

К ПРОБЛЕМЕ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОУГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ В СФЕРЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА АПК

EFFECTIVE USE OF BIOHYDROCARBON FUEL COMPOSITIONS IN THE ENERGY COMPLEX OF THE AGROINDUSTRIAL COMPLEX

В.М. ФОМИН¹, д.т.н.
Р.Х. АБУ-НИДЖИМ², к.т.н.

¹ Московский политехнический университет, Москва, Россия, mixalichDM@mail.ru

² Российский университет дружбы народов, Москва, Россия, abu_nidzhim_ryu@pfur.ru

V.M. FOMIN¹, DSc in Engineering
R.KH. ABU-NIDZHIM², PhD in Engineering

¹ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia, mixalichDM@mail.ru

² Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia, abu_nidzhim_ryu@pfur.ru

Обсуждается проблема поиска альтернативных путей энергетического обеспечения транспортно-технологического комплекса АПК. Обосновывается эколого-экономическая целесообразность перевода с/х мобильной техники (в основном дизельной) на питание топливом, произведенным из биомассы. При этом отмечается, что широкомасштабное использование биологических энергоносителей в качестве основного моторного топлива для дизелей сдерживается существенным отличием их физико-химических свойств от свойств традиционных углеводородных топлив. Одним из альтернативных вариантов решения проблемы является использование энергетических биологических продуктов в качестве добавки к базовому углеводородному топливу. При этом, наиболее приемлемые физико-химические свойства двухкомпонентного топлива, отвечающие требованиям эффективной организации рабочего процесса дизельного двигателя, обеспечиваются соответствующим выбором величины этой добавки. В работе предложена методика оптимизации компонентного состава бинарного топлива, при котором обеспечивается предельно возможное улучшение экономических и экологических показателей двигателя, работающего на этом топливе. Методически обоснован способ совершенствования показателей сгорания биоуглеводородных топлив на основе применения средств химической активации. Приведены результаты опытной апробации комплекса предложенных мер по совершенствованию показателей бинарного топлива в условиях натурных испытаний на двигателе. По результатам проведенного исследования делается вывод, что предложенную концепцию метода, направленного на совершенствование показателей бинарных биоуглеводородных топлив, можно отнести к одному из перспективных направлений в сфере активно развивающейся биоэнергетики. Использование подобных топлив позволяет преобразовывать практически любой серийный двигатель в конкурентоспособную энергетическую установку с более высокими эколого-экономическими показателями по сравнению с двигателями, работающими на традиционных нефтяных топливах. В своей ключевой основе метод направлен на оперативное и рентабельное решение актуальных проблем энергосбережения и повышения уровня экологической и топливно-энергетической безопасности в среде сельскохозяйственного производства.

Ключевые слова: биоэнергетика, энергообеспечение, энергопотребление, биотопливо, биоуглеводородная топливная композиция, средства химической активации.

The problem of searching for alternative ways of power supply for the transport and technological complex of the agroindustrial complex is discussed. The ecological and economic expediency of the transfer of agricultural machinery (mainly diesel) to supply by fuel produced from biomass is substantiated. It is noted that the large-scale use of biological energy as the main motor fuel for diesel engines is hampered by a significant difference in their physicochemical properties from the properties of traditional hydrocarbon fuels. One of the alternative solutions to the problem is the use of energy biological products as an additive to the base hydrocarbon fuel. At the same time, the most acceptable physicochemical properties of a two-component fuel, meeting the requirements of efficient organization of the working process of a diesel engine are provided by appropriate choice of the value of this additive. The paper suggests a technique for optimizing the component composition of binary fuel, which provides the utmost possible improvement of the economic and environmental performance of an engine running on this fuel. A method for improving the combustion performance of biohydrocarbon fuels based on the use of chemical activation agents is methodologically substantiated. Results of experimental approbation of a set of proposed measures for improving binary fuel parameters in conditions of full-scale tests on the engine are presented. Based on the results of the conducted study, it is concluded that the proposed concept of the method aimed at improving the indicators of binary biohydrocarbon fuels can be attributed to one of the promising directions in the field of actively developing bioenergy. The use of such fuels makes it possible to convert almost any serial engine into a competitive power plant with higher environmental and economic performance compared to engines running on traditional petroleum fuels. In its key basis, the method is aimed at an efficient and cost-effective solution of urgent problems of energy conservation and raising the level of environmental and fuel and energy security in the environment of agricultural production.

Keywords: bioenergy, energy supply, energy consumption, biofuel, bio-hydrocarbon fuel composition, chemical activation resources.

Введение

Ограниченность природных источников органического топлива и возрастающая проблема экологической безопасности являются началом наблюдаемого во всем мире нового периода в области развития энергетики, наиболее характерной чертой которого является возрастание сферы альтернативного энергопотребления на основе экологически чистой биоэнергетики.

