

Б.Г. Тимошевский, д-р техн. наук, М.Р.Ткач, д-р техн. наук

МОТОРНЫЕ СВОЙСТВА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ОТХОДОВ ПОЛИМЕРОВ

Постановка проблемы и ее связь с научными и практическими задачами.

Вовлечения в энергетику новых альтернативных энергоресурсов является чрезвычайно актуальной проблемой для эффективного функционирования экономики. Особенно важным представляется использование альтернативных энергоресурсов и их диверсификация в условиях нестабильности цен на нефтяные топлива, истощения запасов углеводородного сырья и политической конъюнктуры. Одними из перспективных энергоресурсов являются альтернативные моторные топлива, которые могут быть получены из отходов полимерных материалов.

В настоящее время мировое сообщество накопило более 6 млрд. т полимерных отходов, состояние которых не позволяет использовать их для производства вторичных полимерных товаров. И это количество увеличивается примерно на 130 млн. т ежегодно. С другой стороны полимерные отходы представляют собой углеводородное сырье, которое может быть использовано для производства альтернативных моторных топлив.

При использовании эффективных и экологически безопасных технологий производство альтернативных моторных топлив (бензинов, дизельных и мазутов) из полимерных отходов может обеспечить до 5% мирового потребления жидких моторных топлив [1]. Одновременно решается и другая весьма важная проблема – снижение нагрузки на окружающую среду за счет утилизации этих отходов, которые весьма стойки к воздействию природных факторов и не разлагаются сотни лет.

Наибольшее внимание решению этой проблемы уделяют такие промышленно развитые страны как Япония, Германия и другие, где в настоящее время активно ведутся научно исследовательские и опытно конструкторские работы по созданию промышленных технологий и оборудования для получения альтернативных моторных топлив из отходов полимерных материалов.

Анализ исследований и публикаций

Известно, что проблема получения альтернативных топлив из отходов полимерных материалов

находится в центре внимания большого числа исследовательских центров и отдельных ученых, как в Украине, так и зарубежном. Известные технологии [2,3,4], как правило, базируются на циклических процессах, преследуют цель исключительно утилизации полимерных отходов и получения альтернативного топлива, свойства которого позволяют использовать это топливо только в котельных установках.

Попытки получить альтернативные топлива из отходов термопластичных полимеров предпринимались в Германии различными учеными, однако наибольших результатов достиг концерн BASF, который разработал конверсионный процесс с использованием рециркуляции перерабатываемой смеси полимерных отходов [5,6]. Определенных результатов достигла японская корпорация Mitsubishi Heavy Industry, которая разработала и внедрила на одном из своих заводов в Хиросиме полный цикл технологического процесса получения альтернативных топлив из отходов полимерных материалов [7,9]. Несмотря на то, что технология Mitsubishi Heavy Industry позволяет получать высококачественные моторные топлива, эта технология не получила дальнейшего распространения по причине высокой стоимости получаемых альтернативных топлив.

В такой постановке представляет интерес технологический процесс, который позволяет получать альтернативные моторные топлива из отходов полимерных материалов, рыночная стоимость которых будет несколько ниже стоимости стандартных нефтяных топлив при удовлетворительных моторных свойствах, что допускает использование этих топлив в тепловых двигателях без доработки, как самого двигателя, так и его систем.

Только такой подход позволит обеспечить внедрение в транспортную и стационарную энергетику альтернативных топлив и позволит осуществить диверсификацию энергоресурсов.

Постановка проблемы

Одним из эффективных методов получения качественных альтернативных топлив из отходов полимеров является непрерывный технологический

процесс контролируемого крекинга, отличающийся соответствующим аппаратным оформлением и параметрами. Основной задачей при этом является выбор такого состава оборудования и параметров процесса, которые бы позволили получить альтернативные топлива, близкие по своим моторным свойствам к стандартным топливам, что позволило бы использовать эти альтернативные топлива в тепловых двигателях без внесения каких-либо конструктивных изменений с сохранением основных показателей этих двигателей. Допустимым в этом случае представляются только соответствующие регулировки топливной аппаратуры с целью обеспечения качества и стабильности рабочего процесса.

