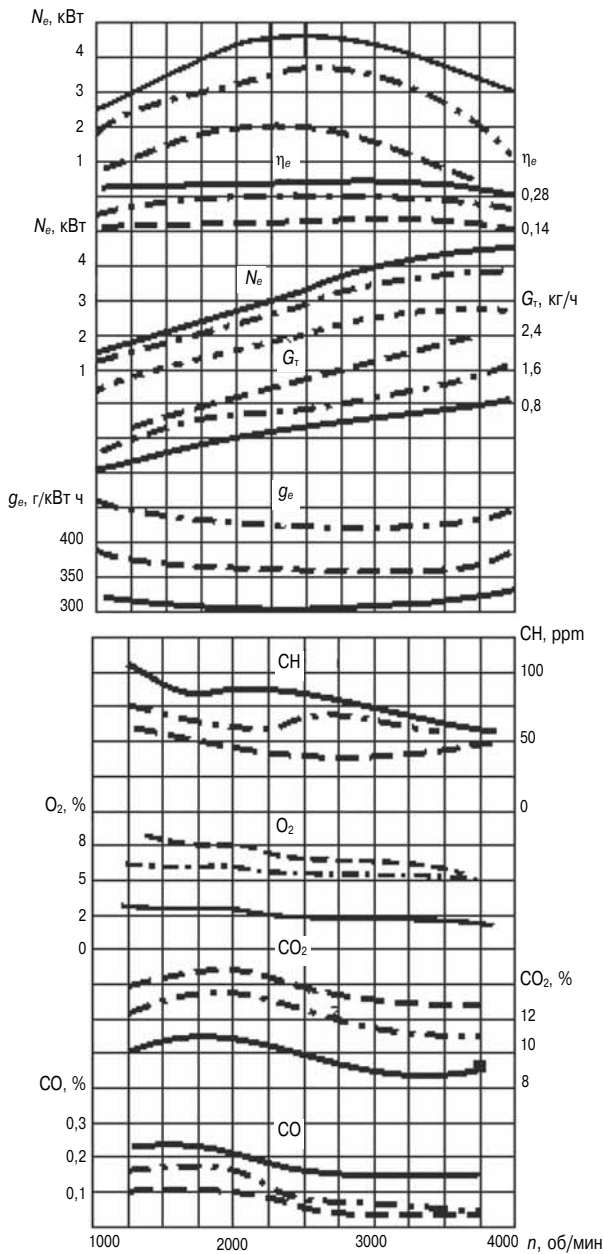


Рис. 5. Скоростные характеристики двигателя 1Ч6,8/5,4:
 — бензин; -- генераторный газ;
 - · - 30 % бензин + 70 % генераторный газ

Работа на ГГ вызывает смещение максимального давления цикла вправо от ВМТ, что требует увеличения угла опережения зажигания θ_3 до величины 40° . Максимальное давление цикла при этом снижается до величины $p_z = 2,13$ МПа.

При использовании смеси 70 % ГГ и 30 % бензина оптимальное значение θ_3 составляет угол, равный $\theta_3 = 32^\circ$ ПКВ. Максимальное давление цикла $p_z = 3,27$ МПа соответствует 12–14° поворота коленчатого вала после ВМТ.

Анализ характеристик тепловыделения (рис. 7) показывает значительное увеличение времени горения ГГ по сравнению с бензином почти на

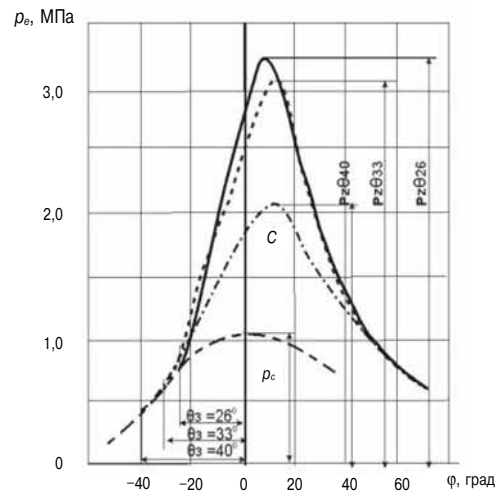


Рис. 6. Индикаторные диаграммы двигателя 1Ч6,8/5,4 при $n = 3000$ об/мин:
 — бензин; -- генераторный газ;
 - · - 30 % бензин + 70 % генераторный газ

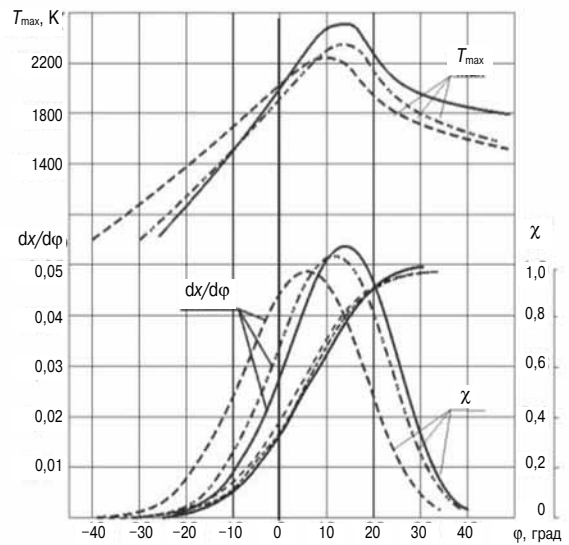


Рис. 7. Характеристики тепловыделения двигателя 1Ч6,8/5,4 при $n = 3000$ об/мин:
 — бензин; -- генераторный газ;
 - · - 30 % бензин + 70 % генераторный газ