Область эксплуатации сельскохозяйственной техники, в частности, на базе колесных тракторов часто затрагивает локальные зоны с ограниченным воздухообменом (парники, фермы и т.д.), для которых проблема экологической безопасности стоит наиболее остро. Введение в России европейского стандарта – Правил ЕЭК ООН № 96 в качестве ГОСТ Р41.96-2005 – предъявило повышенные требования к экологическому уровню дизелей сельскохозяйственной техники в связи с установлением более жестких норм на выброс вредных веществ. На этом фоне одновременно прослеживается и острота проблемы энергообеспечения данного вида техники.

В этих условиях многократно возрастает роль биоэнергетики, основными преимуществами которой являются ее неисчерпаемость и экологическая чистота, что принципиально отличает ее от традиционной энергетики. При этом развитие биоэнергетики повсеместно считается наиболее перспективным путем решения проблем энергообеспечения как в сфере постоянно растущего энергопотребления в целом, так и в направлении перспективного развития энергетики АПК. Энергетический потенциал ежегодно произрастающей биомассы значительно превышает суммарную энергию годового потребления всех видов углеводородного сырья. Современные технологии производства биотоплив позволяют потенциально удовлетворить все энергетические потребности национального с/х производства, используя лишь незначительные посевные площади.

Если проанализировать биоэнергетику как относительно молодую сферу деятельности, то можно с уверенностью сказать, что она как нельзя лучше способствует решению проблемы энергообеспечения при сохранении устойчивости биосферных процессов поскольку:

- способствует сокращению потребления органических не возобновляемых ресурсов;
- создаст устойчивые предпосылки для оздоровления окружающей среды;

- позволяет привлекать внеземной ресурс для своего развития, так как основана на стратегии аккумуляирования солнечной энергии;

- не требует значительных материальных и финансовых затрат для своей крупномасштабной реализации;

- решает задачи энергообеспечения как на региональном, так и местном уровнях.

О заметном возрастании интереса к моторным топливам растительного происхождения в последнее время свидетельствует тот факт, что в ряде зарубежных стран приняты национальные программы и реализуются крупные проекты по развитию альтернативной биоэнергетики.

Основными условиями широкомасштабного энергетического применения биомассы в качестве моторного топлива являются наличие соответствующей базы для ее выращивания и производства из нее топлива с экономически оправданной стоимостью. Россия обладает по сравнению с другими странами обширными площадями для выращивания биологической массы и, следовательно, большими потенциальными возможностями ее воспроизводства. Существующие апробированные технологии переработки отдельных видов биомассы позволяют получать дешевое и экологически чистое топливо практически для всех типов транспортно-технологических машин АПК. Важно и то, что развитие биоэнергетики является мощным дополнительным стимулом для подъема национального агропромышленного комплекса.

Цель исследования

Следует заметить, что проблема использования биологических продуктов в качестве основного топлива для дизелей сельскохозяйственной техники на данном этапе обуславливает необходимость решения ряда серьезных задач. С учетом существенного отличия физико-химических свойств данного вида топлива от традиционных топлив необходимо проведение большого объема исследовательских работ, связанных с поиском рациональной организации процессов смесеобразования и сгорания с последующей разработкой двигателей на основе принципиально новых способов организации рабочего процесса. К проблеме широкого внедрения биологических источников энергии на транспорте следует дополнительно отнести необходимость существенных финансовых затрат. Они связаны с переобо-

рудованием существующей технологической базы, которая ориентирована на выпуск новых видов двигателей, адаптированных к работе на данном топливе. Поэтому на ближайший период широкомасштабное непосредственное использование биологических продуктов в качестве основного моторного топлива в сфере отечественного транспортно-технологического комплекса АПК достаточно проблематично.

Более предпочтительной представляется разработка топливных композиций – смесей традиционного углеводородного топлива и энергетического биологического продукта. При соответствующем выборе компонентов для смесевых топливных композиций и оптимальном варьировании их составом возможно достижение наиболее приемлемых физико-химических свойств, отвечающим требованиям эффективной организации рабочего процесса серийного дизеля для мобильных машин сельскохозяйственного производства.

Благодаря высокой экологической эффективности, проявляемой биологическим компонентом в составе бинарного топлива, он может рассматриваться как средство физико-химического воздействия на процессы рабочего цикла двигателя. С учетом этого предлагается интерпретировать биологическую составляющую бинарного топлива как «физико-химическое средство». Подобная терминология достаточно редко используется в теории ДВС. В данном случае предполагается, что по смысловой значимости этот термин определяет биологическую добавку к рабочему телу двигателя как обладающую совокупной способностью проявлять свои свойства в физических и химических актах, лежащих в основе организации рабочего цикла.

Свойства биологического компонента как физического средства воздействия обусловлены такими его показателями, как плотность, динамическая вязкость и поверхностное натяжение. По результатам математического моделирования установлено, что отличие в указанных показателях биологического топлива проявляется в характере процесса смесеобразования, в первую очередь в организации его распыливания и формировании геометрии и дисперсной структуры топливного факела.