Другой важной задачей при решении указанной

проблемы является достижение таких технохимических свойств альтернативных топлив, которые обеспечили бы экологические показатели двигателей на уровне, по крайней мере, не хуже требований EURO-3, а также обеспечили бы достаточную надежность и долговечность этих двигателей в условиях эксплуатации.

Решение проблемы

С целью решения поставленной проблемы было разработано схемное и аппаратное решение технологического процесса переработки отходов термопластичных полимерных отходов в альтернативные топлива. Принципиальная схема этого технологического процесса защищена патентом Украины [9] и представлена на рис.1.

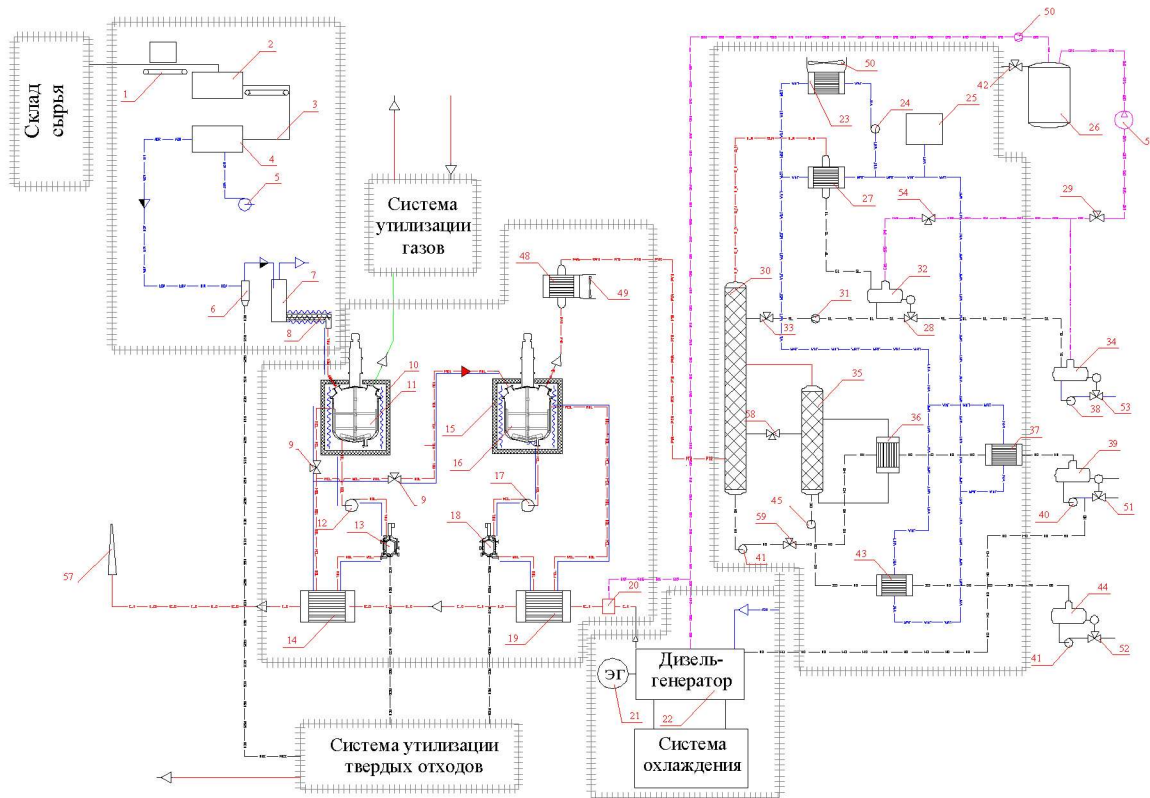


Рис.1. Принципиальная схема технологического процесса получения альтернативных топлив из отходов термопластичных полимеров (патент Украины №73900)

