

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО УГЛА ОПЕРЕЖЕНИЯ ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА НА ДИЗЕЛЕ 4ЧН 11,0/12,5 ПРИ РАБОТЕ НА СМЕСЯХ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА С БИО- И ПРИРОДНЫМ ГАЗОМ

А. Н. КАРТАШЕВИЧ, В. А. ШАПОРЕВ, Р. С. ДАРГЕЛЬ

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407

(Поступила в редакцию 14.04.2020)

Изложены результаты экспериментальных исследований, проведенных на кафедре «Тракторы, автомобили и машины для природообустройства» БГСХА в специализированной научно-исследовательской лаборатории «Испытание двигателей внутреннего сгорания» по выявлению влияния состава смесового топлива состоящих из 85 % дизельного топлива (ДТ) + 15 % биогаза (БГ), 70 % ДТ + 30 % БГ, 85 % ДТ + 15 % природного газа (ПГ) и 70 % ДТ + 30 % ПГ на эффективные и экологические показатели работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) и определению рационального значения установочного угла опережения впрыскивания топлива данного дизеля. Также в статье представлено описание экспериментальной установки и дополнительного оборудования.

Проведенный комплекс экспериментальных исследований подтвердил возможность использования БГ и ПГ в качестве альтернативного топлива для дизельных двигателей. Применение газомоторного топлива на основе БГ или ПГ позволяет улучшить эксплуатационные показатели дизеля путем сокращения расхода ДТ. Эффективные показатели работы дизеля на данных смесях показывают незначительное снижение мощности, крутящего момента и КПД, а также показывают рост удельного эффективного расхода теплоты смеси. Экологические показатели сопровождаются значительным снижением выбросов с отработавшими газами (ОГ) частиц сажи и оксидов азота, что в свою очередь являются основными токсичными компонентами, и малозначительными выбросами с ОГ диоксида углерода, оксида углерода и углеводородов. Рациональным значением для работы дизеля на смесях с добавлением БГ и ПГ следует считать угол опережения впрыскивания топлива $\Theta_{впр.} = 22^\circ$ поворота коленчатого вала (п.к.в.).

л ч е с л о дизель, дизельное топливо, биогаз, природный газ, отработавшие газы, дымность, токсичность.

We have presented results of experimental studies conducted at the Department «Tractors, cars and machines for environmental management» of BSAA in the specialized research laboratory «Testing of internal combustion engines» to identify the influence of composition of mixed fuel consisting of 85 % diesel fuel (DF) + 15 % biogas (BG), 70 % DF + 30 % BG, 85 % DF + 15 % natural gas (NG) and 70 % DF + 30 % NG on the efficient and environmental performance of the diesel 4ChN 11.0/12.5 (D-245.5S2) and to determine the rational value of setting angle of fuel injection advance of this diesel. The article also provides a description of the experimental installation and additional equipment.

The conducted set of experimental studies confirmed the possibility of using BG and NG as an alternative fuel for diesel engines. The use of gas-engine fuel based on BG or NG can improve the performance of diesel engines by reducing the consumption of diesel fuel. The effective performance of diesel engine on these mixtures shows a slight decrease in power, torque and efficiency, and also shows an increase in the specific effective consumption of mixture heat. Environmental indicators are accompanied by a significant decrease in exhaust gases emissions of soot particles and nitrogen oxides, which in turn are the main toxic components, and insignificant exhaust gases emissions of carbon dioxide, carbon monoxide and hydrocarbons. The rational value of fuel injection advance angle for the operation of a diesel engine on mixtures with the addition of BG and NG should be $\Theta = 22^\circ$ of crankshaft rotation.

Key words: diesel, diesel fuel, biogas, natural gas, exhaust gases, smoke content, toxicity.