Вследствие повышенных показателей плотности, поверхностного натяжения и вязкости для биологического топлива размеры капель топливной струи при ее впрыскивании увеличиваются, что должно отразиться на возраста-

нии не только периода задержки воспламенения, но и его температурной чувствительности к процессу воспламенения в дизеле. При этом угол раскрытия топливной струи и ее боковая поверхность уменьшаются, что приведет к снижению количества испарившегося топлива за период задержки воспламенения.

Повышенные показатели плотности и динамической вязкости биотоплива способствуют возрастанию дальнотопливности топливного факела, увеличению доли менее активного пленочного смесеобразования и более медленному изменению давления в цилиндре двигателя в фазе диффузионного сгорания, что сказывается на увеличении длительности процесса сгорания в цикле и соответствующем снижении его эффективности.

Свойства биологического компонента как химического средства воздействия проявляются в изменении химических свойств горючей смеси благодаря присутствию кислорода в составе биологического соединения (свыше 10 %). Согласно известным положениям химической кинетики, в условиях избыточного содержания кислорода в реагирующей среде скорости окислительных реакций смеси повышаются. В этом смысле биологический компонент можно рассматривать как средство изменения реакционной способности реагирующей среды, что очевидно является одним из характерных свойств, проявляемых химически активными средствами.

Таким образом, изложенное выше позволяет интерпретировать биологическую добавку к углеводородному топливу как средство, обладающее совокупной способностью физического и химического воздействий на отдельных этапах протекания рабочего цикла двигателя. При этом следует отметить, что характер каждого из этих воздействий не однозначен по условию их проявления в показателях рабочего цикла двигателя.

С одной стороны, отмеченные свойства биологического компонента как химического средства воздействия способствуют повышению реакционной способности смеси, ускорению скоростей окислительных реакций и, как результат, снижают содержание в отработавших газах (ОГ) продуктов неполного сгорания (СО, СН и дисперсных частиц). Но по этой же причине инициируются реакции окисления азота воздуха, что приводит к повышению содержания в продуктах сгорания оксидов азота.

С другой стороны, присутствие биологического компонента в составе смесового топлива как физического средства воздействия оказывает негативное влияние на изменение характера смесеобразования, которое, в частности, может отразиться на снижении эффективности рабочего цикла двигателя.

Понятно, что отмеченные противоречия обуславливают необходимость системного поиска их наиболее рационального разрешения, что и предопределило целевую направленность данного исследования.

Методика оптимизации компонентного состава смесового топлива

Достижение наиболее приемлемых физико-химических свойств, отвечающим требованиям эффективной организации рабочего процесса двигателя, могут быть обеспечены соответствующим выбором компонентного состава бинарного топлива.

Учитывая сложный характер влияния доли биологического компонента в составе смесового топлива на такие параметры двигателя, как расход топлива, концентрации токсичных веществ в ОГ, в данном случае задача выбора состава подобного топлива ставилась как оптимизационная. Понятно, что задача оптимизации должна быть увязана с эффективностью рабочего цикла данного двигателя, а также с нормируемыми экологическими показателями его ОГ. Для ее решения использовался методологический принцип, предложенный проф. В.А. Марковым [1], который построен на одном из наиболее эффективных методов оптимизации – методе свертки, где обобщенный критерий оптимальности J_0 формируется в виде суммы:

$$J_0 = \sum_{i=1}^k \alpha_i J_i,$$

где J_i – частные критерии оптимальности, α_i – весовые коэффициенты.

В качестве частных критериев оптимальности выбраны эффективный КПД двигателя η_e и массовые выбросы нормируемых токсичных компонентов ОГ – оксидов азота NO_x , монооксида углерода CO , несгоревших углеводородов CH .

Однако в этой методике при решении оптимизационной задачи из состава частных критериев оптимальности исключен важнейший

критерий – эмиссия дисперсных частиц (ДЧ). Подобный паллиативный подход объясняется тем, что оценка эмиссии дисперсных частиц затруднена из-за отсутствия в отечественной исследовательской практике необходимого инструментария для определения реальных выбросов этих частиц.

В то же время, ДЧ являются одним из главных нормируемых компонентов дизельного выхлопа и относятся к наиболее опасным веществам, так как содержат в своем составе ряд известных мутагенов и канцерогенов.

