

## СГОРАНИЕ И ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЕ В ДИЗЕЛЕ, РАБОТАЮЩЕМ НА СМЕСЕВОМ СПИРТОВОМ ТОПЛИВЕ

В.А. Лиханов, д.т.н., проф., О.П. Лопатин, к.т.н, доц.,  
Вятская государственная сельскохозяйственная академия

Обоснована целесообразность использования в малоразмерных высокооборотных дизелях смесового топлива на основе метилового и этилового спиртов. Рассмотрены способы их получения и применения в высокооборотных дизелях. Проведено микроскопирование спирто-топливных эмульсий (СТЭ). Для исследованных СТЭ стабильность к коалесценции составила от 4 до 6 суток. Представлены результаты экспериментальных исследований по влиянию метанола-топливной (МТЭ) и этанола-топливной эмульсий (ЭТЭ) на индикаторные показатели, характеристики процесса сгорания и тепловыделения высокооборотного дизеля размерности Ч11/12,5. Определены значения показателей процесса сгорания и характеристик тепловыделения: при работе на дизельном топливе, МТЭ и ЭТЭ.

В то время как для сохранения природных ресурсов применяются законодательные ограничения в отношении использования ископаемых видов топлива, все большее внимание привлекают в качестве перспективных устойчивых источников энергии смесевые спиртовые топлива на основе метанола и этанола. Метанол ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) рассматривается как один из видов оптимального топлива для ДВС, а этанол ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) считается одним из важнейших компонентов биотоплива и перспективным альтернативным топливом для ДВС. Поскольку цены на нефть растут по мере накопления в атмосфере парниковых газов и ужесточения законодательных нормативов в области охраны окружающей среды, для решения этих проблем необходимо использовать новые возобновляемые и экологически безопасные виды топлива. Метанол и этанол потенциально могут привести к некоторым решениям этих проблем, так как для их производства существуют достаточно обильные ресурсы и эти спирты характеризуются относительно низкими выбросами вредных веществ при горении [1].

В настоящее время существует достаточно способов получения спиртов в качестве альтернативного топлива из различных исходных материалов (биомасса, природный газ, коксовый



газ, углекислый газ и др.). Этанол в основном производится путем ферментации из двух исходных материалов, которые представляют собой сырье на основе крахмала, включая кукурузу, зерна, ячменя, зернового сорго, сахарного сырья, включая фрукты, сахарного тростника, цитрусовой патоки, тростникового сорго, сахарной свеклы. Кроме того, существуют способы для производства этанола из целлюлозных материалов, таких как древесные или бумажные отходы. Помимо этих исходных материалов, этанол получают путем гидратации этилена [2, 3].

Этанол может быть получен прямой ферментацией сахаров с дрожжами, из лигноцеллюлозных материалов и каталитической гидратацией этилена (рис. 1).

Процессы, необходимые для производства биоэтанола из различных сырьевых материалов, приведены в табл. 1.

Метанол — самый простой спирт и известен как древесный спирт из-за способа получения путем пиролиза древесины. В настоящее время метанол широко используется в качестве товарного химиката. Он непосредственно используется и представляет собой сырье для производства многих спиртов, жидких топлив, химикатов и

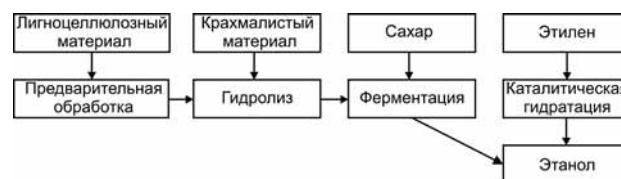


Рис. 1. Способы получения этанола

Таблица 1

## Технологии производства биоэтанола из различных сырьевых материалов

Сырье	Обработка
Дерево	Кислотный гидролиз + ферментация
Дерево	Ферментативный гидролиз + ферментация
Солома	Кислотный гидролиз + ферментация
Солома	Ферментативный гидролиз + ферментация
Пшеница	Солодка + ферментация
Карамельная тросточка	Ферментация
Сахарная свекла	Ферментация
Зерно кукурузы	Ферментация
Кукурузный стебель	Кислотный гидролиз + ферментация
Сладкий сорго	Ферментация

