

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА РАПСОВОМ МАСЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ COMMON RAIL

А.Е. Свистула, М.И. Мысник

*Приведены результаты экспериментального исследования рабочего процесса дизельного двигателя при его работе на рапсовом масле с использованием разделенной топливной аппаратуры и аппаратуры типа Common Rail. Проведен сравнительный анализ показателей рабочего процесса, параметров тепловыделения, токсичности отработавших газов и индикаторного к.п.д. Показана перспектива применения пилотной порции в топливной аппаратуре типа Common Rail.*

*Ключевые слова: система питания Common Rail, рапсовое масло, пилотная порция топлива, индикаторный КПД, коэффициенты неиспользования теплоты, сажа.*

### Постановка задачи

Технико-экономические показатели автотракторных дизелей с существующим способом топливоподачи, смесеобразования и сгорания практически исчерпали свои возможности [1]. В связи с постоянно повышающимися требованиями к токсичности отработавших газов (ОГ) двигателей транспортных систем приходит понимание того, что только малотоксичный энергоэффективный двигатель внутреннего сгорания (ДВС) может быть признан перспективным. Одним из путей улучшения показателей дизелей является снижение неоднородности топливно-воздушной смеси (ТВС) в камере сгорания (КС). В известной мере, это уже реализуется за счет применения топливной аппаратуры (ТА) типа *Common Rail* (CR) и применения многофазного впрыска. Применение многофазного впрыска позволяет сократить период задержки воспламенения связанного с тем, что впрыск основной порции топлива осуществляется в среду, в той или иной мере гомогенизированную и ионизированную протеканием холодно-пламенных реакций окисления запальной порции топлива. В результате скорость выделения теплоты в начальной фазе сгорания заметно снижается в сравнении с одноразовым (традиционным) впрыскиванием. При такой трансформации процесса сгорания (в начальной фазе) снижается «жесткость», максимальные давление и температура сгорания. Что, в свою очередь, позволяет использовать топлива с низким цетановым числом, а также достичь снижения тепловой и механической нагруженности, шумности двигателя, уровня вредности и дымности отработавших газов.

Кроме того, подавление скорости выделения теплоты в начальной фазе сгорания в районе верхней мертвой точки (ВМТ), где теплота преобразуется в работу наиболее эффективно, создает предпосылки к снижению экономичности цикла. [2, 3]. Так же ввиду истощения энергетических ресурсов и борьбы с парниковым эффектом, интенсивно идет поиск альтернативных источников энергии. Предпочтение отдается возобновляемым источникам, которые обеспечивают баланс по сохранению парниковых газов. Одним из решений этой проблемы является использование топлив растительного происхождения, к которым можно отнести растительные масла [4, 5]. Учитывая тот факт, что Алтайский край является сельскохозяйственным регионом, то выращивание и использование данного вида топлива является для региона перспективным. Но применение сырых масел требует применения специальных камер сгорания, обеспечивающих высокую температуру стенок камеры сгорания, или переоснащение топливной аппаратуры.

Целью исследования являлось сравнение и выявление отличий в протекании рабочего процесса дизеля при его работе на различных ТА.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие основные задачи:

- разработка экспериментальной установки;
- проведение моторных испытаний и сравнительного анализа показателей рабочего процесса дизеля при его работе с разделенной ТА с непосредственным впрыскиванием топлива (далее штатная), а также с ТА

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА РАПСОВОМ МАСЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ COMMON RAIL

повышенного давления типа CR и с беспи-  
лотным и пилотным впрыском.

### Экспериментальная установка и методика исследования

На кафедре ДВС Алтайского государст-  
венного технического университета им И.И.  
Ползунова, была создана экспериментальная  
установка для проведения исследования  
двух ТА: штатной и CR. Основой установки  
при проведении исследований является од-  
ноцилиндровый отсек дизельного двигателя  
УК-2 размерностью  $S/D = 130/140$  мм. Уста-  
новка базируется, в основном, на отече-  
ственных компонентах. Исключение составляют  
топливный насос высокого давления и датчи-  
ки.