1,3 – конвейер ленточный; 2,4 – дробилка; 5 – вентилятор пневмотранспорта; 6 – магнитный циклон-сепаратор; 7 – бункер уравнивательный; 8 – экструдер; 9 – клапан управляемый; 10,15 – электропечь; 11 – аппарат емкостной; 12 – агрегат циркуляционных насосов; 13,18 – фильтр; 14 – теплообменник утилизационный; 16 – реактор крекинга; 17 – агрегат циркуляционных насосов; 19 – теплообменник утилизационный; 20 – камера сгорания; 21 – электрогенератор; 22 – дизельгенератор; 23 – аппарат воздушного охлаждения; 24 – насос водяной циркуляционный; 25 – емкость расширительная; 26 – ресивер газовый; 27 – конденсатор-дефлегматор; 28,29,33 – клапан управляемый; 30 – колонна ректификационная; 31 – устройство дроссельное; 32 – цистерна сбора бензиновых фракций; 34 – цистерна сборная бензина; 35 – колонна отгонная; 36 – теплообменник; 37 – охладитель; 38 – насос перекачки товарного бензина; 39 – цистерна сборная мазутных фракций; 40 – насос мазутный; 41 – насос дизельного топлива; 42 – клапан предохранительный; 43 – теплообменник; 44 – цистерна сборная дизельных фракций; 45 – насос.

Техническое решение состоит из двух последовательных технологических линий: декомпозиции отходов термопластичных полимеров и получения жидких углеводородов (полиолефинов или альтернативной нефти) из этого сырья и нефтеперегонной части, которая позволяет получить из указанного сырья моторные топлива удовлетворительного качества.

Наиболее важным при реализации приведенной технологии является выбор и поддержание параметров процесса декомпозиции, который должен обеспечить получение жидких углеводородов с весьма низким содержанием тяжелых фракций (фенолов, альдегидов, жирных кислот и т.п.), а также галогено-содержащих углеводородов. Достижение таких показателей процесса декомпозиции позволяет в последующей нефтеперегонной линии использовать минимальный стандартный набор технологического оборудования и не применять дорогостоящее и энергоемкое оборудование для платформинга, деасфальтизации, депарафинизации, гидроочистки и т.п. Такой подход позволяет существенно снизить стоимость альтернативных моторных топлив и таким образом повысить их конкурентоспособность.

Основные показатели технологического процесса, реализованного на экспериментальной установке Центра перспективных энергетических технологий Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные показатели технологического процесса

Показатели	Значение
Выход технологических продуктов	
Количество перерабатываемого сырья, кг/сутки	155
Газ крекинга, м ³ /сутки	9,5
Бензин, ОЧ 76, кг/сутки	45,0
Дизельное топливо, ЦЧ 45, кг/сутки	78,0
Котельное топливо, кг/сутки	15,0
Потребление энергии	
Установленная электрическая мощность, кВт	10,0
Потребляемая электрическая мощность, кВт	7,0
Энергоемкость переработки, (кВт·ч)/кг	1,2
Потребление воды (подпитка), кг/сутки	1,5
Отходы	
Коксовый остаток, кг/сутки	6,25
Минеральный остаток, кг/сутки	1,0

Рациональные параметры процесса деструкции отходов термопластичных полимеров позволили получить альтернативные бензин и дизельное топливо,

близкие по составу к стандартным топливам по ДСТУ 4063 и ДСТУ 3868, соответственно. В таблицах 2 и 3 приведены основные моторные свойства и структурно-групповой и гомологический состав бензиновой фракции, а на рис.2 – хромато-масс-спектрограмма бензиновой фракции. В таблице 4 приведены свойства альтернативного дизельного топлива.

Анализ данных, приведенных в таблицах 2-4 и рис.2, дает основание предположить, что при использовании альтернативных топлив, полученных из отходов термопластичных полимеров в дизельных двигателях, не следует ожидать существенных нарушений рабочего процесса и изменения основных характеристик двигателей в целом.

Таблица 2.

Наименование показателя	Значение
Октановое число по моторному методу	76
Фракционный состав	
Температура начала перегонки, °С	47,0
10% перегоняется при температуре, °С	80
50% перегоняется при температуре, °С	133
90% перегоняется при температуре, °С	191
Остаток в колбе	1,4
Потери	2,5
Кислотность, мг КОН на 100 см ³ топлива	8,31
Массовая доля серы, %	0,006
Испытание на медной пластинке	выдерживает
Йодное число, г. йода на 100 см ³ топлива	78,4
Содержание ненасыщенных углеводородов, по йодному числу	31,8
Плотность при температуре 20 °С, кг/м ³	711,7
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	44,1

Таблица 3.