пластмасс, но в основном используется при производстве других химических веществ. Метанол можно получать из возобновляемых и невозобновляемых ископаемых видов топлива, включая природный газ, уголь, биомассу, углекислый газ, находящийся в атмосфере либо в составе дымовых газов, образующихся в результате сжигания ископаемых видов топлива, а также из отходов, содержащих в своей структуре углерод. Эффективность синтеза метанола из различных материалов существенно различается, но наиболее доступным сырьем для синтеза метанола является природный газ. При этом эффективность его синтеза составляет более 70 % [4, 5].

Самое большое преимущество метанола и этанола как моторного топлива — это наличие в их составе кислорода. Дизельное топливо не содержит атомов кислорода, тогда как в составе метанола содержится 10, а этанола — 50 % кислорода по массе. Поэтому для снижения токсичности отработавших газов метанол и этанол могут применяться в высокооборотных дизелях в составе смесей биотоплива с дизельным топливом [6].

Анализ работ, проводимых в Российской Федерации и за рубежом по исследованию возможности применения метанола и этанола в качестве моторного топлива для высокооборотных малоразмерных дизелей, позволяет сделать вывод о том, что они ведутся в различных направлениях, как при создании новых моделей дизелей, разработанных для работы на спирте, так и при модернизацией дизелей, выпускаемых серийно и оборудованных для работы на спиртовом топливе без значительных конструктивных изменений [7].

Известны также различные способы применения спиртового топлива в высокооборотных малоразмерных дизелях. Так, например, известны

системы отдельной подачи спирта и дизельного топлива в камеру сгорания дизеля. Использование двухтопливных систем позволяет обеспечить максимально возможное замещение дизельного топлива спиртом (до 90 %), и значительно снизить токсичность и дымность отработавших газов [8].

Используют карбюрирование или впрыскивание спирта во впускную систему в сочетании с принудительным воспламенением топливной смеси. При карбюрировании спирта во впускную систему в сочетании с впрыскиванием дизельного топлива в цилиндр дизеля, кроме снижения токсичности отработавших газов, могут решаться задачи оптимального управления количеством подаваемых отдельно видов топлива в диапазоне эксплуатационных режимов работы. При этом необходим подогрев смеси с целью исключения отрицательного эффекта понижения температуры заряда вследствие затрат теплоты на испарение спирта. Однако следует отметить необходимость весьма существенных затрат на переоборудование дизеля для работы по вышеописанным способам [9].

Значительно повышается эффективность применения спирта при наличии турбонаддува. Свежий заряд воздуха, попадая в турбокомпрессор, сжимается, что вызывает повышение температуры и исключает необходимость предварительного его прогрева (что особенно важно в холодное время года). Спирт, впрыснутый в поток теплого воздуха, легко испаряется и спирто-воздушная смесь нагнетается в камеру сгорания. Впрыснутое через форсунку распыленное дизельное топливо, смешиваясь с парами спирта, быстро прогревается, воспламеняется и сгорает. Высокие октановые числа спирта (у метанола 120, у этанола 108) препятствует воспламенению до подачи порции дизельного топлива. Для монтажа данной системы дизель должен быть оборудован системой турбонаддува, к впускному коллектору присоединяют нагнетательный трубопровод с фильтрами и шлангами-регуляторами. Давление воздуха, создаваемое турбокомпрессором, обеспечивает подачу спиртового раствора в смесительную камеру, а спирто-воздушная смесь затем нагнетается в камеру сгорания [9].

