

рактеристики. Полученная область ограничения топливоподачи (рис. 7) при n_{KB} 2000 – 3400 мин⁻¹ позволяет в указанном диапазоне частот вращения коленчатого вала снизить температуру и токсичность отработавших газов.

$$q_{Ц} = 63,1 - 0,0457 \cdot n_{KB} - 13,54 \cdot P_S + 9,03 \cdot 10^{-7} \cdot n_{KB}^2 + 1223,6 \cdot P_S^2 - 0,0464 \cdot n_{KB} \cdot P_S \quad (2)$$

Выводы

Моторные испытания подтвердили эффективность предложенного способа адаптивного задания параметров топливоподачи с использованием пневмогидравлических корректоров, установленных на ТНВД.

Повышение давления впрыскивания с 34 до 72 МПа за счет применения в топливной аппаратуре непосредственного действия форсунки с дифференциальным поршнем позволяет снизить удельный эффективный расход топлива. При этом необходимо обеспечить величины общего хода топливного корректора УОВТ и общего хода пневматического корректора УОПТ, эквивалентные изменению $\Theta_{ВВР}$ на 16 град. п.к.в.;

Бывшая точка наиболее рационального впрыска (3,0 - 3,5 мм хода плунжера), к которой привязывались калибр и топливный корректор УОВТ, должна быть отстроена на среднее положение рабочего хода поршня угломена. Среднее положение этого поршня (далее 0 град по безмоторному стенду) обеспечивается подбором жесткостей пружин пневмокоректора при давлении топлива в системе регулятора частоты вращения ТНВД, соответствующее $n_{кул. вала} = 1200$ мин⁻¹ и $P_S = 0,15$ МПа.

УДК 621.436

С.П. Кулманаков, канд. техн. наук, В.А. Сеницын, д-р техн. наук, О.В. Дробышев, инж.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ТОПЛИВНОЙ СТРУИ ДЛЯ ТРАДИЦИОННОГО И БИОТОПЛИВА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ ТОПЛИВОПОДАЧИ

Введение

История развития двигателей с воспламенением от сжатия, на сегодняшний день насчитывает уже более ста двадцати лет. Этот тип двигателей прошел сложный процесс эволюции от предложен-

ной Рудольфом Дизелем идеи компрессорного впрыскивания угольной пыли до современных высокооборотных машин, в которых воплощено множество достижений научно-технического прогресса.

Список литературы:

1. Грехов Л.В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: Учебник для вузов / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков – М.: Легион - Автодата, 2004. – 344 с.
2. А.В. Грицюк *Отработка топливной аппаратуры автомобильного малолитражного дизеля со связанной системой управления* / А.В. Грицюк, А.Н. Врублевский, Г.А. Щербаков, А.А. Овчинников // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2011. – №2. – С. 69 – 74.
3. *Разработка и исследование форсунки для двухфазного впрыскивания топлива в цилиндр высокооборотного дизеля* / А.Н. Врублевский, А.В. Грицюк, Г.А. Щербаков, А.В. Денисов // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2006. – №2. – С. 97 – 101.

Bibliography (transliterated):

1. Grekhov L.V. *Tplivnaja apparatura i systemy upravlenija dizeley: uchebnik dlja vuzov* / L.V. Grekhov, N.A. Ivashenko, V.A. Markov – M.: Legion-Autodata, 2004. – 344 s.
2. Grytsuk A.V. *Otrabotka toplivnoy apparatury avtomobilnogo dizelja so svjazannoy sistemoy upravlenija* / A.V. Grytsuk, A.N. Vrublevskiy, G.A. Sherbakov, A.A. Ovchinnikov // *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*. – 2011. – №2 – S. 69 – 74.
3. *Razrabotka i issledovanie forsunki dlja dvuhfaznogo vpryskivaniya toplyva v cilindr vysokooborotnogo dizelja* / A.N. Vrublevskiy, A.V. Grytsuk, G.A. Sherbakov, A.V. Denisov // *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*. – 2006. – №2 – S. 97 – 101.