Наименование углеводородов	Значение
Парафины, в том числе	39,4
Пропан	-
Бутаны	0,79
Пентаны	7,54
Гексаны	8,00
Гептаны	8,22
Октаны	5,17
Нонаны	4,14
Деканы	3,33
Ундеканы	2,71
Моноолефины	38,6
Диены и цикломоноолефины	16,9
Алкилбензолы	3,1
Алкенилбензолы	2,0
Средняя молекулярная масса	103,0

Следует отметить, что по фракционному составу, массовой доле серы, концентрации фактических смол, содержанию парафиновых и некоторым другим показателям альтернативные топлива превосхо-

дят аналогичные показатели стандартных топлив. Некоторое увеличение кислотного числа, невысокое октановое число и пониженная плотность не являются препятствием для использования этих топлив в тепловых двигателях.

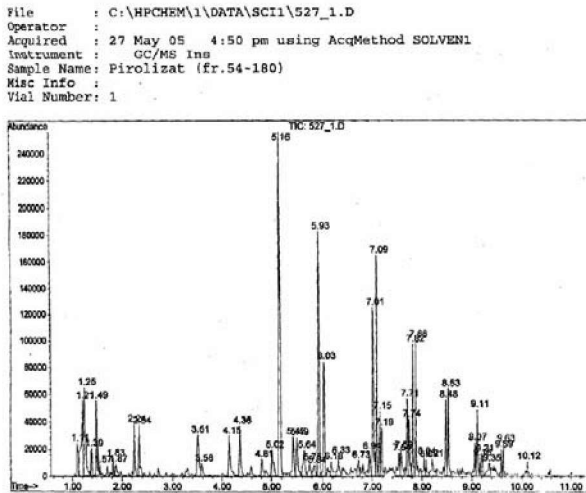


Рис.2. Хромато-масс-спектрограмма бензиновой фракции альтернативного топлива

Учитывая, что указанные альтернативные топлива не подвергались дополнительной обработке и не содержат никаких присадок, дальнейшее улучшение их свойств, в случае необходимости, может быть достигнуто за счет введения соответствующих присадок.

Таблица 4.

Наименование показателя	Значение
Цетановое число	42
Начало кипения, °С	180
Конец кипения, °С	324
Кинематическая вязкость при t = 20 °С, мм ² /с	2,88
Массовая доля серы	0,026
Температура застывания, °С	- 6
Температура вспышки в закрытом тигле, °С	60
Испытание на медной пластинке	выдерживает
Концентрация фактических смол, мг/ 100см ³ топлива	28,0
Кислотность, мг КОН на 100 см ³ топлива	4,51
Йодное число, г йода на на 100см ³ топлива	42,4
Содержание ненасыщенных углеводородов по йодному числу, % масс.	31,7
Плотность при температуре 20 °С	788,8
Нижняя теплота сгорания, МДж/кг	42,5

С целью определения показателей рабочего процесса при использовании альтернативного дизельного топлива, полученного в результате утили-

зации полимерных отходов, были выполнены экспериментальные исследования на двигателе 6ЧН 12/14 и результаты этих исследований представлены на рис.3-8.

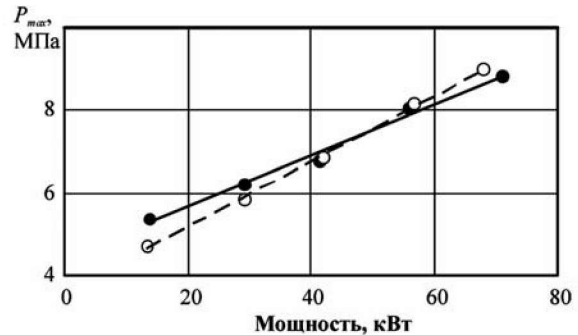


Рис.3. Максимальное давление в цилиндре двигателя 6ЧН12/14 при работе на: - - - стандартном дизельном топливе по ДСТУ 3868; — — альтернативном дизельном топливе

Анализ результатов исследований, приведенных на рис.3-5, позволяют утверждать, что различия в параметрах рабочего процесса в дизельном двигателе 6ЧН12/14 не являются существенными. Превышение максимального давления в цилиндре двигателя (рис.3) на максимальных нагрузках не выходит за пределы допустимых значений (1...3%). Некоторое повышение жесткости работы (рис.4) не приводит к нарушению рабочего процесса и объясняется присутствием в дизельном топливе бензиновых фракций.