Нельзя не отметить способ изменения свойств энергоносителя. Для повышения цетанового числа спирта (у метанола 5, у этанола 8) за рубежом применяют специальные химические добавки. Это позволяет использовать такой усовершенствованный энергоноситель непосредственно в дизеле без какой-либо его перенастройки. Исследования показали, что для существенного изменения цетанового числа спирта объемы химических добавок должны быть не менее 20 %

от объема энергоносителя. Однако в настоящее время их стоимость довольно высока [10].

Подача спирта в цилиндры высокооборотного малоразмерного дизеля в виде СТЭ — наиболее простой и доступный способ применения метанола и этанола. Этот способ не требует значительных затрат на внесение конструктивных изменений и может быть реализован на дизелях, находящихся в эксплуатации. Приготовление высокостабильных эмульсий может осуществляться вне топливной системы заблаговременно, а образование мало-стабильной эмульсии возможно в топливной системе дизеля. Для приготовления СТЭ с высокой стабильностью необходимо использовать широкодоступные и дающие значительный эффект поверхностно-активные вещества, а также определить оптимальную концентрацию водного раствора спирта [11]. В настоящее время преимущественное развитие получает способ эмульгирования при низком давлении смешиваемых компонентов с применением электрических, электромагнитных и других диспергаторов, а также способ эмульгирования при высоком давлении компонентов на специальных устройствах, содержащих завихрители, полости резких расширений и сужений, благодаря чему достигается дробление компонентов на капли и их перемешивание [12].

Разумеется, что все перечисленные способы применения топлив на основе этилового и метилового спиртов в высокооборотных малоразмерных дизелях имеют перспективу, поскольку направлены на улучшение экологических показателей дизелей и замещение моторного нефтяного топлива, а реализация того или иного метода должна решаться в соответствии с конструктивными особенностями двигателя и в ходе его первичных испытаний.

В Вятской государственной сельскохозяйственной академии на базе кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов проведены исследования дизеля 4Ч11/12,5 при работе на СТЭ (спирт — этанол либо метанол) — 25 %, моюще-диспергирующая присадка сукцинимид С-5А — 0,5 %, вода — 7 %, дизельное топливо — 67,5 %) [13].

Приготавливаемые СТЭ должны быть стабильны во времени до начала процесса седиментации (расслоения дисперсных систем в виде осадка под действием силы тяжести). В течение этого времени проба спиртовой эмульсии может принять первоначальный состав (рис. 2, а) за счет легкого встряхивания (или вибрации двигателя). После завершения седиментации в пробе спиртовой эмульсии начинается процесс флокуляции — образование крупных капель, составляющих исходные ингредиенты (рис. 2, б). Дальнейшее

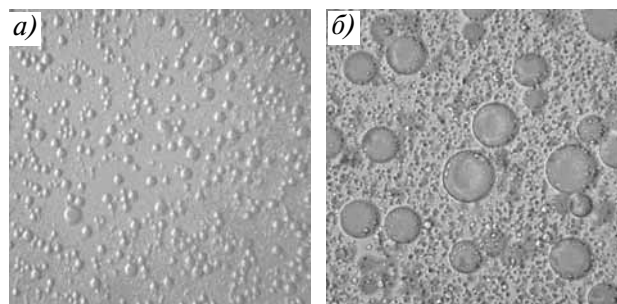


Рис. 2. Снимок микроскопирования ЭТЭ (увеличение в 100 раз):

а — сразу после приготовления;  
б — в начале процесса флокуляции

увеличение объема капель и их слияние приводит к завершению процесса коалесценции, т. е. полному разделению дисперсной среды на спиртовую и углеводородную фазы. Для исследованных СТЭ стабильность к коалесценции составила от 4 до 6 суток [11].

Индицирование процесса сгорания осуществляли с помощью электропневматического индикатора МАИ-5А с установленным датчиком давления в головке блока 1-го цилиндра. Установка отметчика верхней мертвой точки (ВМТ) проверялась по положению поршня в ВМТ в первом цилиндре и контролировалась по диаграмме сжатия-расширения без подачи топлива. Обработку индикаторных диаграмм проводили с помощью компьютерной программы ЦНИДИ—ЦНИИМ [14].