ной Рудольфом Дизелем идеи компрессорного впрыскивания угольной пыли до современных высокооборотных машин, в которых воплощено множество достижений научно-технического прогресса.

Благодаря особенностям протекания рабочего процесса, двигатель с воспламенением от сжатия позволяет применять весьма широкий спектр топлива - от газообразного до твердого.

Новым этапом заинтересованности вопросом применения в двигателях топлив, отличных от традиционных нефтяных, стал поиск альтернативных источников горючего на фоне общего энергетического кризиса, начавшегося в конце 70-х - начале 80-х гг. прошлого столетия. В настоящее время большее внимание уделяется получению топлив из возобновляемых ресурсов (прежде всего на основе биомассы), что связано с общедоступностью источников сырья и приемлемыми экономическими показателями технологии получения.

Для традиционных механических систем впрыска при использовании новых топлив с увеличенными значениями вязкости и плотности значительно ухудшаются процессы распыливания и смесеобразования, вследствие чего наблюдается неполное сгорание, образование нагара и лаковых отложений.

В последнее время одними из наиболее перспективных для транспортных установок с дизелями считаются аккумуляторные системы топливоподачи, особенно в сочетании с электронным управлением процессом впрыскивания, что обеспечивает высокие давления впрыска, позволяет гибко управлять характеристикой топливоподачи, осуществлять многофазную подачу, в т.ч. и более эффективно использовать биотоплива.

При изучении процессов смесеобразования в дизелях для различных систем топливоподачи эффективными являются исследования динамики развития топливной струи и ее структуры методами оптической диагностики.

На кафедре ДВС АлтГТУ им. И. И. Ползунова были проведены исследования структуры и динамики развития топливной струи нефтяного и биотоплива при использовании различных систем топливоподачи. Результаты этого исследования рассмотрены ниже.

Экспериментальная установка

В настоящее время имеется значительное количество работ, посвященных исследованию топливной струи.

Методы измерения и контроля параметров топливной струи разделяются на контактные и бесконтактные, составляющие методы неразрушающего контроля. К контактным относятся методы,

основанные на размещении зонда в объеме исследуемого потока. Использование зонда вносит определенные искажения в процесс развития потока и, тем самым, снижает точность и достоверность полученных результатов. Однако, контактные методы широко используются в виду простоты их реализации. Использование термоанемометра или других зондов для измерения скоростных характеристик потоков распыленной жидкости мало перспективно в виду оседания капель жидкости и, как следствие, покрытие поверхности зонда пленкой жидкости. Так же не эффективно измерение дисперсного состава, ввиду слияния капель жидкости в пробоотборнике, и обеспечения представительности пробы. При контроле характеристик импульсных быстропротекающих потоков распыленной жидкости предпочтительнее оптические бесконтактные методы, относящиеся к неразрушающему контролю, способные контролировать характеристики потоков за малое время регистрации.

Бесконтактные методы основаны на измерении характеристик излучения, пронизывающего дисперсный поток частиц, либо излучаемого частицами. Бесконтактные методы позволяют определять несколько параметров потока одновременно, например скорость и размер частицы.

Методы оптической диагностики для определения параметров струи распыленного топлива востребованы в научных исследованиях, так как позволяют бесконтактно, в масштабе реального времени контролировать корневые углы, длину потока распыленного топлива, распределение массовой концентрации и спектра размеров капель по объему струи, ее геометрические размеры, скорость движения фронта и отдельных его объемов.

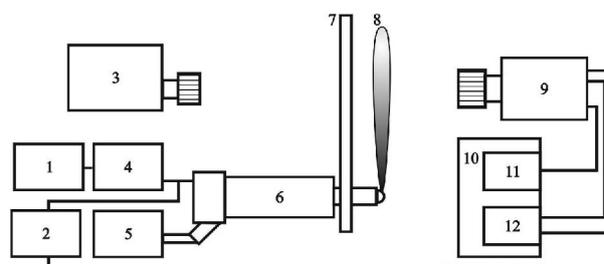


Рис. 1. Схема стенда скоростной видеосъемки для определения параметров топливной струи

В качестве объекта исследования были выбраны топливные струи дизельного топлива и рапсового масла (биотоплива). Производилось сравнение параметров топливных струй при использова-

нии топливной системы непосредственного действия (ТАНД) при давлении открытия иглы форсунки 27,5 МПа и аккумуляторной топливной системы "Common Rail" (CR) при давлении в аккумуляторе от 60 до 180 МПа.