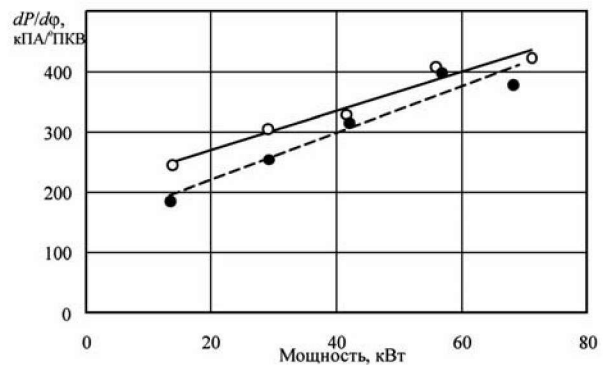


Рис.4. Величина нарастания давления в цилиндре двигателя 6ЧН12/14 при работе на: - - - стандартном дизельном топливе по ДСТУ 3868; — — альтернативном дизельном топливе

Удельный эффективный расход топлива (рис.5) при работе на альтернативном дизельном топливе практически не отличается от аналогичного показателя при работе на стандартном дизельном топливе. Некоторое снижение удельного расхода (3...5%) на-

блюдается только в области нагрузок, близких к номинальным.

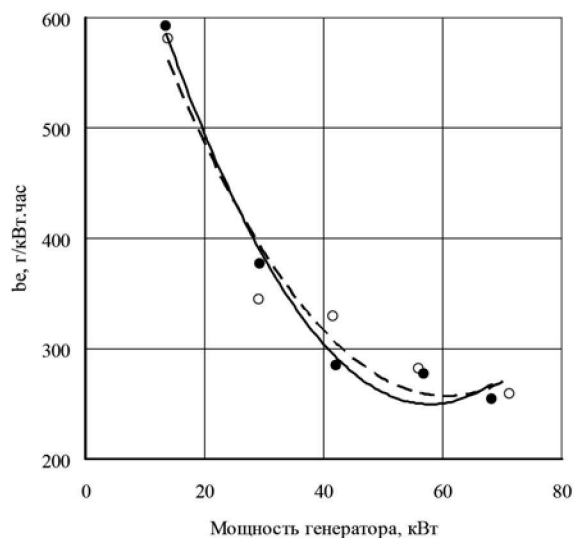


Рис. 5. Удельный эффективный расход топлива двигателя 6ЧН12/14 при работе на:
 - - - - - стандартном дизельном топливе по ДСТУ 3868;
 — альтернативном дизельном топливе

Содержание в выпускных газах монооксида углерода (рис. 6) при эксплуатации двигателя на альтернативном топливе существенно отличается (практически вдвое) от аналогичного показателя при работе на стандартном топливе в области малых и максимальных нагрузок. Это свидетельствует об удовлетворительной организации рабочего процесса двигателя, использующего альтернативное топливо, средних нагрузках и необходимости корректировки параметров топливоподачи на режимах малой и максимальной мощностях.

Содержание оксидов азота в выпускных газах двигателя (рис. 7) при работе на альтернативном топливе и малых нагрузках на 20...45% превышает аналогичный показатель при эксплуатации двигателя на стандартном дизельном топливе. Это также свидетельствует о необходимости корректировки параметров топливоподачи и воздухообеспечения на этих нагрузках. В случае же средних и близких к номинальным нагрузкам, наблюдается снижение содержания оксидов азота на 15...25%, что является положительным, учитывая, что в этой области как раз и находятся основные эксплуатационные режимы работы двигателя.

На рис. 8 и 9 приведены индикаторные диаграммы и скорости нарастания давления в цилиндре

двигателя 6ЧН12/14 при работе на стандартном и альтернативном дизельном топливе при различных нагрузках.