На рис. 3 изображены индикаторные диаграммы при работе дизеля на стандартном топливе и СТЭ. Анализируя представленные индикаторные диаграммы, можно отметить увеличение периода задержки воспламенения (ПЗВ) и максимального давления цикла ( $p_z$ ) при переходе

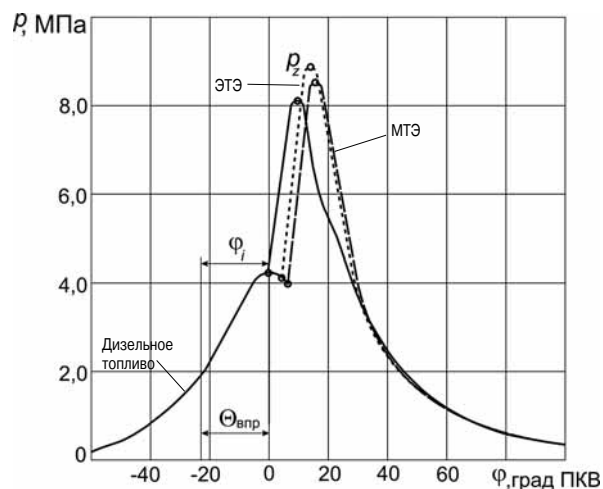


Рис. 3. Индикаторные диаграммы высокооборотного дизеля размерности 4Ч11/12,5 ( $\Theta_{впр} = 23^\circ$ ,  $n = 2200$  об/мин)

с дизельного топлива на СТЭ. Так, применение ЭТЭ увеличивает угол, соответствующий ПЗВ, ( $\varphi_i$ ) на  $5,5^\circ$ , МТЭ — на  $7,5^\circ$  по отношению к дизельному процессу. При этом  $p_z$  увеличивается при работе на МТЭ на  $0,4$  МПа, на ЭТЭ — на  $0,8$  МПа.

На рис. 4 представлены показатели процесса сгорания высокооборотного дизеля 4Ч11/12,5 при работе по нагрузочной характеристике.

Сравнение показателей процесса сгорания дизеля, работающего на дизельном топливе и СТЭ наглядно демонстрируют «классический» рост максимальной среднemasсовой температуры в цилиндре ( $T_{max}$ ), максимального давления ( $p_z$ ), степени повышения давления ( $\lambda$ ), жесткости процесса сгорания  $(dp/d\varphi)_{max}$  и увеличение угла ПЗВ ( $\varphi_i$ ).

На рис. 5 представлены характеристики тепловыделения дизеля 4Ч11/12,5 при работе на режиме полной мощности в зависимости от угла поворота коленчатого вала (ПКВ).

Показатели рабочего процесса дизеля при работе на МТЭ характеризуются следующими величинами:  $T_{max}$  составляет  $2430$  К при значении угла ПКВ  $\varphi = 14,0^\circ$  после ВМТ; в момент открытия выпускного клапана температура ОГ составляет  $1000$  К, что ниже в  $2,4$  раза величины  $T_{max}$ . При работе дизеля на ЭТЭ величина  $T_{max}$  составляет  $2510$  К при значении угла ПКВ  $\varphi = 12,0^\circ$  после ВМТ. В момент открытия выпускного клапана температура ОГ составляет