Схема стенда скоростной видеосъемки изображена на рис. 1. Принцип работы: устройство управления работой двигателя УК-2 1 в заданный момент времени, соответствующий определенному положению коленчатого вала двигателя, подает импульс на блок управления 4, открывая электрический клапан форсунки высокого давления 6. В рампе 5 под заданным давлением (до 180 МПа) находится топливо, поступающее в распылитель форсунки 6 в момент открытия электроклапана. Импульс от электроклапана 4 одновременно поступает на блок синхронизации 2, который согласует уровни напряжений на форсунке с цифровой высокоскоростной видеокамерой Видеоспринт 9 и платой АЦП ЛА-1,5 РСІ 12, установленной в персональный компьютер 10. Таким образом, осуществляется синхронизация запуска работы видеокамеры с моментом переднего фронта импульса, поступающего на электроклапан форсунки. По кабелю контроллер-камера от видеокамеры 9 информационный сигнал передается в плату контроллера 11, также установленную в персональный компьютер 10. Кроме того, на АЦП ЛА-1,5 РСІ 12 подается сигнал момента экспозиции видеокамеры 9. Сигналы синхроимпульса от устройства синхронизации 2 и сигнал момента экспозиции видеокамеры 9 необходимы при определении времени записи заданного кадра в видеофильме, который регистрируется камерой 9 и записывается на персональный компьютер 10. Топливная струя 8, распыливаемая форсункой 6 движется вдоль поверхности экрана 7, с внутренней стороны которого располагается источник света 3 и блок питания.

Для регистрации изображения топливного факела топливной аппаратуры непосредственного действия использовалась синхронизация по внешнему синхроимпульсу – сигналу от пьезодатчика, установленного на линии высокого давления перед форсункой

Исследование скорости и длины топливной струи

Результаты полученных исследований изменения длины топливной струи приведены на рис. 2 и 3. Расчет длины топливной струи проводился по 14 кадрам для каждого давления впрыска. Каждая

точка получена как среднее значение по длине струи для 5-6 распылов.

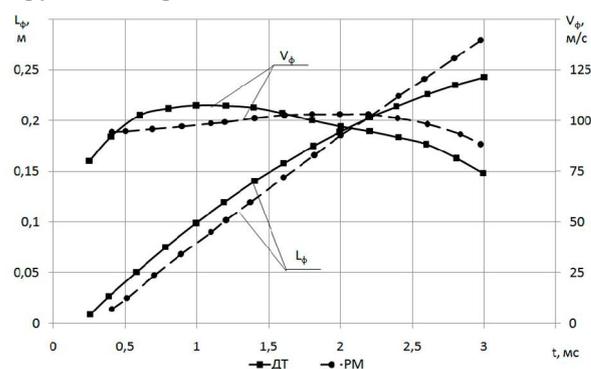


Рис. 2. Изменение длины факела L_{ϕ} и скорости фронта факела v_{ϕ} по времени для системы ТАНД

Анализируя характер изменения скорости фронта топливной струи, можно заметить следующее: для системы CR характерны более высокие начальная и максимальная скорость, по сравнению с ТАНД, однако при этом для системы CR наблюдается более интенсивное торможение фронта струи. Более высокая скорость и более интенсивное торможение струи для системы CR объясняется более высоким давлением и меньшими размерами капель.

При этом, время распада топливной струи для системы CR меньше, вследствие чего длина регистрируемых установкой топливных струй для обеих топливных систем приблизительно равна.