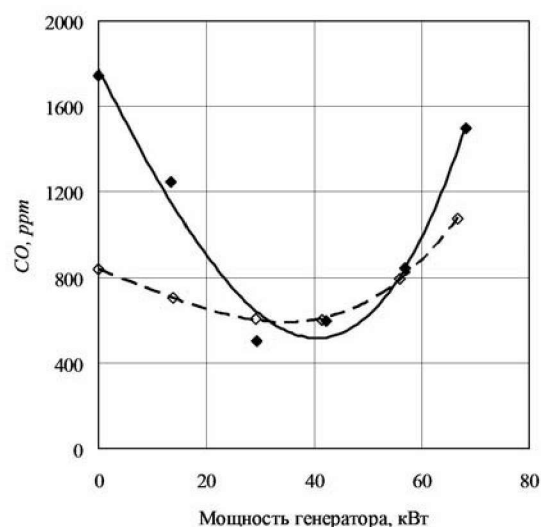


Рис. 6. Содержание CO в отходящих газах двигателя 6ЧН12/14 при работе на:
 - - - - - стандартном дизельном топливе по ДСТУ 3868;
 — альтернативном дизельном топливе

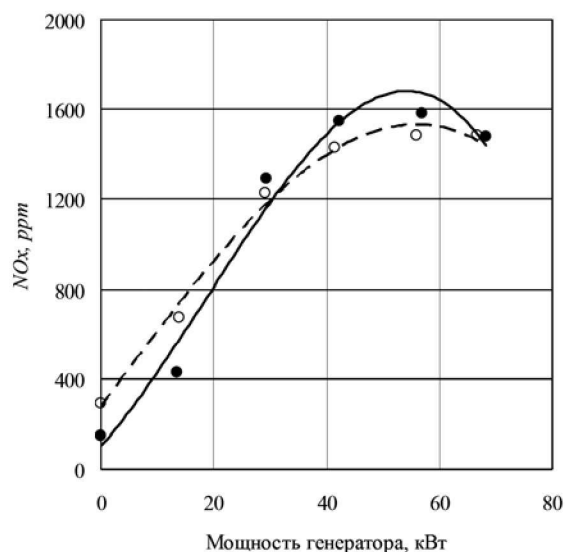


Рис. 7. Содержание NO_x в отходящих газах двигателя 6ЧН12/14 при работе на:
 - - - - - стандартном дизельном топливе по ДСТУ 3868;
 — альтернативном дизельном топливе

Из рисунка видно, что на режимах большой нагрузки значения максимального давления P_{max} , максимальной скорости нарастания давления $dP/d\phi$ при использовании альтернативного дизельного топлива,

чем для стандартного дизельного топлива. При работе двигателя на этом топливе, мощности генератора 71 кВт и частоте вращения 1500 мин⁻¹ возрастает скорость нарастания давления, которая превышает аналогичный показатель для дизельного топлива на

0,5 МПа; абсолютное значение повышения максимального давления составляет 0,45 МПа, а среднего – на 0,3 МПа по сравнению с работой на дизельном топливе.