Использован ТНВД со встроенным топ-  
ливоподающим насосом и регулятором  
производства фирмы BOSCH CR/CP3S3/L90/  
20-289S. ТНВД снабжен автономным приво-  
дом от электродвигателя с изменяемой час-  
отой вращения, что позволяет обеспечить  
независимость режимов ДВС и ТНВД, а также  
автономное использование ТНВД.

Аккумулятор высокого давления с встро-  
енным предохранительным клапаном, трубки  
высокого давления, электрогидравлическая  
форсунка типа «1790» - производства АЗПИ.

В аккумуляторе производства АЗПИ ус-  
тановлен датчик давления и редукционный  
клапан.

Особенностью системы является созда-  
ние давления впрыска, которое не зависит от  
частоты вращения двигателя и цикловой по-  
дачи. Начало впрыска, продолжительность и  
цикловая подача управляются подаваемым  
электрическим сигналом. Момент начала  
впрыска определяется через систему элек-  
тронного дизельного регулирования «угло-  
время».

Используемая в комплексе форсунка ти-  
па «1790» производства АЗПИ является фор-  
сункой с электрогидравлическим управлени-  
ем типа Bosch.

Блок управления M240, жгут блока  
управления двигателем производства фирмы  
АБИТ. Система управления дизельным дви-  
гателем M240 предназначена для преобразо-  
вания и обработки первичной информации,  
поступающей от датчиков.

Сама программа состоит из отдельных  
блоков, позволяющих просматривать и ме-  
нять значения регулировок режимов работы  
этих блоков на различных режимах. Про-  
грамма обеспечивает:

- работу ДВС на различных режимах;
- программирование основных показате-  
лей режимов работы на различных режимах;
- запись основных показателей ДВС во  
время работы (режим осциллографа);
- оперативное изменение параметров  
двигателя во время работы;
- сохранение изменения регулировок в  
ПЗУ и в файле;
- перепрошивка данных ПЗУ из файла;
- просмотр осциллограмм быстропроте-  
кающих процессов.

Созданная экспериментальная система  
топливоподдачи «Common Rail» с повышен-  
ным давлением впрыска топлива позволяет  
обеспечить изменение давления впрыска до  
180 МПа в широком диапазоне опережения  
угла впрыска.

Выхлопная система установки оснащена  
газоотводящими устройствами для отбора и  
анализа отработавших газов на дымность и  
содержание токсичных компонентов. Анализ  
отработавших газов проводился с помощью  
лабораторного газоанализатора QUINTOX –  
9106, а замер дымности с помощью дымоме-  
ра Bosch.

В ходе экспериментов сбор данных бы-  
стродействующих процессов, происходящих в  
цилиндре дизеля, и их последующая обра-  
ботка проводится с помощью компьютерного  
комплекса Н-2000 в комплекте с усилителями  
заряда Kistler, LE-41 и датчиками.

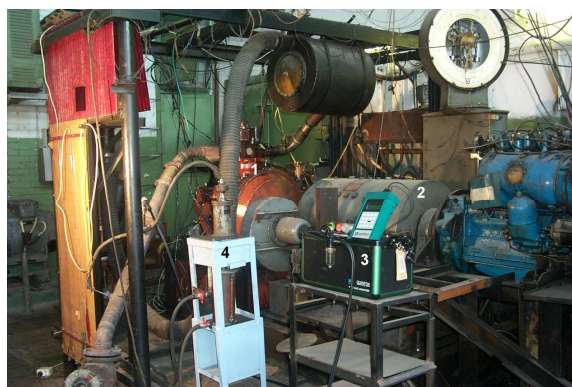
В качестве программного обеспечения  
(ПО) используется пакет «ACTest».

Обработка индикаторных диаграмм на  
тепловыделение осуществлялась по методу  
ЦНИДИ с помощью программы, разрабо-  
танной на кафедре ДВС Алтайского государст-  
венного технического университета.

