

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЯ С СИСТЕМОЙ ТОПЛИВОПОДАЧИ ПОВЫШЕННОГО ДАВЛЕНИЯ ПО ДАННЫМ ОПТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТОПЛИВНОЙ СТРУИ И МОТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

С.В. Яковлев

*В работе представлены результаты экспериментальных исследований распыленной топливной струи и рабочего процесса дизельного двигателя с топливоподающей аппаратурой повышенного давления «Common Rail». Изучены особенности работы дизеля с аккумуляторной системой топливоподачи.*

*Ключевые слова: дизель, рабочий процесс, аккумуляторная система впрыска, индикаторный КПД, вредные выбросы.*

### Введение

Для того чтобы обеспечить быстрое и полное сгорание в дизеле необходимо, чтобы поверхность контакта жидкого топлива с массами горячего воздуха была максимально возможной. Это достижимо лишь при высоком качестве распыливания топлива, которое характеризуется мелкостворчатостью и равномерностью распределения их в объеме камеры сгорания. Многими исследователями было высказано предположение, что определяющим фактором в рабочем процессе дизельного двигателя является именно испарение топлива в цилиндре в процессе топливоподачи [7], так как процессы воспламенения происходят с топливом, находящимся в газовой фазе.

### Методика исследования

Экспериментальные исследования проводились на безмоторном и моторном стендах. В основу исследований был положен сравнительный метод. На безмоторном стенде проводилось сравнительное исследование параметров распыленной топливной струи с топливной аппаратурой непосредственного действия (ТАНД) и с системой Common Rail (CR) при впрыске в атмосферу. Топливоподача и скоростной режим соответствовали номинальному режиму работы двигателя. В результате обработки экспериментальных снимков были получены геометрические параметры топливной струи, и её структура, характеризующаяся яркостными зонами, а также скорость фронта топливной струи. Границы топливной струи, её яркостные зоны обрабатывались по методу пороговой сегментации – разделения изображения на пе-

редний план и фон. Определяя положение сопла распылителя в координатах изображения и вершины по перпендикуляру к оси струи, определялись корневой угол и длина струи. По частоте съёмки и координатам фронта струи, определялась её скорость. В ходе моторных исследований необходимо было установить особенности в протекании рабочего процесса дизеля при его работе с ТАНД и с системой CR. На экспериментальной установке в качестве нагрузочного устройства использовался балансирный электротормоз. Анализ отработавших газов проводился с помощью лабораторного газоанализатора QUINTOX – 9106, а замер дымности с помощью дымомера Bosch. В ходе экспериментов сбор данных быстродействующих процессов, происходящих в цилиндре дизеля, и их последующая обработка проводилась с помощью компьютерного комплекса H-2000 в комплекте с усилителями заряда Kistler, LE-41 и датчиками. Проводились сравнительные испытания с ТАНД и с системой CR на номинальном режиме работы двигателя. Снимались регулировочные и нагрузочные характеристики. Обработка индикаторных диаграмм производилась по методике ЦНИДИ с анализом индикаторного КПД и составляющих неиспользования теплоты в цикле по методике Д.Д. Матиевского [6].

### Результаты исследования процесса впрыска топлива оптическим методом

На рисунке 1 приведен пример инверсного изображения впрыска топлива в атмосферу. По обработанным для сравнительного анализа снимкам распыленных топливных струй с ТАНД и CR установлено, что распы-

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЯ С СИСТЕМОЙ ТОПЛИВОПОДАЧИ ПОВЫШЕННОГО ДАВЛЕНИЯ ПО ДАННЫМ ОПТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТОПЛИВНОЙ СТРУИ И МОТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

ленная топливная струя с CR имеет увеличенный угол (корневой) раскрытия, соответственно большую площадь поперечного сечения струи (разница может достигать до двух раз).

На рисунках 2 и 3 приведены графики изменения длины и площади струи распыленного топлива от различных давлений впрыска. Из рисунка 2 видно, что при увеличении давления топлива в рампе (аккумуляторе), происходит возрастание дальности струи. Сопоставление площади струи по осевому направлению (рисунок 3) показывает, что при увеличении давления в рампе происходит возрастание площади струи за счет увеличения корневого угла и длины струи при одинаковой продолжительности.