76 %. Так, при нахождении поршня в ВМТ доля выделившегося тепла χ для бензина составляет 0,39, для чистого ГГ — 0,34 и для смеси 70 % ГГ и 30 % бензина — 0,37 соответственно.

Снижение скорости горения топлива и тепловыделения при работе на ГГ объясняется замедлением скорости горения топлива вследствие большого количества азота в составе топлива, который является инертным газом.

Замедление скорости горения и тепловыделения объясняют снижение значений максимальной среднemasсовой температуры цикла. Так, при работе на чистом бензине $T_z = 2540$ К, при

работе на чистом ГГ $T_z = 2230$ К, а в случае работы на смеси 70 % ГГ и 30 % бензина $T^* = 2360$ К.

Анализ индикаторных диаграмм и характеристик тепловыделения подтверждают достоверность данных стендовых испытаний двигателя [8] и нахождение оптимальных значений углов θ_3 .

Выводы

1. Добавка ГГ в топливо замедляет скорость горения смеси и соответственно изменяет динамику тепловыделения.

2. В результате проведенных исследований на двигателе 1Ч6,8/5,4 установлены значения оптимальных углов опережения зажигания — при работе на бензине $\theta_3 = 26^\circ$, на генераторном газе $\theta_3 = 40^\circ$, на смеси бензина и ГГ $\theta_3 = 34^\circ$. При ука-

занных значениях углов θ_3 достигаются значения эффективной мощности $N_{e \text{ бенз}} = 4,1$ кВт, $N_{e \text{ ГГ}} = 2,3$ кВт, $N_{e \text{ смесь}} = 3,6$ кВт соответственно.

2. Работа двигателя на ГГ нецелесообразна ввиду значительного — до 45 % — снижения эффективной мощности. Работа двигателя на смеси 30 % бензина и 70 % ГГ вызывает снижение мощности не более чем на 10–15 %, что вполне приемлемо. При этом имеет место экономия углеводородного топлива в объеме до 70 %.

5. Применение смеси 30 % бензина и 70 % ГГ для работы двигателя позволяет снизить выбросы СО на 24 %, несгоревших углеводородов C_nH_m — на 28 % во всех рассматриваемых нагрузочных и скоростных диапазонах работы двигателя.

Литература

1. Плотников С.А., Зубакин А.С., Коротков А.Н. Исследование электростанции, работающей на альтернативном топливе. Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики // Мат. IX межд. науч.-практ. конф. «Наука—Технология—Ресурсосбережение». — Киров, 2016. — С. 220–224.

2. Coal and Biomass Gasification. Santanu De Avinash Agarwal, V. S. Moholkar Bhaskar Thallada Editors Energy, Environment and Sustainability. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2018. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-7335-9>

3. Плотников С.А., Бузиков Ш.В., Карташевич А.Н., Зубакин А.С. Определение количественных характеристик двигателя бытовой электростанции при использовании генераторного газа в качестве альтернативного топлива // Проблемы региональной энергетики [Электронный ресурс]. — 2017. — № 2 (34). — С. 105–111.

4. Technology roadmap-bioenergy for heat and power (2012). International Energy Agency. https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/2012_Bioenergy_Roadmap_2nd_Edition_WEB.pdf. Accessed Aug. 2016.

5. Плотников С.А., Острецов В.Н., Киприянов Ф.А., Палицын А.В., Зубакин А.С., Коротков А.Н. Система питания двигателя внутреннего сгорания генераторным газом. — Патент РФ № 2605870, МКИ7F02B43/08.

6. Бирюков А.Л., Плотников С.А., Картошкин А.П., Зубакин А.С., Шушков Р.А. Разработка газогенератора для применения на мобильных энергетических средствах // Известия международной академии аграрного образования. — Санкт-Петербург : Изд-во Санкт-Петербургского регионального отделения Международной общественной организации «Международная академия аграрного образования», 2017. — № 35. — С. 15–18.

7. Плотников С.А., Острецов В.Н., Малков Н.Г., Палицын А.В. Система питания дизеля на композитном топливе. — Патент РФ № 2638693, МПК F02M 43/00. — 5 с., 1 ил.

8. Плотников С.А., Зубакин А.С. Исследование показателей работы двигателя 1Ч6,4/5,8 при работе с добавками генераторного газа // Будущее технической науки : сб. мат. XVI Межд. молодежн. науч.-техн. конф.; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. — Нижний Новгород, 2017. — С. 399–400.