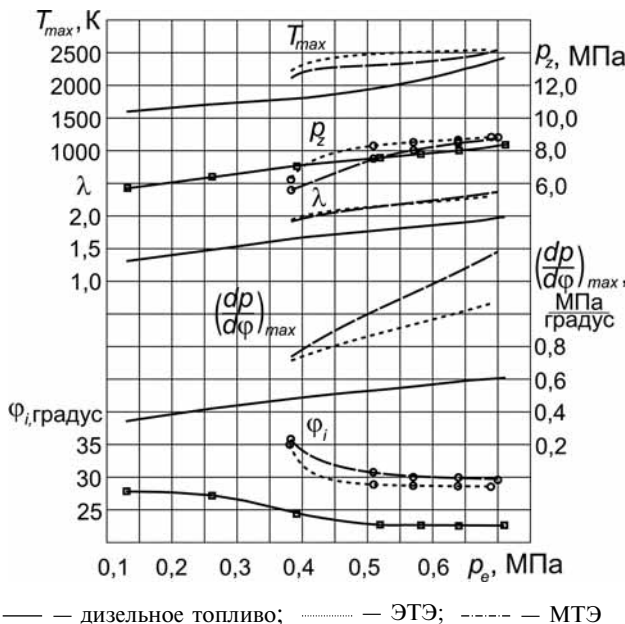


Рис. 4. Изменение показателей процесса сгорания высокооборотного дизеля размерности 4Ч11/12,5 ( $\Theta_{впр} = 23^\circ$ ,  $n = 2200$  об/мин) при работе по нагрузочной характеристике

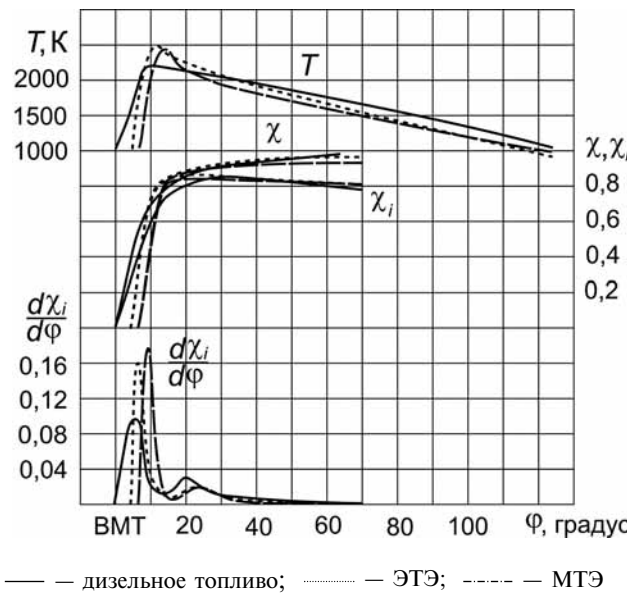


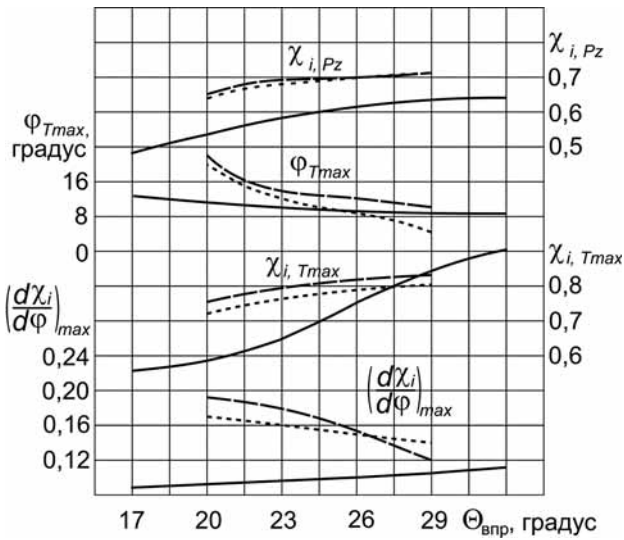
Рис. 5. Характеристики тепловыделения высокооборотного дизеля размерности 4Ч11/12,5 на режиме полной мощности в зависимости от угла ПКВ ( $\Theta_{впр} = 23^\circ$ ,  $n = 2200$  об/мин)

900 К, что ниже в  $2,8$  раза ее максимального значения.