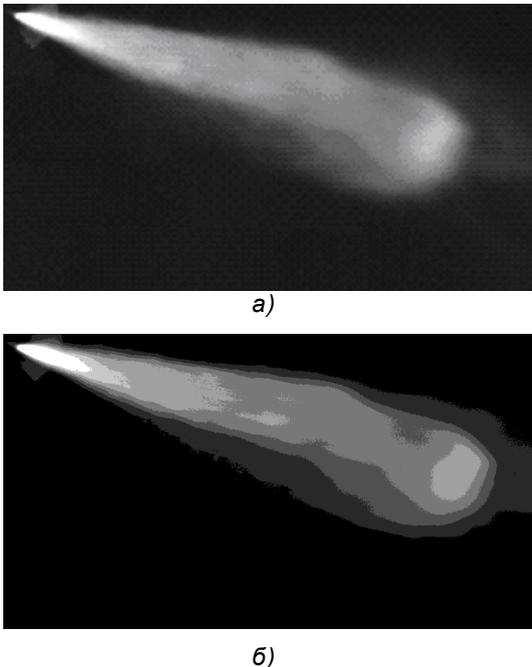


Рисунок 1 - Пример изображения процесса распыливания топлива: а) исходное изображение (для момента времени 35,5 мкс); б) яркостные зоны, выделенные программой ЭВМ на изображении методом пороговой сегментации

Для исследования однородности структуры распыленной топливной струи был применен метод пороговой сегментации, заключающийся в разбиении струи по яркости на несколько зон. Яркостные зоны характеризуют интенсивность проходящего излучения, которое определяется концентрацией капель в зонах топливной струи. При этом диаметр капель принимается постоянным и равным диаметру по Заутеру. При прохождении излу-

чения через распыленную струю, в зонах с высокой концентрацией топлива происходит большее поглощение света, что соответствует меньшей яркости на изображении.

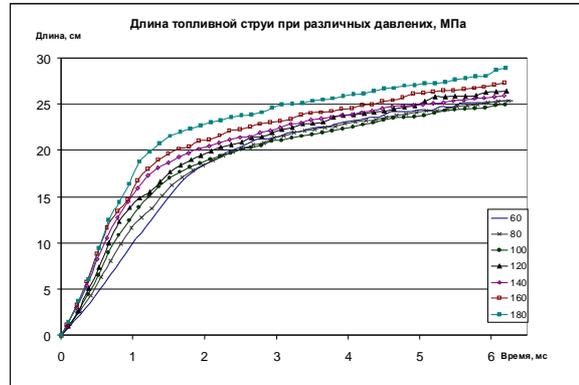


Рисунок 2 - Экспериментальные значения изменения длины топливных струи от времени при различных давлениях впрыска

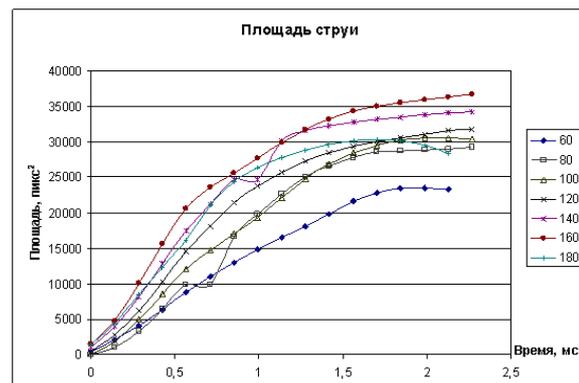


Рисунок 3 - Изменения площади струи распыленного дизельного топлива при различных давлениях впрыска

Площади на всех графиках приводятся относительно общей площади струи. На рисунке 4 показано сопоставление для 6 зон градаций яркости аналого-цифрового преобразователя (АЦП): 60, 80, 100, 120, 140 и 160 единиц яркости, для топливных струй ТАНД и для системы CR с различным давлением впрыска. Зона, соответствующая градации 60 единиц яркости АЦП соответствует более плотному участку, как правило, в середине струи и в начале впрыска, на начальных кадрах, пока топливная струя не начала активно распадаться. Сравнение полученных данных позволяют сделать выводы: при росте давления в аккумуляторе в начальный момент времени (при  $t = 0,035$  мс) наблюдается увеличение площади темного участка; уменьшение площади более ярких зон струи, для зна-

чений 140 и 160 единиц градаций АЦП. Таким образом, струя топлива с системой CR в начальный момент времени более равномерна по структуре, чем струя ТАНД. С развитием струи площадь ярких зон 140 и 160 градаций АЦП увеличивается (рисунок 5).