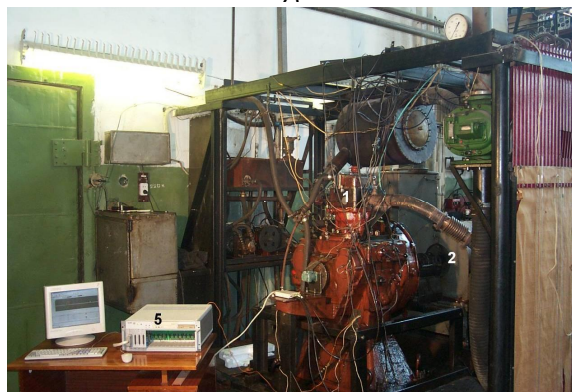
Для регистрации параметров впрыска  
топлива (с ТАНД) установка была оборудова-  
на индуктивным датчиком подъема иглы  
форсунки и пьезоэлектрическим датчиком  
давления топлива. Фото установки приведено  
на рисунке 1.

Предварительно проведены регулиро-  
вочные испытания, и определены оптималь-  
ные углы подачи топлива, давление, степень  
сжатия и т.д. для каждой исследуемой ТА  
(таблица 1).

Во время проведения эксперименталь-  
ных исследований на моторной установке,  
было произведено снятие серии нагрузочных  
характеристик при частоте вращения колен-  
чатого вала 1750 мин<sup>-1</sup>.



А



Б

Рисунок 1 А, Б - Общая схема экспериментальной установки:

1 – одноцилиндровый моторный отсек УК-2,  
2 – балансирующий электродинамометр с весовой головкой, 3 - газоанализатор QUINTOX – 9106,  
4 – дымометр Bosh, 5 - комплекс сбора данных быстропротекающих процессов

Таблица 1 – Характеристика ТА

| Тип ТА                                       | n, мин <sup>-1</sup> | УОВТ основная ПТ, ° п.к.в. | УОВТ пилотная ПТ, ° п.к.в. | Давление             | ε  |
|----------------------------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|----|
| Штатная                                      | 1750                 | 23                         | -                          | В распылителе 27 МПа | 16 |
| Common Rail                                  | 1750                 | 16                         | -                          | В рампе 150 МПа      | 15 |
| Common Rail с пилотом, 5% от основной порции | 1750                 | 16                         | 6                          | В рампе 150 МПа      | 15 |

На каждом режиме работы двигателя производились измерения и обработка результатов, которые позволяют оценить режим по показателям:

- индикаторные КПД и расход топлива;
- максимальные давление и температура цикла;

- «жесткость» работы;
- коэффициенты неиспользования теплоты в цикле;
- выбросы вредных веществ  $NO_x$ ,  $CO$ , сажа.

В качестве топлива использовалось рапсовое масло.

Режимы нагрузки задавались от холодного хода (0 %) до максимального значения (100 %), было произведено снятие шести точек по каждому режиму.

### Анализ результатов исследования

На рисунке 2 приведены изменения расхода воздуха ( $G_b$ ), расхода топлива ( $G_T$ ), коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  и избыточного давления ( $P_k$ ).

Изменение графиков на рисунке 2 одинаково, различие в расположении кривых лежит в пределах погрешности измерений, что позволяет провести сравнительный анализ.

При переходе от штатной ТА к ТА CR без пилотной порции топлива (ПТ) наблюдается незначительное увеличение количества  $G_b$ ,  $P_k$  и  $\alpha$ , применение пилотной ПТ в ТА CR также дает прирост этих показателей на всех режимах нагрузки. При этом расход воздуха, проходящего через турбину, при переходе от штатной ТА к ТА CR без пилотной ПТ и далее с применением в ТА CR пилотной ПТ незначительно уменьшается также независимо от нагрузки.

На основе сопоставления графиков на рисунке 3 видно, что с переходом от штатной ТА на ТА CR без применения пилотной ПТ имеем снижение расхода рапсового масла в среднем на 7 г/кВт/ч.

Причина этого в том, что в ТА CR большая величина давления впрыска топлива и, как следствие, уменьшение времени подачи и более мелкое распыливание топлива.