Предлагается альтернативный выход из подобной ситуации. Для построения корректной оптимизационной модели была использована научно обоснованная методика [2], позволяющая определять выбросы ДЧ по уровню экспериментально замеренной дымности ОГ и концентрации в них несгоревших углеводородов. Это позволяет осуществлять поиск решения многокритериальной оптимизационной задачи с использованием уточненного обобщенного критерия оптимальности, в который был включен необходимый частный критерий оптимальности $J_{\text{ДЧ}}$, отражающий выбросы дисперсных частиц:

$$J_0 = a_{\eta_e} J_{\eta_e} + a_{\text{NO}_x} J_{\text{NO}_x} + a_{\text{CO}} J_{\text{CO}} + a_{\text{CH}} J_{\text{CH}} + a_{\text{ДЧ}} J_{\text{ДЧ}},$$

где J_{η_e} , J_{NO_x} , J_{CO} , J_{CH} , $J_{\text{ДЧ}}$ – частные критерии оптимальности соответственно по эффективному КПД η_e , выбросам NO_x , CO , CH и ДЧ; a_{η_e} , a_{NO_x} , a_{CO} , a_{CH} и $a_{\text{ДЧ}}$ – весовые коэффициенты частных критериев оптимальности.

Таким образом, в структуре оптимизационного поиска учтены все нормируемые компоненты ОГ двигателя, что, очевидно, должно способствовать повышению достоверности процедуры оптимизации. Частные критерии оптимальности определялись из соотношений:

$$J_{\eta_e} = \frac{\eta_{e,\text{ДТ}}}{\eta_{e,i}}; J_{\text{NO}_x} = \frac{e_{\text{NO}_x,i}}{e_{\text{NO}_x,\text{ДТ}}}; J_{\text{CO}} = \frac{e_{\text{CO},i}}{e_{\text{CO},\text{ДТ}}};$$

$$J_{\text{CH}} = \frac{e_{\text{CH},i}}{e_{\text{CH},\text{ДТ}}}; J_{\text{ДЧ}} = \frac{e_{\text{ДЧ},i}}{e_{\text{ДЧ},\text{ДТ}}},$$

где $\eta_{e,i}$, $e_{\text{NO}_x,i}$, $e_{\text{CO},i}$, $e_{\text{CH},i}$, $e_{\text{ДЧ},i}$ – параметры двигателя, работающего на i -м двухкомпонентном топливе; $\eta_{e,\text{ДТ}}$, $e_{\text{NO}_x,\text{ДТ}}$, $e_{\text{CO},\text{ДТ}}$, $e_{\text{CH},\text{ДТ}}$, $e_{\text{ДЧ},\text{ДТ}}$ – параметры двигателя, работающего на дизельном топливе.

При разработке любого метода оптимизации важным фактором, обуславливающим его

достоверность, является принятый принцип выбора весовых коэффициентов, определяемых значимостью того или иного частного критерия. В разработанной методике значимость частных критериев, характеризующих токсичность, определяется по соответствию исследуемого двигателя действующим нормам на токсичность ОГ.

С целью реализации установленного принципа выбора весовых коэффициентов, согласно рекомендациям [1], предлагается весовой коэффициент a_{η_e} принять равным единице, а весовые коэффициенты a_{NOx} , a_{CO} , a_{CH} и $a_{дч}$ определять в виде отношений действительной эмиссии токсичных компонентов ОГ дизеля, работающего на дизельном топливе ($e_{NOx,дт}$, $e_{CO,дт}$, $e_{CH,дт}$, $e_{дч,дт}$), к предельным величинам эмиссии, определяемым нормативными требованиями на токсичность ОГ ($e_{NOx,пр}$, $e_{CO,пр}$, $e_{CH,пр}$, $e_{дч,пр}$), то есть:

$$a_{NOx} = \frac{e_{NOx,дт}}{e_{NOx,пр}}; a_{CO} = \frac{e_{CO,дт}}{e_{CO,пр}};$$

$$a_{CH} = \frac{e_{CH,дт}}{e_{CH,пр}}; a_{дч} = \frac{e_{дч,дт}}{e_{дч,пр}}.$$

Сравнительный анализ показателей по токсичности ОГ и топливной экономичности дизелей, работающих на смесевых топливах, целесообразно проводить с использованием относительного обобщенного критерия оптимальности \hat{J}_0 , который представляет собой отношение критерия J_0 , полученного для данного смесового топлива, к значению этого критерия $J_{0,дт}$, соответствующему работе на дизельном топливе, то есть:

$$\hat{J}_0 = \frac{J_0}{J_{0,дт}}.$$

Минимум относительного обобщенного критерия \hat{J}_0 отражает оптимальный компонентный состав бинарного топлива, при котором обеспечивается предельно возможное улучшение топливно-экономических и экологических показателей двигателя, работающего на этом топливе.

Разработанная методика выбора оптимизационного компонентного состава смесового биоуглеводородного топлива позволяет решать целый ряд задач по совершенствованию экологических и топливно-экономических качеств дизелей, работающих на этом топливе. Однако для окончательного решения пробле-

мы в целом потребуется разработка дополнительных мер, в частности, для повышения эффективности сгорания смесового топлива и снижения эмиссии оксидов азота, что является характерной проблемной задачей, связанной с применением практически любого вида биологического топлива. Ее решение является предметом самостоятельного исследования.