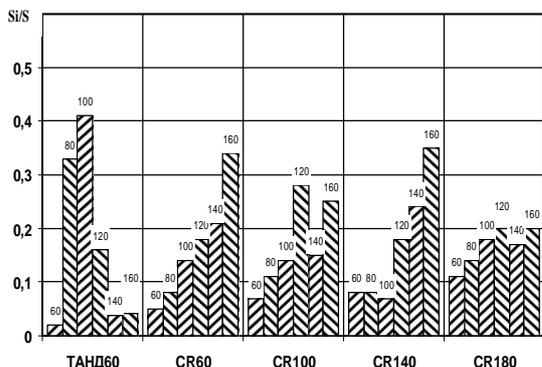


Рисунок 4 – Гистограмма ярких зон распыленной струи дизельного топлива для ТАНД и CR с различным давлением к моменту времени 0,035 мс

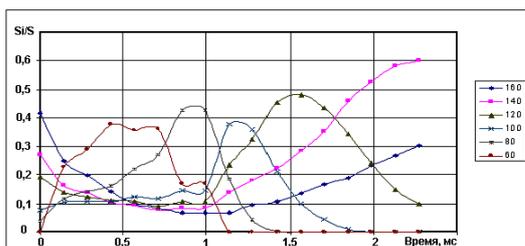


Рисунок 5 – Изменение относительных площадей ярких зон распыленной струи дизельного топлива при давлении впрыска 140 МПа

На рисунке 6 приведены графики изменения скорости фронтальной части струи с системой CR (давление впрыска 140 МПа) и с ТАНД (максимальное давление впрыска 60 МПа) по времени. При анализе данного графика установлено следующее: распыленная струя с CR имеет более высокую скорость, чем с ТАНД в начальные этапы времени.

С течением времени и соответствующим удалением от сопла фронт струи дизтоплива с системой CR быстрее теряет скорость, чем фронт струи с ТАНД. Причины этого в следующем: при росте давления впрыска размер капель топлива уменьшается. Соответственно имеющие меньшую инерцию, они тормозятся встречным потоком воздуха быстрее, чем частицы с меньшим давлением впрыска, имеющие больший размер и располагающие большей кинетической энергией. В связи с этим, в двигателе оснащенного системой CR следует ожидать перераспределение объем-

ного и пленочного смесеобразования. При этом уменьшится доля топлива, попавшая на стенку, и увеличится доля топлива, распределенная в объеме камеры сгорания, что приведет к изменению характера процесса тепловыделения.

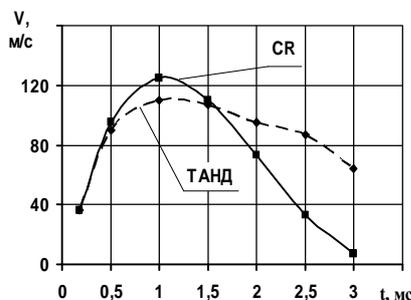


Рисунок 6 – Изменение скорости фронтальной части струи

### Результаты моторных исследований с системой CR

Исследования структуры распыленной топливной струи позволяют оценить качественные характеристики струи и ожидаемые показатели рабочего процесса дизеля. Количественная оценка возможна только при проведении моторных испытаний с использованием комплексной оценки: регистрации мощностных, экономических и экологических показателей и при проведении индицирования – регистрации изменения давления в цилиндре, продолжительности и места топливоподачи.

Для анализа первоначально снимались регулировочные характеристики по углу опережения впрыска и по давлению при различных нагрузках и частотах вращения. После выбора оптимальных значений были проведены исследования на различных режимах на серии нагрузочных характеристиках.

В качестве базового режима был принят номинальный режим при частоте вращения 1750 мин<sup>-1</sup>, давление топлива в топливной рампе было выбрано равным 140 МПа, угол опережения был выбран 16° п.к.в. до ВМТ. Данный угол является оптимальным с точки зрения экономичности, токсичности ОГ и пиковых значений температуры и давления цикла.

После определения угла опережения впрыска было исследовано влияние давления впрыска топлива на показатели цикла. С этой целью были получены регулировочные характеристики по давлению в топливной рампе. Давление впрыска менялось в диапа-

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЯ С СИСТЕМОЙ ТОПЛИВОПОДАЧИ ПОВЫШЕННОГО ДАВЛЕНИЯ ПО ДАННЫМ ОПТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТОПЛИВНОЙ СТРУИ И МОТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

зоне от 60 до 160 МПа. Полученные данные приведены на рисунках 7-9. Анализ регулировочной характеристики (рисунок 7) показывает, что в диапазоне от 60 до 140 МПа индикаторный КПД возрастает, но дальнейшее увеличение давления топлива до 160 МПа обеспечивает весьма незначительный прирост индикаторного КПД. Однако, при этом происходит весьма значительное увеличение выбросов окислов азота с 750 до 885 ppm (примерно на 20%), при небольшом уменьшении выбросов окиси углерода с 86 до 72 ppm (рисунок 8). Это увеличение происходит за счет увеличения максимальных давлений и температуры цикла (рисунок 9).