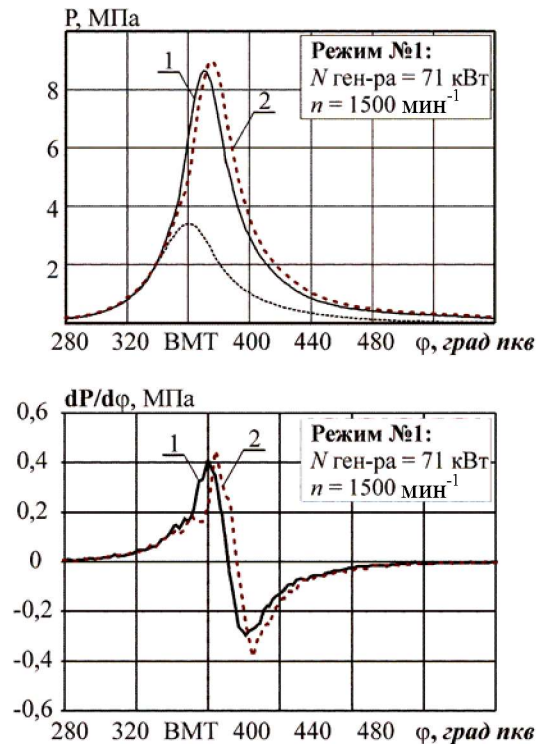
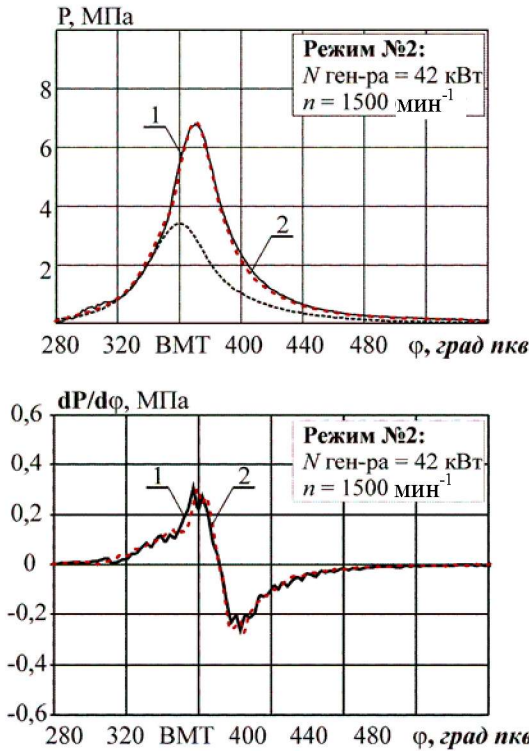


Рис.8. Индикаторная диаграмма и скорость нарастания давления $dP/d\phi$ в цилиндре двигателя 6ЧН12/14 при $N_{\text{е}}=71 \text{ кВт}$ и 1500 мин^{-1} и работе на: - - - - стандартном дизельном топливе по ДСТУ 3868; — альтернативном дизельном топливе

Рис.9. Индикаторная диаграмма и скорость нарастания давления $dP/d\phi$ в цилиндре двигателя 6ЧН12/14 при $N_{\text{е}}=42 \text{ кВт}$ и 1500 мин^{-1} и работе на: - - - - стандартном дизельном топливе по ДСТУ 3868; — альтернативном дизельном топливе

Однако с уменьшением нагрузки период задержки воспламенения при использовании альтернативного дизельного топлива еще больше превышает аналогичный показатель для стандартного топлива (разность составляет 3,8 град. п.к.в. при нагрузке 20%). Вследствие чего более высокая скорость сгорания топлива в начальный период не приводит к росту P_{max} и более позднего начала воспламенения и развития процесса сгорания при увеличивающемся объеме цилиндра. Так, при работе на средних нагрузках период задержки воспламенения альтернативного топлива больше, чем у дизельного топлива примерно на 1,8 град. п.к.в. и примерно одинаковом P_{max} , абсолютное значение повышения максимального давления составляет 0,05 МПа. На режимах 20%

до 40% нагрузки значение максимального давления в цикле при работе на альтернативном топливе становится меньше, чем этот же показатель при работе на дизельном топливе.

Это объясняется тем, что топливо с высоким цетановым числом, при прочих равных условиях, имеет лучшую способность к самовоспламенению.

Альтернативное дизельное топливо с пониженным цетановым числом больше испаряется и активизируется, следовательно, большая доля этого топлива будет находится в возбужденном состоянии, но горит в большей степени в гетерогенной среде, не получив должной активации. Это явление отрицательно сказывается на качестве сгорания. Двигатель работает с повышенным расходом топлива, пониженной мощностью и повышенной дымностью. С другой

стороны, вместе с увеличением периода задержки воспламенения, отрицательная работа цикла до ВМТ увеличивается, максимальное давление газов не достигает своего оптимального значения. В результате этого происходит снижение индикаторного КПД. Наибольшая часть тепловыделения происходит на такте расширения, поэтому эффективность использования выделяющейся теплоты и полнота сгорания снижаются, растут потери тепла с отработавшими газами, уменьшаются индикаторный, механический и эффективный КПД - снижаются мощность и экономичность дизеля, растет удельный эффективный расход топлива.

Выводы

Получение альтернативных моторных топлив из отходов термопластичных полимеров является перспективным направлением диверсификации топливно-энергетических ресурсов и снижения зависимости от импорта этих ресурсов.