Совершенствование показателей сгорания биоуглеводородных топливных композиций применением средств химической активации

Эффективной мерой, улучшающей кинетические показатели процесса сгорания биологического компонента смесового топлива, может оказаться применение средств химической активации [3]. Химические средства активации общеизвестны и относительно давно применяются, например, в виде коммерческих присадок к топливу. Особое место среди этих средств занимает водород. Высокая эффективность водорода как химического активатора подтверждена данными многочисленных экспериментов.

В контексте обсуждаемой проблемы, с учетом известной высокой реакционной активности водорода, проявляемой в снижении эмиссии токсичных веществ, предложено и сформулировано терминологическое обоснование словосочетания «водородный химический реагент», которое в теории ДВС используются крайне редко.

В общеизвестном варианте использования водорода его значительная по величине добавка к базовому топливу выполняет функции энергетически полноправного компонента топливной смеси, который вносил существенные изменения в протекание рабочего цикла двигателя: повышаются уровни максимальных давления и температуры.

В данном исследовании, с учетом его целевой направленности, водород предлагается применять лишь в виде незначительной по величине присадки, оптимизированной по условию наибольшего ее проявления в механизме химической кинетики образования токсичных веществ. В итоге эмиссия вредных веществ уменьшается практически без повышения исходных максимальных уровней температуры и давления в рабочем цикле двигателя.

В рамках принятого условия аналитически обоснован алгоритм корректного дозирова-

ния водородосодержащего реагента в структуре системы питания двигателя смесевым топливом. Установлено, что оптимальное содержание водорода как химического реагента для каждого режима его работы должно соответствовать (по энергетическому эквиваленту) 0,6 % от химической энергии потребляемого смесевого топлива. Отсюда следует, что необходимая доза реагента должна варьироваться не только по мере изменения нагрузки (расхода смесевого топлива) двигателя, но и с учетом его компонентного состава вследствие различия в показателях теплоты сгорания углеводородной и биологической составляющих этого топлива.

Результаты многочисленных исследований дают основание предположить, что водородный реагент является на сегодняшний день наиболее эффективным «реакционно-химическим инструментом», способным активно воздействовать на процессы образования токсичных веществ и догорания продуктов неполного сгорания углеводородных и биологических компонентов топлива, повышая эффективность использования его химической энергии.

Детальный механизм, обуславливающий столь высокую активность водорода в указанных процессах, до настоящего времени остается малоизученным в теории ДВС. В общем виде в теоретической химии детально исследована уникальная способность водорода, которая проявляется в кинетике протекания актов разветвления в реакциях окисления H_2 в смеси с O_2 . С учетом этого положения для условий протекания рабочего процесса дизеля можно предположить [3], что в зоне высокотемпературного реагирования топлива молекула водорода диссоциирует с образованием двух атомов, которые, как известно, являясь активными радикалами, играют роль центров при зарождении химических реакций горения. Каждый из этих центров может инициировать новое реакционное звено с образованием еще большего числа активных центров реакций. Именно уникальной способностью водорода генерировать активные центры и проявлением цепочного механизма развития реакций и можно объяснить необычайно высокую эффективность воздействия даже небольших доз этого газа на процессы реагирования рабочей смеси в дизеле.

Кинетические особенности системы активированного горения смесевого топлива в дизеле

Массовое использование водорода в двигателях сдерживается отсутствием инфраструктуры его производства и распределения, высокой стоимостью, низким уровнем эксплуатационной безопасности. Выход из подобной ситуации может быть найден, если аккумулялирование (хранение) водорода на борту мобильного средства осуществлять в химически связанном состоянии в виде жидкого соединения [4, 5]. Такой способ аккумулялирования водорода, использованный в данном исследовании, наиболее экономически оправдан и безопасен по сравнению с любым известным способом (компримированным или криогенным) бортового хранения этого газа.

В качестве жидкого соединения – носителя водорода был использован метиловый спирт (метанол, CH_3OH), который, пройдя стадию термохимической переработки (конверсии) в бортовом реакторе, преобразовывался в газовую смесь с содержанием водорода 12 %. Другим целевым продуктом конверсии являлся монооксид углерода (87 %) с небольшим содержанием (в пределах 1 %) побочных продуктов [4, 5].

Учитывая то, что в состав продуктов конверсии метанола (ПКМ) входят два основных соединения с различными физико-химическими свойствами, проведено дополнительное исследование кинетических особенностей системы горения смесевого топлива в условиях рабочего цикла дизеля с участием ПКМ.

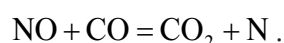
Детальный механизм воздействия водородосодержащих ПКМ на процессы окисления (сгорания) смесевых топлив до настоящего времени остается еще малоисследованным. Однако уже сейчас, опираясь на известные положения теории химической кинетики и катализа, в рамках рабочей гипотезы можно указать на ряд характерных свойств ПКМ, влияющих на протекание процессов горения смесевого топлива.