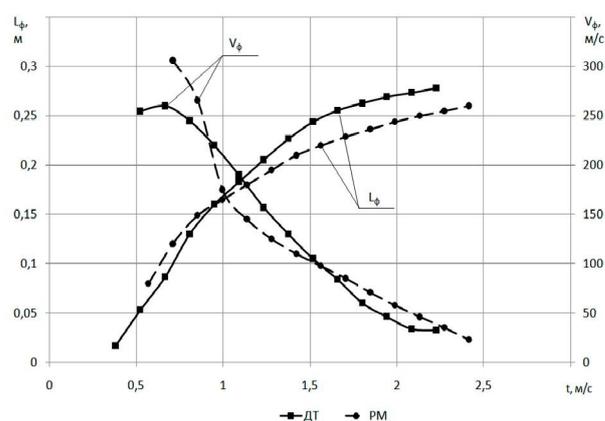


Рис. 3. Изменение длины факела L_{ϕ} и скорости фронта факела v_{ϕ} по времени для системы CR

Различие физико-химических свойств дизельного топлива и рапсового масла предопределяет разное протекание процесса истечения. Для системы ТАНД для рапсового масла характерно меньшее значение скорости струи, которая в дальнейшем остается почти постоянной. При этом скорость дизельного топлива в начальный момент больше,

но далее происходит более интенсивное торможение. Для системы CR при применении рапсового масла характерна высокая начальная скорость, которая в короткое время резко падает, и затем замедление становится более пологим. Для нефтяного топлива характерно монотонное снижение скорости во всем диапазоне наблюдения.

Таким образом, переход на системы высокого давления обеспечивает более высокие скорости истечения, что приводит к интенсификации теплообмена между потоком воздуха и отдельными каплями; меньший размер капель способствует более быстрому распаду топливной струи. Данные факторы приведут к сокращению периода задержки самовоспламенения и интенсификации процесса сгорания.

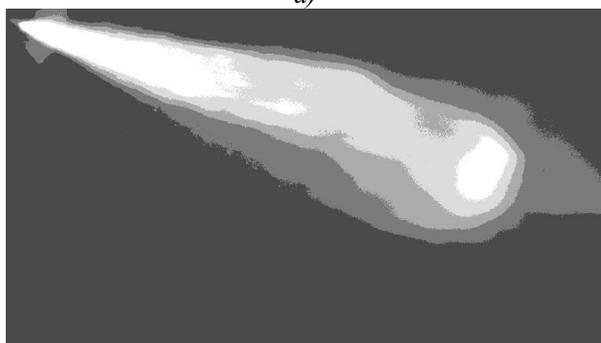
Исследование структуры топливной струи

Экспериментальные исследования динамики структуры топливной струи проводились по изменению яркостных зон.

Пример изображения процесса распыливания топлива приведен на рис. 4, где показано исходное изображение струи и яркостные зоны, выделенные программой ЭВМ на изображении методом пороговой сегментации. Для улучшения восприятия на рисунке приведено инверсное изображение.



а)



б)

Рис. 4. Пример изображения процесса распыливания топлива (изображение инверсное):
а) исходное изображение (время экспозиции 35,5 мкс, $T_k=0,3$ мс);

б) яркостные зоны, выделенные программой ЭВМ на изображении методом пороговой сегментации

Каждая точка получена обработкой изображений топливных струй по разработанной программе расчета площадей яркостных зон струи, которые измеряются на графиках в пикселях, либо приводятся в нормированном на площадь струи виде.

На рис. 5 приводятся площади яркостных зон струи дизельного топлива для системы ТАНД для 6 зон: 0-27; 28-55; 56-83, 84-111; 112-139 и 140-170 единиц яркости АЦП и общая площадь струи. Зона с яркостью 0-27 градаций яркости АЦП соответствует участку с высокой концентрацией топлива, как правило, в середине струи и в начале впрыска, пока топливная струя не начала активно распадаться. Зона с яркостью 140-170 соответствует участку с низким содержанием топлива.

Анализируя данные, приведенные на рис. 6, можно проследить изменение относительных площадей отдельных зон по времени.