Введение

В последнее время возрастает интерес к возобновляемым источникам энергии практически во всех странах мира. В первую очередь это связано с надвигающимся энергетическим кризисом. На сегодня, по оценкам ученых, балансовые запасы нефти на планете составляют всего 400 млрд т, а ежегодная ее добыча примерно 3 млрд т. С учетом современных технологий разработки месторождений и при существующих ценах на нефть этих запасов хватит максимум на 50–75 лет. Соответственно напрашивается вывод: необходимо максимально быстро развивать возобновляемую энергетику. Одним из перспективных направлений в этой области является переработка сельскохозяйственных отходов [1–3].

Производство биогаза (БГ) на основе отходов животноводства в Республике Беларусь является важным направлением в обеспечении региональной энергетической безопасности. Ежегодно только за счет использования навоза КРС, свиного навоза, птичьего помета, отходов зерно- и мясопереработки страна могла бы получать до 2,5 млрд м³ БГ и на его основе до 5 млрд кВт·ч электрической энергии. При этом собственная годовая потребность агропромышленного комплекса Беларуси составляет около 3,5 млрд кВт·ч. [4].

Наиболее крупные биогазовые установки аграрного сектора Беларуси: ОАО «Гомельская птицефабрика» (340 кВт), «Западный» (540 кВт); «Белорусский» (340 кВт) и «Сельскохозяйственное производство Снов» (2 МВт). Принимая во внимание важность утилизации отходов, в Беларуси практи-

чески каждый год строятся новые биогазовые установки и заводов, работающих на сельскохозяйственных отходах [5].

Национальная политика в области использования возобновляемых источников энергии в Беларуси осуществляется в соответствии со следующими документами:

1. Закон Республики Беларусь «Об энергосбережении» от 8 января 2015 г. № 239-З [6].
2. Закон Республики Беларусь «О возобновляемых источниках энергии» от 27 декабря 2010 г. № 204-З [7].
3. Директива Президента Республики Беларусь «Экономика в качестве основного фактора экономической безопасности государства» от 14 июня, 2007, № 3 [8].
4. Национальная программа рационального использования энергетических ресурсов на 2011–2015 годы (утверждена Советом Министров Республики Беларусь, 24 декабря 2010 года № 1882) [9].
5. Национальная программа «Развитие местных, возобновляемых источников энергии на 2011–2015 годы» [10].
6. Программа социально-экономического развития Республики Беларусь на 2011–2015 годы [11].
7. Государственная программа «Энергосбережение» Республики Беларусь на 2016–2020 годы [12].

Республика Беларусь обладает огромным потенциалом для развития такого альтернативного вида моторного топлива как БГ.

Целью данной работы является разработка новых составов топлив на основе ДТ, БГ и ПГ, удовлетворяющих требованиям их применения в дизеле, а также определение рационального значения установочного угла опережения впрыскивания топлива при работе дизеля на смесях, состоящих из 85 % ДТ + 15 % БГ, 70 % ДТ + 30 % БГ, 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ.

Основная часть

Экспериментальное исследование по выявлению влияния состава смесевое топлива на эффективные и экологические показатели, а также определение рационального значения установочного угла опережения впрыскивания топлива при работе дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) на смесях, состоящих из 85 % ДТ + 15 % БГ, 70 % ДТ + 30 % БГ, 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ, проводилось на кафедре «Тракторы, автомобили и машины для природообустройства» БГСХА в специализированной научно-исследовательской лаборатории «Испытание двигателей внутреннего сгорания».

В состав экспериментальной установки входил электротормозной нагрузочный стенд SAK-N670 с балансирной маятниковой машиной, дизель 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) и комплект измерительных приборов с выводом данных на монитор компьютера (рис. 1). Частота вращения коленчатого вала двигателя измерялась путем установки электронного датчика на коленчатый вал. Крутящий момент на коленчатом валу двигателя измерялся с помощью динамометрического устройства, входящего в состав нагрузочного стенда. Расход топлива определялся массовым способом при помощи электронного расходомера АИР–50 с весовым устройством. Подача БГ и ПГ осуществлялась по запатентованной конструкции [13]. Анализ проб ОГ производился с помощью автоматического газоанализатора Maha MGT-5. Дымность ОГ измерялась с помощью дымомера СИДА-107 «АТЛАС». Все приборы прошли государственную поверку.



Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки

При проведении исследований ДТ замещалось БГ и ПГ в процентном отношении по величине суммарной вводимой в цилиндры дизеля теплоты, значение которой в данном случае оставалось постоянным.

Переводя дизель для работы на смеси 85 % ДТ + 15 % БГ, 70 % ДТ + 30 % БГ, 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ, важно сохранить его мощностные и экономические показатели на уровне, установленном заводом-изготовителем. Для выполнения этого условия было необходимо определить эффективные регулировки системы топливоподачи дизеля. С этой целью первоначально было установлено влияние составов БГ, ПГ и ДТ на значения рационального установочного угла опережения впрыскивания топлива. Согласно руководству по эксплуатации, установочный угол опережения впрыскивания топлива для тракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) при работе на чистом ДТ составляет $\Theta_{впр}=18^\circ$ п.к.в.

Рациональный установочный угол опережения впрыскивания топлива определялся из соответствующей регулировочной характеристики (рис. 2 и 3), для построения которой снимался ряд нагрузочных характеристик по подаче топлива при различных значениях установочного угла опережения впрыскивания топлива для составов 85 % ДТ + 15 % БГ, 70 % ДТ + 30 % БГ, 85 % ДТ + 15 % ПГ, а также 70 % ДТ + 30 % ПГ.