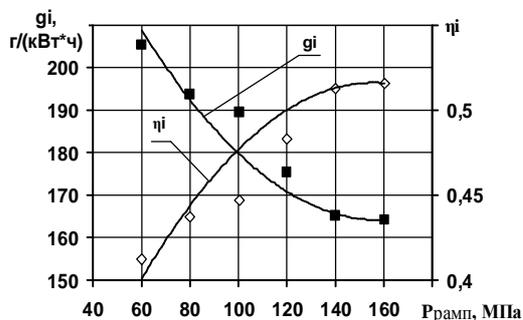


Рисунок 7 – Регулировочная характеристика индикаторного КПД и удельного индикаторного расхода топлива от давления впрыска

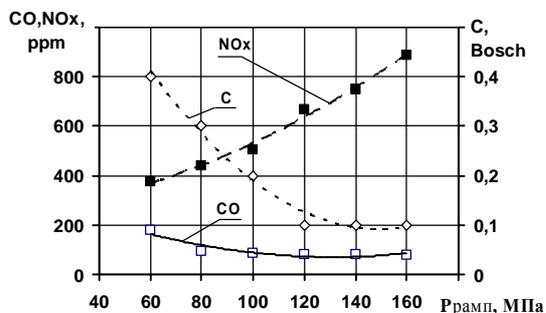


Рисунок 8 - Регулировочная характеристика содержания окиси углерода, сажи и оксидов азота в отработавших газах от давлению впрыска

Таким образом, для данной комплектации двигателя и топливной системы, не целесообразно стремиться к дальнейшему увеличению давления впрыска свыше 140 МПа. Дальнейшее увеличение давления впрыска приводит к увеличению токсичности отработавших газов и снижает ресурс двигателя, вследствие увеличения термической и механической нагруженности деталей.

На рисунке 10 приведены индикаторные

диаграммы и диаграммы продолжительности топливоподачи. Видно, что с увеличением давления происходит уменьшение продолжительности топливоподачи, максимальное давление цикла возрастает, точка достижения максимального давления приближается к ВМТ. При этом на линии сгорания наблюдаются скачки давления, тем большие, чем выше давление впрыска.

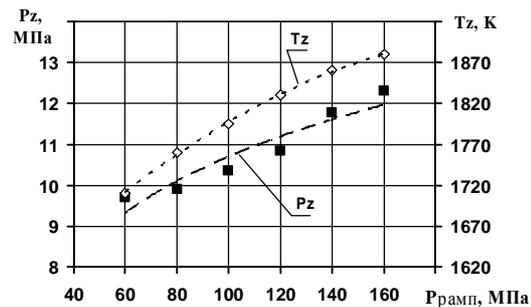


Рисунок 9 - Регулировочная характеристика максимального давления и температура цикла от давления впрыска

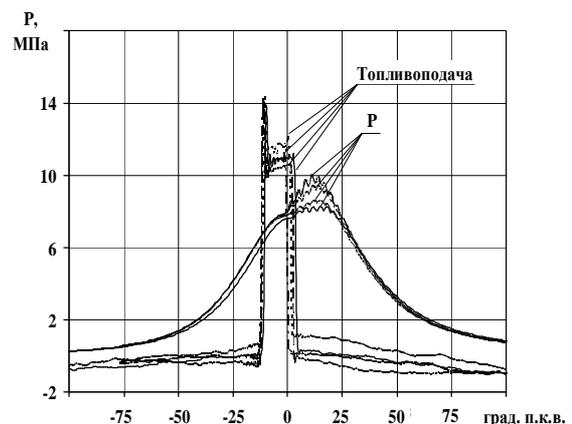


Рисунок 10 – Диаграммы топливоподачи и внутрицилиндрового давления

На рисунке 11 в сравнении приведены диаграммы скорости тепловыделения для системы топливоподачи CR при давлениях 60 и 140 МПа, а так же для ТАНД. Сравнение данных диаграмм показывает:

- максимальная скорость тепловыделения для CR при  $p_{рамп}=140$  МПа составляет 0,057 (9° п.к.в. после ВМТ), а при 60 МПа - 0,038 (18° п.к.в. после ВМТ), для ТАНД – 0,04 (13° п.к.в. после ВМТ);

- общая продолжительность тепловыделения для CR составляет при 140 МПа – 42° п.к.в. (с 4° до 38° после ВМТ), при давлении 60 МПа - 55° п.к.в. (с -3° до 52° по-

сле ВМТ), а для ТАНД - 70° п.к.в. (с -2° до 68° после ВМТ).