Работа дизеля на СТЭ характеризуется увеличением скорости активного тепловыделения ( $d\chi_i/d\varphi$ ) и сдвигает максимум скорости вправо от ВМТ. Так, в случае работы дизеля на МТЭ, максимальная величина  $d\chi_i/d\varphi$  составляет  $0,180$  при значении угла ПКВ  $\varphi = 9,0^\circ$  после ВМТ, что на  $89,5\%$  выше, чем в дизельном процессе. Максимальное значение скорости активного выделения тепла при работе дизеля на ЭТЭ составляет  $0,160$  при значении угла ПКВ  $\varphi = 6,5^\circ$  после ВМТ, что на  $68,4\%$  выше, чем в дизельном процессе. Также необходимо отметить, что наличие второго максимума на кривых скорости активного выделения тепла  $d\chi_i/d\varphi$ , как в дизельном процессе, так и при работе на СТЭ, вызвано появлением дополнительной турбулизации топливо-воздушной смеси в камере сгорания, вследствие истечения рабочего тела из камеры сгорания в надпоршневое пространство в процессе расширения.

Характеристики тепловыделения высокооборотного дизеля в зависимости от изменения установочного угла опережения впрыскивания топлива ( $\Theta_{впр}$ ) изображены на рис. 6.

С увеличением  $\Theta_{впр}$  возрастают значения активного выделения теплоты при достижении максимального давления сгорания ( $\chi_i, p_z$ ) и максимальной температуры цикла ( $\chi_i, T_{max}$ ). Так, при работе дизеля на МТЭ  $\chi_i, p_z$  возрастает от  $0,65$  при  $\Theta_{впр} = 20^\circ$  до  $0,71$  при  $\Theta_{впр} = 29^\circ$ , что выше чем в дизельном процессе при тех же значениях  $\Theta_{впр}$  на  $12,7$  и  $22,6\%$  соответственно. Значения



— — дизельное топливо; ..... — ЭТЭ; - - - - - МТЭ

**Рис. 6. Характеристики тепловыделения высокооборотного дизеля размерности 4Ч11/12,5 в зависимости от изменения  $\Theta_{впр}$  ( $n = 2200$  об/мин)**

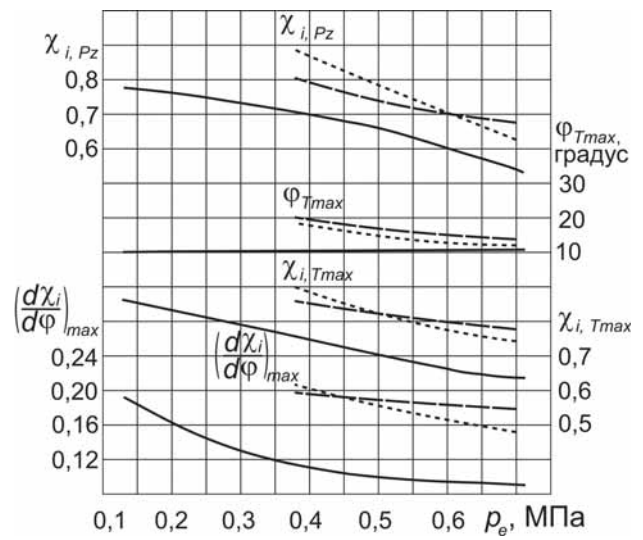
$\chi_i, T_{max}$  при работе дизеля на МТЭ возрастают от 0,75 при  $\Theta_{впр} = 20^\circ$  до 0,82 при  $\Theta_{впр} = 29^\circ$ , что выше, чем в дизельном процессе при  $\Theta_{впр} = 20^\circ$  на 29,3 % и ниже на 2,4 % при  $\Theta_{впр} = 29^\circ$ .