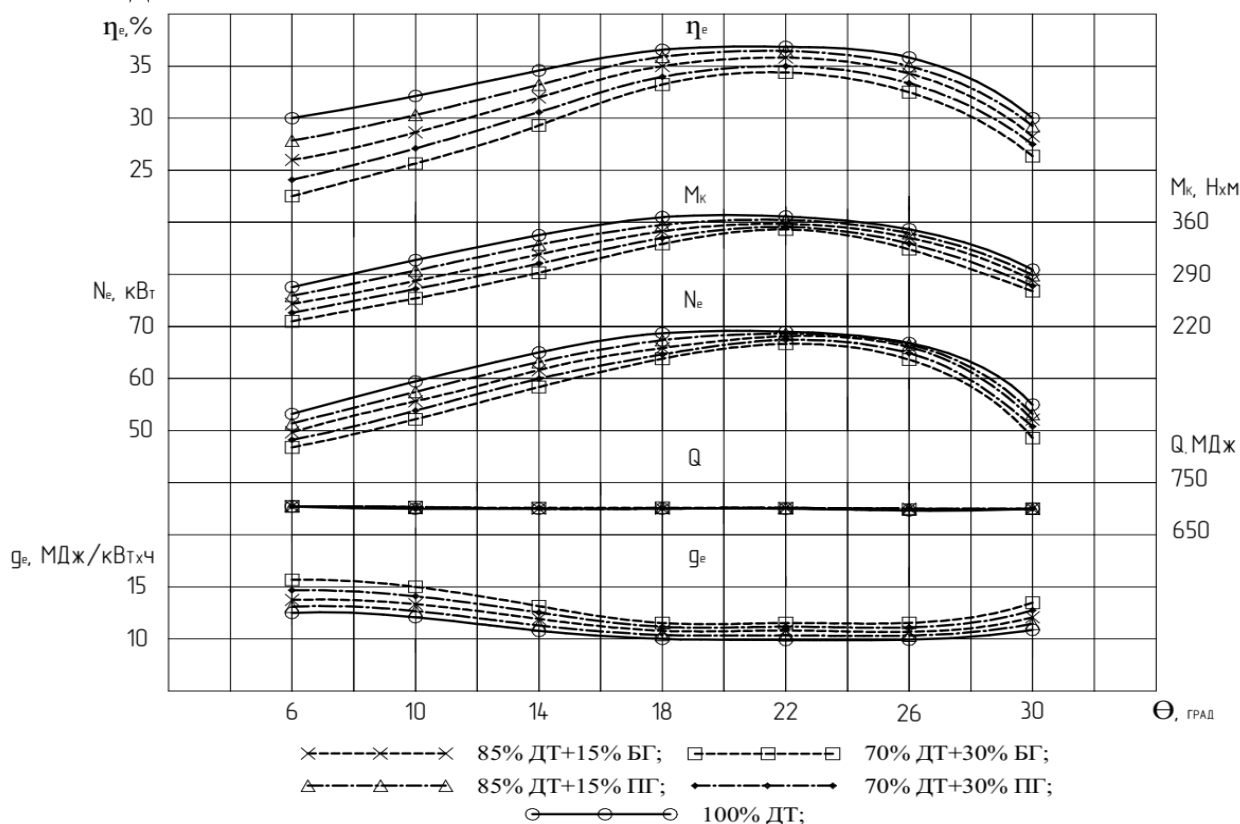


Рис. 2. Регулировочная характеристика дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ (мощностные и экономические показатели)

Из данных представленных графиков (рис. 3) видно, что при работе дизеля на чистом ДТ рациональным установочным углом опережения впрыскивания является угол $\Theta_{впр}=18^\circ$ п.к.в. При этом дизель развивает наибольшую паспортную мощность $N_e=69 \text{ кВт}$, значение удельного эффективного расхода теплоты равно $g_e=9,76 \text{ МДж/кВт}\cdot\text{ч}$, значение крутящего момента составляет $M_k=363 \text{ Н}\cdot\text{м}$, значение эффективного КПД составляет $\eta_e=37,4$.

При переводе дизеля для работы на смеси, содержащей 85 % ДТ + 15 % БГ значение рационального установочного угла увеличивается и составляет $\Theta_{впр}=22^\circ$ п.к.в. Мощность дизеля при этом наибольшая и составляет $N_e=68 \text{ кВт}$. Удельный эффективный расход теплоты при этом равен $g_e=11,63 \text{ МДж/кВт}\cdot\text{ч}$. Крутящий момент также наибольший и составляет $M_k=344 \text{ Н}\cdot\text{м}$, а значение эффективного КПД составляет $\eta_e=36,0$. При уменьшении или увеличении установочного угла происходит снижение эффективной мощности, увеличение удельного эффективного расхода теплоты и уменьшение величины крутящего момента.

При работе дизеля на смеси, содержащей 70 % ДТ + 30 % БГ, характер изменения кривых удельного эффективного расхода теплоты, эффективной мощности и крутящего момента практически не изменяется. Наибольшая мощность дизеля $N_e=66$ кВт достигается при значении рационального установочного угла $\Theta_{впр.}=22^\circ-24^\circ$ п.к.в. Значение удельного эффективного расхода теплоты при этом $g_e=12,76$ МДж/кВт·ч. Крутящий момент также наибольший $M_k=296$ Н·м. Значение эффективного КПД $\eta_e=34,0$.

Увеличение значения рационального установочного угла опережения впрыскивания топлива объясняется замедлением скорости процесса сгорания вследствие наличия в составе БГ медленно горящих компонентов.

При работе дизеля на смеси, содержащей 85 % ДТ + 15 % ПГ при значении установочного угла $\Theta_{впр.}=22^\circ$ п.к.в. мощность составляет $N_e=68,5$ кВт, удельный эффективный расход теплоты равен $g_e=10,52$ МДж/кВт·ч, крутящий момент также составляет $M_k=361$ Н·м, а значение эффективного КПД составляет $\eta_e=36,4$ и они являются максимальной из вс

у Ми ен я оч

для смесей с добавлением БГ, и 23,49 % и 40,55 % для смесей с добавлением ПГ. В диапазоне установочного угла $\Theta_{впр}$ от 6° до 30° п.к.в. происходит рост содержания оксидов азота NO_x в ОГ.