- различие между кинетической и диффузионной фазой сгорания при давлении впрыска 60 МПа более ярко выражено, при давлении 140 МПа эти две фазы сгорания практически сливаются в одну. Процесс тепловыделения для ТАНД отличается от системы CR тем, что первая и вторая фазы достаточно четко отделяются друг от друга.

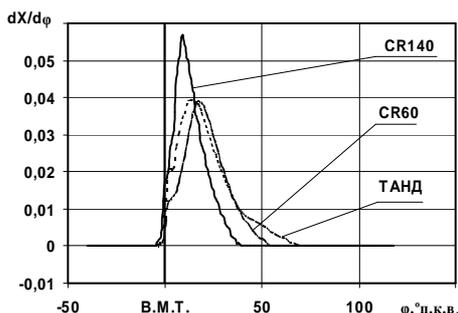


Рисунок 11 – Диаграммы скорости тепловыделения

Таким образом, характер тепловыделения подтверждает данные оптического исследования развития распыленной топливной струи: уменьшения размера капель топлива, увеличения длины, площади струи, увеличение её однородности с увеличением давления в системе CR.

#### Заключение

Характер сгорания при давлении впрыска 140 МПа приближается к характеру сгорания в бензиновом двигателе, что характерно для однородной смеси. Однако при чрезмерном давлении впрыска, обеспечивающем большую однородность смеси и большой объем топливной струи, интенсификация сгорания не приводит к увеличению индикаторного КПД, а ведет к возрастанию максимальной температуры цикла, что обуславливает рост максимального давления цикла  $p_z$  и окислов азота.

Индикаторный КПД при увеличении давления в системе CR с 60 МПа до 140 МПа увеличивается с 0,412 до 0,513 (с ТАНД соответственно для максимального давления впрыска индикаторный КПД равен 0,44). Данное увеличение происходит за счет изменения закона тепловыделения. Основную роль при этом играет увеличение скорости тепло-

выделения, приближения максимума скорости к ВМТ и сокращение продолжительности ввода теплоты.

Анализ статей неиспользование теплоты и величина индикаторного КПД при увеличении давления впрыска с 60 до 140 МПа показал следующее:

- коэффициент неиспользование теплоты вследствие несвоевременности уменьшился с 0,072 до 0,033 за счет уменьшения продолжительности ввода теплоты, увеличения максимума скорости тепловыделения и приближения его к ВМТ;

- коэффициент неиспользования теплоты на теплообмен уменьшился с 0,049 до 0,045 из-за сокращения продолжительности ввода теплоты и снижения температуры рабочего тела.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воинов А.Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. М.: Машиностроение, 1977. - 277 с.
2. Исследование динамики развития струи распыленного дизельного топлива / Еськов А.В., Гибельгауз С.И.; Алт. гос. тех. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2011.– 98 с.
3. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: Учебник для вузов.- М.: Изд- во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.- 720 с.
4. Кутовой В. А. Впрыск топлива в дизелях. М.: Машиностроение, 1981. - 165 с.
5. Лышевский А.С. Системы питания дизелей. М.: Машиностроение, 1981. - 216 с.
6. Матиевский Д.Д. Рабочие процессы в ДВС: Учебное пособие / Д.Д. Матиевский.- Барнаул: АлтПИ, 1983.-- 84 с.
7. Свиридов Ю.Б. Топливо и топливopодача автотракторных дизелей / Ю.Б. Свиридов, Л. В. Малявинский, М. М. Вихерт.– Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 248 с.
8. Свиридов Ю.Б. Смесеобразование и сгорание в дизелях. Л., «Машиностроение», 1972. - 224 с.

*Яковлев С.В., к.т.н., старший преподаватель кафедры двигателей внутреннего сгорания ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», 656038, Барнаул, просп. Ленина, 46, тел. (3852) 260516.*