С увеличением  $\Theta_{впр}$  значения угла ПКВ, при котором достигается максимальная температура цикла ( $\Phi_{Tmax}$ ), смещается ближе к ВМТ. Значения максимальной скорости активного тепловыделения  $(d\chi_i/d\phi)_{max}$  с увеличением  $\Theta_{впр}$  при работе на дизельном топливе растут, а применение СТЭ вызывает их снижение. Это обусловлено низкими значениями цетанового числа применяемых спиртов, что естественно увеличивает ПЗВ. При этом необходимо отметить, что этанол и метанол обладают высокими октановыми числами, что не может не сказаться на скорости горения и тепловыделения. Так, например, применение ЭТЭ приводит к увеличению  $(d\chi_i/d\phi)_{max}$  от 0,14 при  $\Theta_{впр} = 29^\circ$  до 0,17 при  $\Theta_{впр} = 20^\circ$ , что выше, чем в дизельном процессе при тех же значениях  $\Theta_{впр}$  на 33,3 и 88,9 % соответственно.

На рис. 7 представлены характеристики тепловыделения дизеля 4Ч11/12,5 при работе по нагрузочной характеристике.

Как следует из приведенных на рисунке результатов, работа дизеля на СТЭ характеризуется более интенсивными процессами выделения тепла и более высокой скоростью горения рабочей смеси, чем в дизельном процессе во всем диапазоне нагрузочных режимов.

Для удобства анализа результатов выполненных экспериментальных исследований количественные значения показателей рабочего процесса и харак-



— — дизельное топливо; ..... — ЭТЭ; - - - - - МТЭ

**Рис. 7. Характеристики тепловыделения высокооборотного дизеля размерности 4Ч11/12,5 при работе по нагрузочной характеристике ( $\Theta_{впр} = 23^\circ$ ,  $n = 2200$  об/мин)**

Таблица 2

**Результаты исследований показателей процесса сгорания высокооборотного дизеля размерности 4Ч11/12,5 ( $\Theta_{впр} = 23^\circ$ ,  $n = 2200$  об/мин,  $p_e = 0,64$  МПа)**

Топливо	Показатели				
	$T_{max}, K$	$p_e, MPa$	$\lambda$	$(dp/d\phi)_{max}, MPa/град$	$\Phi_i, град$
Дизельное	2190	8,1	1,90	0,59	22,5
МТЭ	2430	8,5	2,26	1,25	30,0
Увеличение	на 11,0 %	на 4,9 %	на 19,0 %	в 2,1 раза	на 33,3%
ЭТЭ	2510	8,9	2,27	1,01	28,0
Увеличение	на 14,6 %	на 9,9 %	на 19,5 %	на 71,2 %	на 24,4 %

Таблица 3

**Результаты исследований характеристик тепловыделения высокооборотного дизеля размерности 4Ч11/12,5 ( $\Theta_{впр} = 23^\circ$ ,  $n = 2200$  об/мин,  $p_e = 0,64$  МПа)**

Топливо	Показатели			
	$\chi_i, p_e$	$\chi_i, T_{max}$	$(d\chi_i/d\phi)_{max}$	$\Phi_{Tmax}, град$
Дизельное	0,58	0,64	0,095	10,5
МТЭ	0,69	0,79	0,180	14,0
Увеличение	на 19,0 %	на 23,4 %	на 89,5 %	на 3,3 %
ЭТЭ	0,68	0,76	0,160	12,0
Увеличение	на 17,2 %	на 18,8 %	на 68,4 %	на 14,3 %

теристик тепловыделения дизеля 4Ч11/12,5 при работе на стандартном дизельном топливе и

спирто-топливных эмульсиях (ЭТЭ и МТЭ) сведены в табл. 2 и 3 соответственно.

#### Выводы

На основании проведенных экспериментальных исследований обоснованы возможности и целесообразность использования в малоразмерных высокооборотных дизелях смесового топлива на основе метилового и этилового спиртов. Для высокооборотного малоразмерного дизеля 4Ч11/12,5, работающего на смесовом спиртовом топливе, определено значение оптимального установочного угла опережения впрыскивания топлива ( $\Theta_{впр} = 23^\circ$ ).