В общем случае весь процесс сгорания смесевого топлива с добавленными к нему ПКМ условно разделим на три характерные фазы, отличающиеся по характеру и эффективности проявляемых ПКМ свойств.

В самом начале возникновения очагов самовоспламенения топлива скорость пламени близка к скорости ламинарного горения. В соответствии с этим процесс сгорания в на-

чальной (кинетической) фазе в основном подчиняется закономерностям мелкомасштабного турбулентного горения, скорость которого обусловлена величиной нормальной скорости пламени. В этих условиях, с учетом повышения реакционной способности горючей смеси, благодаря присутствию водородного реагента и биологического средства (источник избыточного кислорода) ее сгорание должно инициироваться, увеличивая скорость ламинарного горения.

Скорость распространения пламени в последующей – диффузионной – фазе сгорания подчиняется законам крупномасштабного турбулентного горения, мало зависит от реакционных свойств горючей смеси и практически почти целиком определяется скоростями крупных турбулентных пульсаций. В этой фазе происходит основное тепловыделение и достигается максимальная температура цикла, предопределяющая выход окислов азота. Несколько большая температура горения водорода – 2449К, в сравнении с топливом – 2330К, не может существенным образом повлиять на увеличение содержания в продуктах сгорания оксидов азота вследствие малой доли содержания реагента в заряде. Вместе с тем, высокая концентрация в ПКМ оксида углерода обуславливает определенное снижение максимальной температуры цикла (теплота сгорания соединения СО в 4 раза ниже этого показателя для углеводородов), дополнительно способствуя разложению NO, протекающему по реакции:



В итоге результирующие выбросы оксидов азота при применении присадки к рабочему телу ПКМ могут быть снижены.

В пристеночных зонах камеры сгорания дизеля концентрируется значительное количество топлива. В этих зонах скорости и масштабы турбулентных пульсаций существенно меньше, чем в основном объеме камеры, в связи с чем скорости распространения пламени по мере приближения к стенкам уменьшаются. Это приводит к тому, что сгорание в завершающей, третьей, фазе – фазе догорания снова, как и в начальной фазе, начинает подчиняться законам мелкомасштабного турбулентного горения, скорость которого существенно зависит от реакционной способности горючей смеси и наличия в ней активирующих средств.

В обычных условиях (без активаторов) с уменьшением скорости сгорания фаза догорания в дизеле протекает в значительной доле рабочего заряда, и весь процесс горения существенно затягивается в такте расширения, что уменьшает эффективность использования выделяющейся при сгорании теплоты. Более того, в непосредственной близости от сравнительно холодных стенок камеры сгорания происходит гашение пламени. Это приводит к прекращению реакций горения в части горючей смеси, находящейся в зоне гашения, и концентрация продуктов неполного сгорания резко возрастает. Толщина зоны гашения для традиционных топливно-воздушных смесей составляет 2 мм, для водородно-воздушных смесей толщина зоны гашения не превышает 0,6 мм.

Водородный реагент как источник генерирования активных частиц совместно с биологической добавкой как источником избыточного кислорода способствуя повышению реакционных свойств реагирующей среды, обуславливает значительно больший объем сгоревшей смеси в зоне гашения; полнота сгорания топлива повышается, а эмиссия несгоревших компонентов топлива и дисперсных частиц (ДЧ) уменьшается.

Результаты проведенного анализа дают основание предположить, что использование указанных реагентов является эффективным реакционно-активирующим фактором, способным активно воздействовать на процессы выгорания компонентов топлива, повышая полноту их сгорания.

В заключение следует отметить, что снижение уровня эмиссии продуктов неполного сгорания топлива и ДЧ благодаря активирующему эффекту указанных реагентов связано не только с экологическими, но и с экономическими показателями рабочего цикла дизеля. Из теории сгорания известно, что существует «обратная» связь между актами неполного догорания топлива и частиц и процессами, которые непосредственно влияют на тепловые потери и термодинамическую эффективность цикла. Благодаря использованию активирующих реагентов обеспечивается снижение энергетических потерь, связанных с недогоранием части топлива и ДЧ, что в итоге обуславливает повышение эффективности использования химической энергии смесевое топлива в рабочем цикле двигателя.

Описанное выше проявление отмеченных эффектов реакционного воздействия на про-

цессы выгорания смешанного топлива в дизеле, безусловно, не является исчерпывающим. Тем не менее, предварительный анализ позволяет в первом приближении прогнозировать качественные изменения в исследуемых процессах рабочего цикла дизеля благодаря реакционно-му влиянию реагентов. Выявленные при этом кинетические изменения в процессах, формирующих рабочий цикл дизеля, и послужили научно-методической основой при разработке концепции предлагаемого метода.