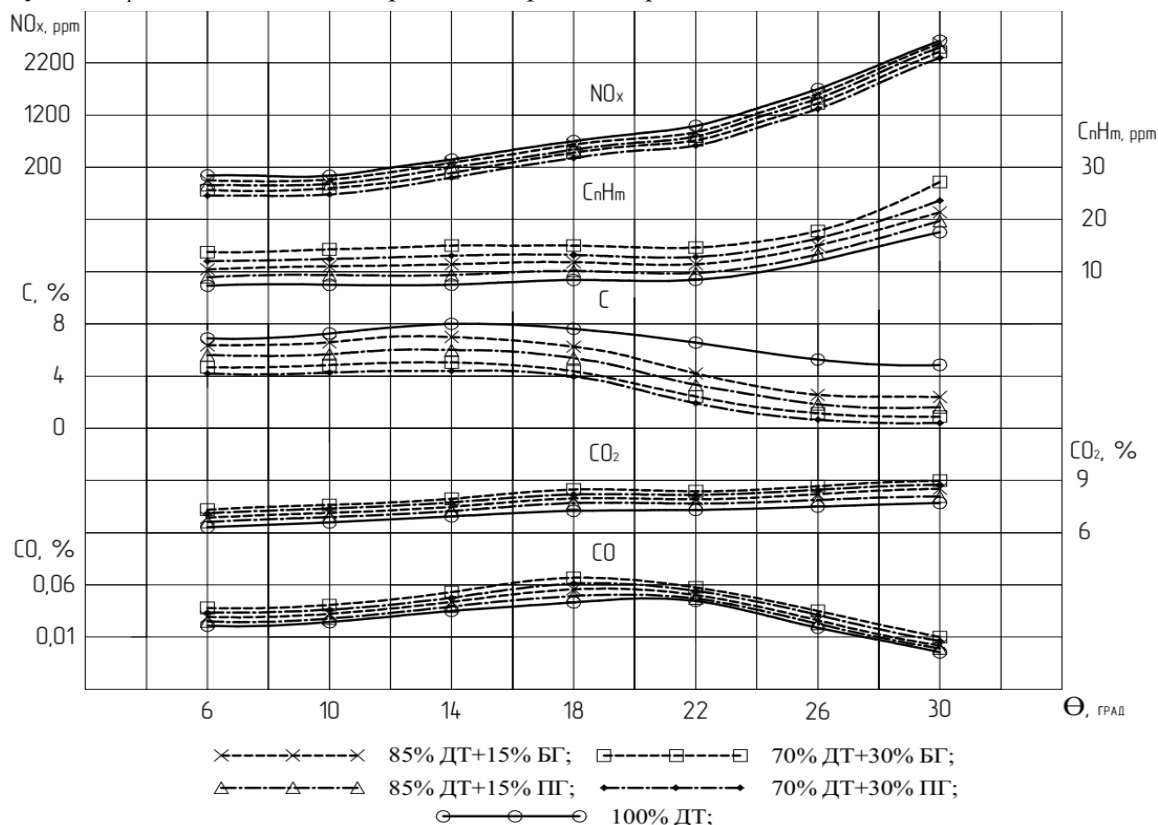


Рис. 3. Регулировочная характеристика дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ (показатели дымности и токсичности)

Выбросы несгоревших углеводородов C_nH_m в ОГ дизеля сопровождаются ростом во всем диапазоне установочного угла, но с увеличением содержания БГ и ПГ в смеси по сравнению с чистым ДТ выбросы C_nH_m возрастают. При установочном угле опережения впрыскивания топлива $\Theta_{впр.}=22^\circ$ и при работе на чистом ДТ выбросы углеводородов составляют 8,40 ppm, а на топливах с добавлением 15 % БГ и 30 % БГ выбросы углеводородов составляют 12,22 ppm и 15,04 ppm, соответственно, с добавлением 15 % ПГ и 30 % ПГ выбросы углеводородов составляют 9,78 ppm и 13,81 ppm. Следовательно, в процентном соотношении рост выбросов C_nH_m в ОГ с применением БГ к чистому ДТ составил 45,47 % и 79,04 %, а с применением ПГ этот рост составляет 16,42 % и 64,40 %. Увеличение несгоревших углеводородов при работе дизеля с добавками БГ и ПГ можно объяснить наличием многочисленных плохо горящих компонентов, в частности БГ [14].