Установлено влияние смесового спиртового топлива на показатели процесса сгорания дизеля типа 4Ч11/12,5 и определены их количественные значения, указанные в табл. 2.

Установлено влияние смесового спиртового топлива на характеристики тепловыделения дизеля типа 4Ч11/12,5 и определены их количественные значения, указанные в табл. 3.

#### Литература

1. *Aydin F., Ogut H.* Effects of Ethanol-Biodiesel-Diesel Fuel in Single Cylinder Diesel Engine to engine Performance and Emissions // *Renewable Energy*. — 2017. — Vol. 103. — P. 688–694.
2. Experimental Study on Evaporation Characteristics of Ethanol-Diesel blend Fuel Droplet / K. Han, B. Yang, C. Zhao [et al.] // *Experimental Thermal and Fluid Science*. — 2016. — Vol. 70. — P. 381–388.
3. *Datta A., Mandal B.K.* Impact of Alcohol Addition to Diesel on the Performance Combustion and Emissions of a Compression Ignition Engine // *Applied Thermal Engineering*. — 2016 — Vol. 98. — P. 670–682.
4. A Semi-detailed chemical Kinetic Mechanism of Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) and Diesel blend for Combustion Simulations / S. Zhang, W. Wu, C.-F. Lee [et al.] // *SAE International Journal of Engines*. — 2016. — Vol. 9, № 1. — P. 631–640.
5. Alcohol-Diesel Fuel Combustion in the Compression Ignition Engine / W. Titak, S. Szwaja, K. Lukacs [et al.] // *Fuel*. — 2015. — Vol. 154. — P. 196–206.
6. Physical and Chemical Properties of Ethanol-Biodiesel Blends for Diesel Engines / E. Torres-Jimenez, M. Svoljsak-Jerman, A. Gregorc [et al.] // *Energy and Fuels*. — 2010. — Vol. 24, № 3. — P. 2002–2009.
7. *Rajesh Kumar B., Saravanan S.* Use of Higher Alcohol Biofuels in Diesel Engines: a Review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2016. — Vol. 60. — P. 84–115.
8. Influence of Biofuel Additions on the Ignition Delay of Single Diesel Fuel Drops / A.K. Kopeika, V.V. Golovko, A.N. Zolotko [et al.] // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. — 2015. — Vol. 88, № 4. — P. 948–957.
9. Physical and Chemical Properties of Ethanol-Diesel Fuel Blends / E. Torres-Jimenez, M.S. Jerman, A. Gregorc [et al.] // *Fuel*. — 2011. — Vol. 90, № 2. — P. 795–802.
10. *Lif A., Holmberg K.* Water-in-diesel emulsions and related systems // *Advances in Colloid and Interface Science*. — 2006. — Vol. 123, № 126. — P. 231–239.
11. *Лиханов В.А., Лопатин О.П.* Снижение токсичности отработавших газов автомобильного дизеля конвертацией на спирто-топливные эмульсии // *Экология и промышленность России*. — 2018. — Т. 22. — № 10. — С. 54–59. Doi: 10.18412/1816-0395-2018-10-54-59.
12. Study on Combustion and Emission of Diesel Engine Using Micro-Emulsified Ethanol-Diesel Fuel / P. Sun, C. Chen, L. Ye, J. Wang // *ICMREE 2013 - Proceedings: 2013 International Conference on Materials for Renewable Energy and Environment*. — Chengdou. — 2013. — P. 228–231.
13. *Лиханов В.А., Лопатин О.П.* Улучшение экологических показателей дизельных двигателей применением биотоплива // *Двигателестроение*. — 2018. — № 4 (274). — С. 13–17.
14. *Likhanov V.A., Lopatin O.P.* Investigation of the speed regime of tractor diesel engine running on natural gas with recirculation // *VII International Conference «Modern Technologies for Non-Destructive Testing»*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 457 (2018) 012011. Doi:10.1088/1757-899X/457/1/012011.