Формулирование концепции метода

Концепция в своей основе базируется на трех основных положениях, которые в общем виде по результатам исследования могут быть сформулированы следующим образом.

1. Учитывая, что проблема создания высокоэффективного рабочего цикла дизеля при переводе его на питание биологическим топливом сопряжена с необходимостью реализации целого ряда сложных технических решений, требует внесения серьезных изменений базовой конструкции двигателя и его топливной аппаратуры, предлагается частичное разбавление биологического компонента дизельным топливом. При применении подобной топливной смеси частично решаются задачи, связанные с отличием физико-химических свойств биологического топлива от традиционного нефтяного.

2. Учитывая сложный, а в ряде случаев, неоднозначный характер влияния доли биологического компонента в составе бинарного топлива на экологические и топливно-экономические показатели двигателя, выбор рационального компонентного состава смешанного топлива осуществляется на основе обобщенного критерия оптимальности, который позволяет интегрально оценить оптимальную величину этой доли. При этом прогнозируется достижение предельно возможного улучшения указанных показателей двигателя.

3. Одной из ключевых сопутствующих проблем, возникающей при использовании биологических добавок к углеводородному топливу, является проблема повышения эмиссии оксидов азота, без успешного решения которой разработка конкурентоспособного двигателя, работающего на биоуглеводородном топливе, остается проблематичной. С целью снижения эмиссии с ОГ токсичных веществ, в первую очередь, оксидов азота, в состав свежего заряда дизеля вводится строго дозированная порция

химически активного реагента. Благодаря применению реагента дополнительно прогнозируется также повышение кинетических показателей сгорания и эффективности использования энергии смешанного топлива.

Таким образом, предложенная концепция метода может быть интерпретирована как «комплексная», которая отображает скоординированное, совокупное воздействие на показатели работы биодизеля одновременно двух физико-химических факторов, один из которых привнесен оптимизацией компонентного состава смешанного топлива, а другой – применением химических реагентов.

Результаты исследования

Результаты аналитического исследования, их достоверность, а также правомерность предложенной концепции в целом оценивались путем опытной апробации на моторном испытательном стенде с тракторным дизелем типа 4Ч 10,5/12 (Д-144). Для его питания использовалась смесь дизельного топлива и метилового эфира рапсового масла (МЭРМ) в качестве биологического компонента. С использованием предложенной методики для исследуемого дизеля проведена оптимизация компонентного состава смешанного топлива, по результатам которой оптимальное содержание в нем биологического компонента соответствовало 40 %. Для генерирования водородосодержащего реагента (ПКМ) разработан опытный образец реактора конверсии метанола, функциональные параметры которого были адаптированы к условиям работы тракторного дизеля. В структурную схему штатной системы питания дизеля встраивалась опытная подсистема ввода и дозирования ПКМ. Для измерения компонентного состава ОГ стенд оборудован газоаналитической аппаратурой и дымомером модели 415S, входящих в состав стандартного измерительного комплекса VISA-4000 (Италия). Логика опытной апробации строилась в русле стандартного регламента 8-режимного испытательного цикла Правил ЕЭК ООН № 96 (ГОСТ Р41.96-2005 для дизелей с/х назначения).

Результаты испытаний исследуемого дизеля при его работе на дизельном топливе (исходный вариант), на бинарном (двухкомпонентном) биоуглеводородном топливе оптимизированного компонентного состава, а также на бинарном топливе с активирующим химическим реагентом приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Показатели работы дизеля Д-144 с различными способами организации рабочего процесса
по регламенту 8-режимного испытательного цикла Правил ЕЭК ООН R 96**

Показатели двигателя	Способ организации рабочего процесса		
	Работа на ДТ (исходный вариант)	Работа на бинарном топливе (ДТ+МЭРМ)	Работа на бинарном топливе (ДТ+МЭРМ) с H_2 -реагентом
Интегральный эффективный КПД, η_e	0,332	0,331	0,343
Интегральный удельный выброс монооксида углерода e_{CO} , г/(кВт·ч)	3,46	3,38	3,071
Интегральный удельный выброс углеводородов e_{CH} , г/(кВт·ч)	1,52	1,282	1,021
Интегральный удельный выброс дизельных частиц $e_{дч}$, г/(кВт·ч)	0,70	0,494	0,364
Интегральный удельный выброс оксидов азота e_{NOx} , г/(кВт·ч)	7,40	7,53	6,52

Из табл. 1 видно, что средне интегральные за 8-режимный испытательный цикл удельные массовые выбросы нормируемых компонентов ОГ (CO, CH и ДЧ) исследуемого дизеля при его работе на бинарном топливе с оптимизированным компонентным составом были снижены. Однако при этом выбросы оксидов азота, как и ожидалось, возрастали по отношению к исходному варианту (работа на дизельном топливе).