Изменение концентрации диоксида углерода CO_2 в ОГ дизеля в зависимости от состава топлива и всего диапазона установочного угла незначительно возрастает (рис. 2). Так, при значении установочного угла опережения впрыскивания топлива $\Theta_{впр.}=22^\circ$ п.к.в. и при работе на чистом ДТ содержание диоксида углерода CO_2 составляет 7,36 %, при работе на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ их содержание составляет 7,88 % и 8,41 %, а при работе на смесях 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ, соответственно, 7,56 % и 8,05 %. Выбросы диоксида углерода CO_2 с ОГ несущественно увеличиваются с ростом замещения чистого ДТ на БГ и ПГ, в процентном соотношении это составляет 7,06 % и 14,26 % для БГ и 2,72 % и 9,36 % для ПГ. Диоксид углерода является менее опасным для человека с физиологической точки зрения, чем другие нормируемые компоненты ОГ дизеля [14].

Работа дизеля на смесевых составах с добавлением БГ и ПГ сопровождается повышением выбросов оксидов углерода CO в сравнении с работой на чистом ДТ при всех исследуемых значениях установочных углов $\Theta_{впр.}$. Так, для смесей 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ и значении установочного угла опережения впрыскивания топлива $\Theta_{впр.}=22^\circ$ п.к.в., выброс CO составляет 0,047 % и 0,056 %, для смесей 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ выброс CO составляет 0,041 % и 0,051 %, а также для чистого ДТ выброс CO составляет 0,038 %. Концентрация CO в ОГ на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ, 70 % ДТ + 30 % БГ, 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ больше, чем на чи-

стом ДТ в процентном отношении на 23,68 %, 47,36 %, 7,89 % и 34,21 %. Рост выбросов оксидов углерода СО объясняется исходными составами используемых топлив [14].

Заключение

На основе анализа приведенных данных сформулируем следующие основные выводы:

1. Показатели работы дизеля на чистом дизельном топливе соответствуют паспортным данным и достигаются при регламентированном значении установочного угла опережения впрыскивания топлива $\Theta_{\text{впр.}}=18^\circ$. При работе дизеля на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ, 70 % ДТ + 30 % БГ, 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ рациональным установочным углом опережения впрыскивания следует считать угол $\Theta_{\text{впр.}}=22^\circ$.

2. Эффективные показатели работы дизеля на смесях с добавлением БГ и ПГ относительно работы на чистом ДТ показывает незначительное снижение мощности на 1,16 % и 4,06 % для БГ и на 0,44 % и 2,62 % для ПГ, незначительное снижение крутящего момента на 5,23 % и 18,45 % для БГ и на 0,55 % и 11,57 % для ПГ, незначительное снижение значения эффективного КПД на 3,22 % и 8,60 % для БГ и на 2,15 % и 5,38 % для ПГ, и незначительное увеличение удельного эффективного расхода теплоты на 23,85 % и 35,88 % для БГ и на 12,03 % и 28,96 % для ПГ.

3. Экологические показатели работы дизеля на смесях с добавлением БГ и ПГ относительно работы на чистом ДТ сопровождаются порядочным снижением сажи на 35,30 % и 60,30 % для БГ и на 48,53 % и 66,18 % для ПГ, весомым снижением оксидов азота на 11,12 % и 31,77 % для БГ и на 23,49 % и 40,55 % для ПГ, незначительным увеличением диоксида углерода на 7,06 % и 14,26 % для БГ и на 2,72 % и 9,36 % для ПГ, незначительным увеличением оксидов углерода на 23,68 % и 47,36 % для БГ и на 7,89 % и 34,21 % для ПГ и увеличением несгоревших углеводородов на 45,47 % и 79,04 % для БГ и на 16,42 % и 64,40 % для ПГ.