Сравнивая графики для дизельного топлива и рапсового масла, можно увидеть, что для более тяжелого и вязкого рапсового масла наблюдается уменьшение общей площади струи на 25%, при этом для топливной струи рапсового масла характерна более высокая неоднородность зон. Если для струи дизельного топлива происходит пропорциональное и равномерное развитие всех зон, то для биотоплива характерно более плотное ядро струи (рис. 6 и 8).

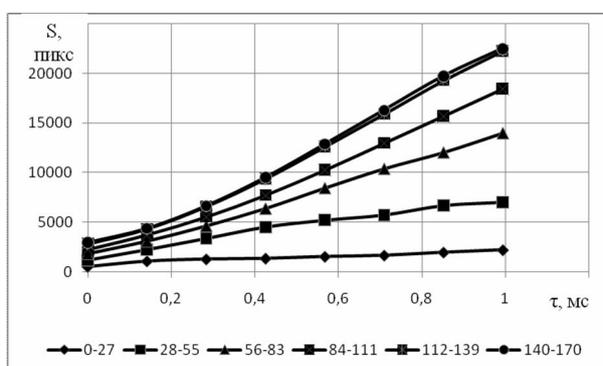


Рис. 5. Общая площадь топливной струи и распределение по яркостным зонам для топливной системы непосредственного действия при использовании дизельного топлива

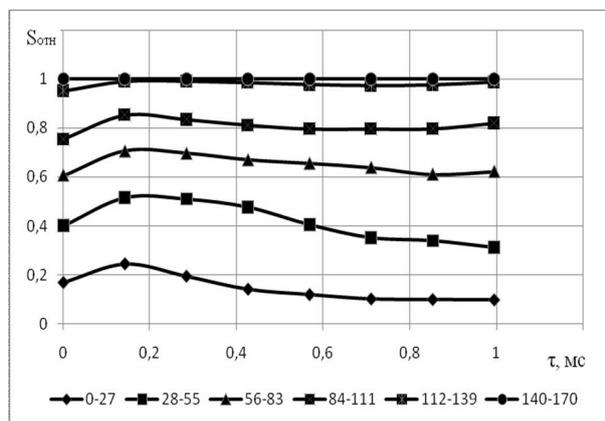


Рис. 6. Соотношение яркостных зон для топливной системы непосредственного действия при использовании дизельного топлива

Использование топливной аппаратуры аккумуляторного типа "Common Rail" (рис. 9-12) позволяет улучшить параметры топливной струи. Для приведенных графиков, снятых при давлении в системе 180 МПа, наблюдается увеличение площади топливной струи для дизельного топлива - на 25%, для рапсового масла наблюдается более значительный рост - на 48%.

Исследование влияния давления в системе CR показало, что струя с большим давлением впрыска имеет большую длину и начинает распадаться позднее, что наблюдается на графиках возрастанием во времени максимумов площадей градаций (80, 100, 120, 140 град.). Так для самой яркой зоны (160 град.) максимум находится в зоне распада струи, которая становится однородной по яркости с её дальнейшим уменьшением.

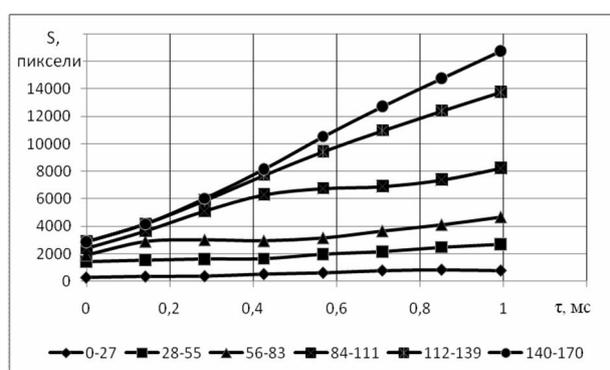


Рис. 7. Общая площадь топливной струи и распределение по яркостным зонам для топливной системы непосредственного действия при использовании рапсового масла