При работе дизеля на бинарном топливе с использованием водородосодержащего реагента средне интегральные за цикл удельные массовые выбросы монооксида углерода уменьшились на 11,2 %, углеводородов – на 32,8 %, дисперсных частиц – на 48 %.

При этом, выбросы оксидов азота оказались ниже уровня выбросов этого компонента ОГ не только для дизеля, работающего на бинарном топливе, но и для его исходного варианта (на 11,9 %). А эффективность использования энергии биоуглеводородного смесового топлива, как и прогнозировалось, возросла, о чем свидетельствует повышение результирующего за испытательный цикл эффективного КПД двигателя на 3,3 %.

Заключение

По результатам проведенного исследования можно заключить, что предложенную в данной работе концепцию метода, направленного на повышение эффективности использования в дизелях бинарных биоуглеводородных топлив, можно отнести к одному из перспективных направлений в сфере активно

развивающейся биоэнергетики. Использование подобных топлив позволяет преобразовывать практически любой серийный дизельный двигатель в конкурентоспособную энергетическую установку с более высокими эколого-экономическими показателями по сравнению с двигателями, работающими на традиционных нефтяных топливах.

Стратегия реализации метода основана на принципе скоординированного и совокупного воздействия на показатели работы дизеля одновременно двух физико-химических факторов, один из которых привнесен оптимизацией доли биологической добавки в составе смесового топлива, а другой – применением химических реагентов, что может быть отнесено к числу новых, еще не изученных подходов к решению обозначенной проблемы.

Важно отметить, что в структуре комплекса средств для реализации метода использован способ бортового аккумулирования водорода в химически связанном состоянии в жидкой среде, который обеспечивает высокую эксплуатационную безопасность; для генерирования этого реагента может быть использован достаточно компактный, конструктивно простой и дешевый в производстве реактор. Стоимость генерируемого в бортовой системе водорода на два порядка ниже стоимости этого газа, произведенного промышленным способом.

Для производственных условий двигателестроительной отрасли предложенный метод обуславливает дополнительный ряд преимуществ. При его практической реализации от-

падает необходимость изменения базовой конструкции серийного двигателя, существенного переоснащения всей технологической структуры, связанной с его производством. Благодаря простоте предложенных технических и функциональных средств, необходимых для реализации метода, его практическое внедрение в двигателестроении не связано с серьезными финансовыми затратами.

В своей ключевой основе метод направлен на оперативное и рентабельное решение актуальных проблем энергосбережения и повышения экологической и топливно-энергетической безопасности в среде национального сельскохозяйственного производства.

Литература

1. Марков В.А., Гайворонский А.И., Грехов Л.В., Ивашченко Н.А. Работа дизелей на нетрадиционных топливах. М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2008. 464 с.
2. Парсаданов И.В. Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе топливно-экологического критерия. Харьков: Изд. центр НТУ «ХПИ», 2003. 244 с.
3. Фомин В.М. Системы химического воздействия на параметры рабочего цикла дизеля // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2004. № 6. С. 34–38.
4. Фомин В.М., Апельинский Д.В., Каменев В.Ф. Генерирование водородосодержащего газа на борту транспортного средства // Известия МГТУ «МАМИ». 2013. № 1 (15). Т. 1. С. 204–212.
5. Fomin V.M., Makunin A.V. Thermo chemical recovery of heat contained in exhaust gases of internal combustion engines (a general approach to the problem of recovery of heat contained in exhaust gases) // Theoretical foundations of chemical engineering. Vol. 43. No 5. 2009, pp. 834–840.

References

1. Markov V.A., Gayvoronskiy A.I., Grekhov L.V., Ivashchenko N.A. Rabota dizeley na netraditsionnykh toplivakh [The work of diesel engines on unconventional fuels]. Moscow: Izd-vo «Legion-Avtodata» Publ., 2008. 464 p.
2. Parsadanov I.V. Povyshenie kachestva i konkurentosposobnosti dizeley na osnove toplivno-ekologicheskogo kriteriya [Improving the quality and competitiveness of diesel engines based on the fuel and environmental criteria]. Khar'kov: Izd. tsentr NTU «KhPI» Publ., 2003. 244 p.
3. Fomin V.M. Systems of chemical effect on the parameters of the working cycle of a diesel engine. Traktory i sel'skokhozyaystvennye mashiny. 2004. No 6, pp. 34–38.
4. Fomin V.M., Apelinskiy D.V., Kamenev V.F. Generation of hydrogen-containing gas on board of a vehicle. Izvestiya MGTU «MAMI». 2013. No 1 (15). Vol. 1, pp. 204–212.
5. Fomin V.M., Makunin A.V. Thermo chemical recovery of heat contained in exhaust gases of internal combustion engines (a general approach to the problem of recovery of heat contained in exhaust gases). Theoretical foundations of chemical engineering. Vol. 43. No 5. 2009, pp. 834–840.