Выполненные исследования показали принципиальную возможность работы дизельного двигателя на альтернативном топливе, полученном путем переработки отходов термопластичных полимеров. При этом не требуется внесения изменения в конструкцию двигателя, его агрегатов и систем.

Для обеспечения эффективной работы двигателя достаточным является соответствующая настройка топливной аппаратуры.

Исследования показали также, что параметры рабочего процесса и динамика тепловыделения зависят от цетанового числа топлива и от количества содержащихся в нем ароматических углеводородов.

Для уменьшения отрицательного влияния указанных факторов на рабочие показатели двигателя

необходимо регулировать угол опережения подачи топлива в пределах 1,5...7,5 град. п.к.в. в зависимости от техникохимических свойств альтернативного дизельного топлива. Это позволит обеспечить длительную работу двигателя на альтернативном топливе с пониженным цетановым числом при удовлетворительном расходе топлива.

Список литературы:

1. *International Energy Outlook 2009, Report #: DOE/EIA-0484(2009), May 27, 2009.*
2. *Hegberg, Bruce A. Mixed plastics recycling technology / by Bruce A. Hegberg, Gary R. Brenniman, William H. Hallenbeck // University of Illinois Center for Solid Waste Management and Research, Chicago, Illinois Noyes Data Corporation, Park Ridge, New Jersey, U.S.A., 1992.*
3. *Thermal decomposition of polyolefin/carbon black composites. E. Jakab, M. Omastova. J. Anal. Appl. Pyrolysis 74, 2005, 204–214.*
4. *Liquefaction of Mixed Plastics Containing PVC and Dechlorination by Calcium-Based Sorbent Thallada Bhaskar, Md. Azhar Uddin, Jun Kaneko, Toshiaki Kusaba, Toshiki Matsui, Akinori Muto, Yusaku Sakata and Katsuhide Murata. Energy & Fuels, 2003, 17, 75–80.*
5. *Anon (1995), BASF Shuttles Plastic Feedstock Recycling Plant. Chemical Market Reporter, 7.*
6. *Life Cycle Assessment of PVC and of principal competing materials. Final report. Commissioned by the European Commission, July 2004.*
7. *G.Dodbiba, T.Fujita. Progress in separating plastic materials for recycling. Physical Separation in Science and Engineering, 2004, Vol. 13, No. 3–4, p. 165–182.*
8. *Advanced industrial technologies for energy conservation & CO₂ reduction in Japan. Japan external trade organization (JETRO) Japan consulting institute (JCI), Mitsubishi Heavy Ind. Final report, January, 2008.*
9. *Пат. 73900 Україна. Спосіб та пристрій для переробки відходів полімерів у альтернативне паливо/ Тимошевський Б.Г., Ткач М.Р., Харитонов Ю.М.*
10. *Ткач М.Р. Экспериментальные исследования показателей судового ДВС, использующего альтернативное топливо/ М.Р. Ткач, Б.Г.Тимошевский, Б.А.Тхы. // Двигатели внутреннего сгорания. – №2. – 2006.*

УДК 621.436.03

Н.А. Иващенко, д-р техн. наук, Л.В. Грехов, д-р техн. наук, А.А. Жердев, д-р техн. наук

ТЕХНОЛОГИЯ ПИТАНИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ДИЗЕЛЯ СМЕСЯМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИМЕТИЛОВОГО ЭФИРА

Актуальность проблемы

Диметилловый эфир (ДМЭ) с химической формулой $\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$ (кратко $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) благодаря соединению двух метиловых радикалов CH_3 атомом кислорода и его большой доли (около 35%), при сгорании в дизеле практически не образует сажи. Он полностью отвечает требованиям Монреальского протокола, запрещающего производство озоноразрушаю-

щих соединений (потенциал озоноразрушения в атмосфере – ODP - равен нулю). Он также лучше соответствует требованиям Киотского протокола, направленного на ограничение парникового эффекта нашей планеты путем уменьшения выбросов CO_2 . При нормальных условиях это газ, но ожижается уже при давлении 0,53 МПа. ДМЭ нетоксичен и не загрязняет окружающую среду.