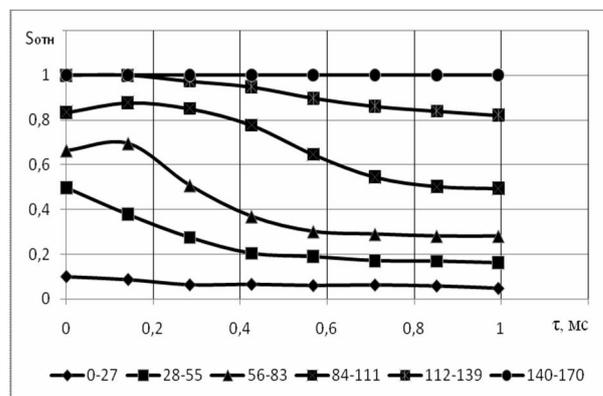


Рис. 8. Соотношение яркостных зон для топливной системы непосредственного действия при использовании рапсового масла

Результаты исследования показывают, что с увеличением давления впрыска в заданный момент времени возрастает и площадь струи. Причем площадь струи возрастает как за счет длины, так и за счет ширины. При этом график изменения площади топливной струи имеет нелинейный характер, аналогичный зависимости длины струи по времени для различных давлений.

Для системы "Common Rail" также характерно более быстрое разрушение топливной струи, что приводит к большей однородности. При этом уменьшаются относительные доли самых ярких и темных зон и возрастают доли с промежуточными значениями нормированной яркости.

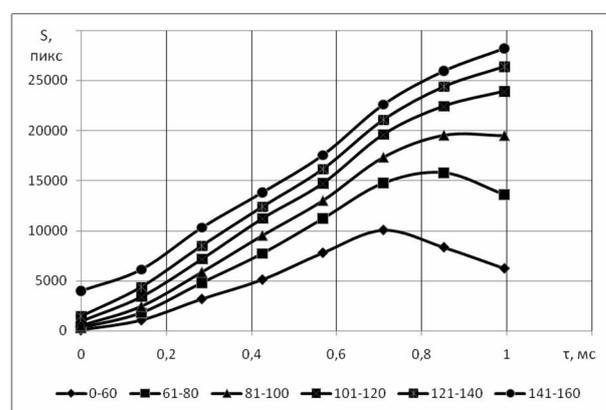


Рис. 9. Общая площадь топливной струи и распределение по яркостным зонам для топливной системы "Common Rail" при давлении 180 МПа и использовании дизельного топлива

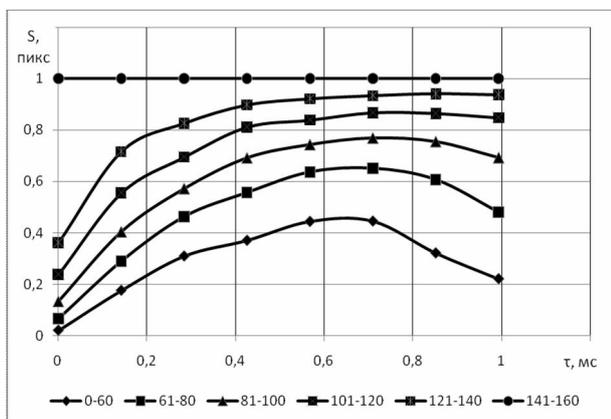


Рис. 10. Соотношение яркостных зон для топливной системы "Common Rail" при давлении 180 МПа и использовании дизельного топлива

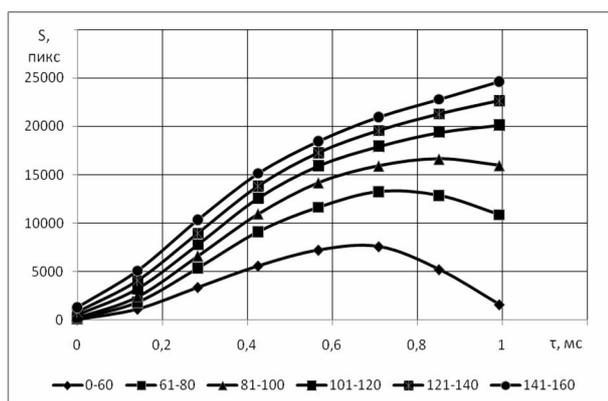


Рис. 11. Общая площадь топливной струи и распределение по яркостным зонам для топливной системы "Common Rail" при давлении 180 МПа и использовании рапсового масла