4. Применение смесей 85 % ДТ + 15 % БГ, 70 % ДТ + 30 % БГ, 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ в качестве топлива для дизеля 4ЧН 11,0/12,5 позволяет улучшить их эксплуатационные показатели путем сокращения расхода ДТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия: ГОСТ 5542-87. – Введ. 01.07.2015. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 8 с.
2. Альтернативные виды топлива для двигателей / А. Н. Карташевич [и др.]. – Горки: БГСХА – 2012. – С. 376.
3. Богданович, П. Ф. Природный газ или биомасса? / П. Ф. Богданович // Сельское хозяйство – проблемы и перспективы: сб. науч. тр. – Гродно: УО ГГАУ, 2004. – Т. 3. – Ч. 4. – С. 89–92.
4. Производство биогаза в Республике Беларусь и Швеции. Обмен опытом. – Уппсала, 2012, ISBN: 978-91-86189-15-0 – 39 с.
5. Клочков, А. В. Биогаз: итоги и перспективы использования / А. В. Клочков, П. М. Новицкий // Наше сельское хозяйство. – 2017. – Выпуск 74. – С. 34–35.
6. О энергосбережении [Электронный ресурс]: Закон Респ. Беларусь: от 8 января 2015 г. № 239-З // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь – 2015. – 1/16458.
7. О возобновляемых источниках энергии: Закон Респ. Беларусь: от 27 декабря 2010 г. № 204-З: с изм. и доп. от 09 января 2017 г. // Нац. реестр правовых актов Республики Беларусь. – 2011. – № 2. – 2/1756.
8. О приоритетных направлениях укрепления экономической безопасности государства [Электронный ресурс]: Указ Президента Респ. Беларусь от 14 июня 2007 г. № 3 // с изм. и доп. от 30 ноября 2017 г. № 428 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь – 2017. – 1/17378.
9. О рациональном использовании энергетических ресурсов на 2011–2015 гг. [Электронный ресурс]: Нац. программа утверждена Советом Министров Респ. Беларусь, 24 декабря 2010 года № 1882 // Кодексы, законы и законодательные документы Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://belzakon.net/Законодательство/> Постановление Совета Министров РБ/2010/60566. – Дата доступа: 05.03.2020.
10. О развитии местных, возобновляемых источников энергии на 2011–2015 гг. [Электронный ресурс]: Нац. программа утверждена Советом Министров Респ. Беларусь, 10 мая 2011 года № 586 // Законодательство Республики Беларусь. – Режим доступа: <http://levonevski.net/pravo/norm2013/num09/d09689.html> – Дата доступа: 05.03.2020.
11. О социально-экономического развитии Республики Беларусь на 2011–2015 гг. [Электронный ресурс]: Указ Президента Респ. Беларусь от 11 апреля 2011 г. № 136 // Социально-экономическое развития страны. – Режим доступа: <http://www.loevkraj.by/2010/11/PROGRAMMA-SOCIALNO-EKONOMICHESKOGO-RAZVITIYA-STRANY-NA-2011-2015-GG-NOVOE-LICO-BELORUSSKOGO-GOSUDARSTVA/> – Дата доступа: 07.03.2020.
12. О энергосбережении Республики Беларусь на 2016–2020 гг. [Электронный ресурс]: Постановление Совета Министров Респ. Беларусь: от 28 марта 2016 г. № 248 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь – 2016. – 5/42407.
13. Система подачи газообразного топлива в дизель: пат. 12202 Респ. Беларусь, МПК F 02M 43/00 / А. Н. Карташевич, В. А. Шапоров, П. Ю. Малышкин, заявитель Белорус. гос. с-х. академия. № и 20190044; заявл. 18.02.2019; опубл.: 01.11.2019. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2019.
14. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени. Пер. с англ. / Под ред. Ю.Ф. Дитякина. – М.: Машиностроение, 1981. – 408 с.