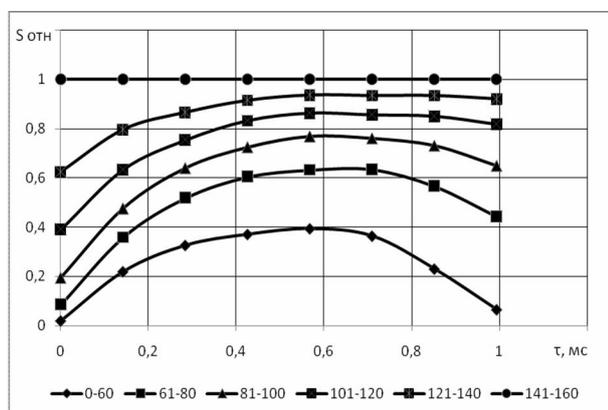


Рис. 12. Соотношение яркостных зон для топливной системы "Common Rail" при давлении 180 МПа и использовании рапсового масла

Заключение

Проведенные исследования топливной струи показали, что использование аккумуляторной топливной системы "Common Rail", по сравнению с топливной аппаратурой непосредственного действия, позволяет обеспечить уменьшение размера капель топлива, увеличить скорости и площади топливной струи, снизить доли крайних диапазонов нормированной яркости площади, что свидетельствует о более однородной структуре топливной струи как для дизельного топлива, так и для более вязкого и тяжелого биотоплива.

Список литературы:

1. Еськов А.В. Экспериментальный комплекс и программа для изучения динамики развития и структуры топливной струи / А.В.Еськов, В.И.Иордан, С.И.Гибельгауз // Ползуновский Вестник. – 2010. – №1. – С. 170-174.
2. Кулманаков С.П. Сравнение параметров топливного факела и показателей рабочего процесса дизельного двигателя 1СН 13/14 с системой топливоподачи «Common Rail» / С.П. Кулманаков, Д.Д. Матиевский, А.В. Шашев, С.В. Яковлев, С.С. Кулманаков // Вестник академии военных наук. – №2 (35). – 2011. – С. 227-232.
3. Матиевский Д. Д. Результаты исследования рабочего процесса дизельного двигателя с аккумуляторной и штатной системами топливоподачи / Д. Д. Матиевский, А. В. Шашев, С. В. Яковлев, С. С. Кулманаков // Вестник академии военных наук. – №2 (35). – 2011. – С. 284-290.

Bibliography (transliterated):

1. Es'kov A.V. Jeksperimental'nyj kompleks i program-ma dlja izuchenija dinamiki razvitija i struktury toplivnoj strui / A.V.Es'kov, V.I.Iordan, S.I.Gibel'gauz // Polzunovskij Vestnik. – 2010. – №1. – S. 170-174.
2. Kulmanakov S.P. Sravnenie parametrov toplivnogo fakela i pokazatelej rabocheho processa dizel'nogo dvigatelja 1ChN 13/14 s sistemoj toplivopodachi «Common Rail» / S.P. Kulmanakov, D.D. Matievskij, A.V. Shashev, S.V. Jakovlev, S.S. Kulmanakov // Vestnik aka-demii voennyh nauk. – №2 (35). – 2011. – S. 227-232.
3. Matievskij D. D. Rezul'taty issledovanija rabocheho processa dizel'nogo dvigatelja s akkumuljatornoj i shtatnoj sistemami toplivopodachi / D. D. Matiev-skij, A. V. Shashev, S. V. Jakovlev, S. S. Kulmanakov // Vestnik akademii voennyh nauk. – №2 (35). – 2011. – S. 284-290.