С подачей на ТА CR пилотной ПТ на режимах малой и средней нагрузки виден рост расхода рапсового масла по сравнению с ТА CR, так как на частичных режимах преимуществ наличия пилотной ПТ практически не наблюдается. На режиме максимальной нагрузки расход рапсового масла в ТА CR с пилотной ПТ уменьшается по сравнению с ТА CR, так как применение пилотной п.т. дает сокращение подачи основной ПТ, впрыск основной порции в очаг пламени пилотной порции снижает продолжительность горения основной порции.

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА РАПСОВОМ МАСЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ COMMON RAIL

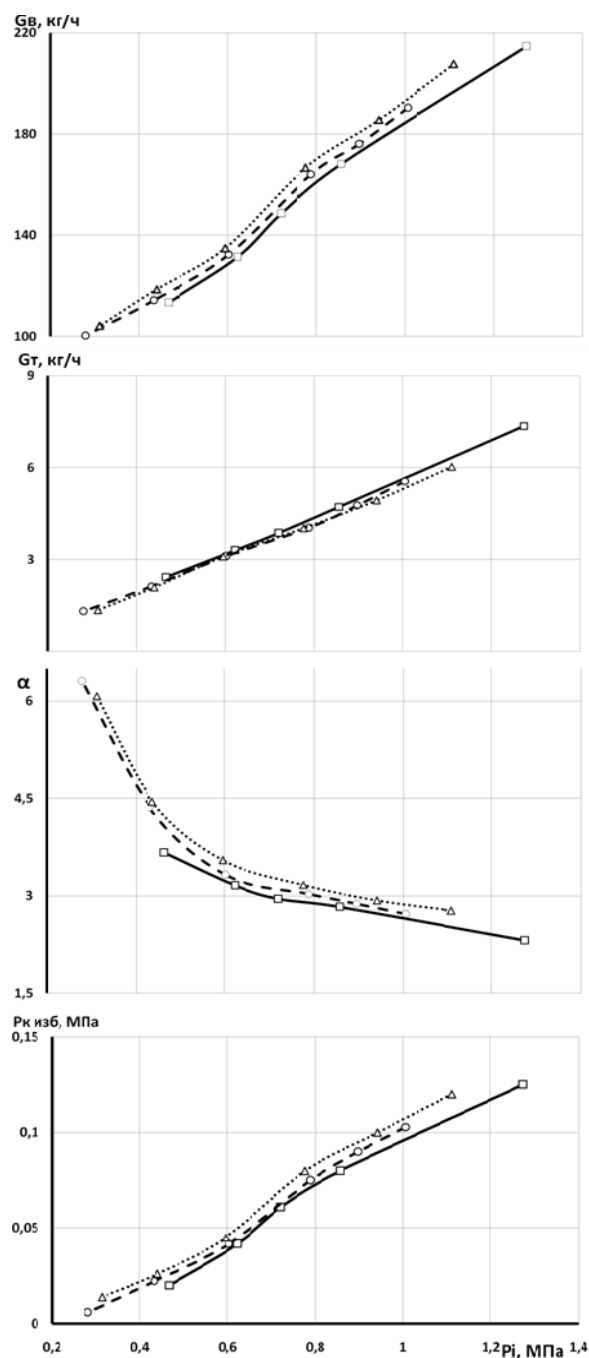
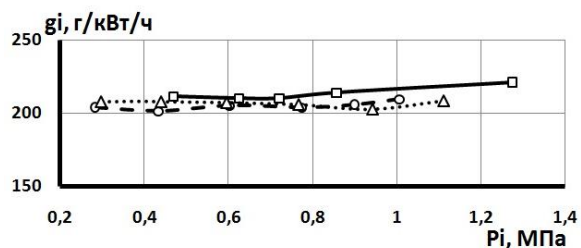


Рисунок 2 - Изменение  $G_t$ ,  $G_b$ ,  $\alpha$ ,  $P_k$  по нагрузочной характеристике при  $n=1750 \text{ мин}^{-1}$

На рисунке 4 приведены графики изменения максимальной температуры, давления и жесткости сгорания в цикле.

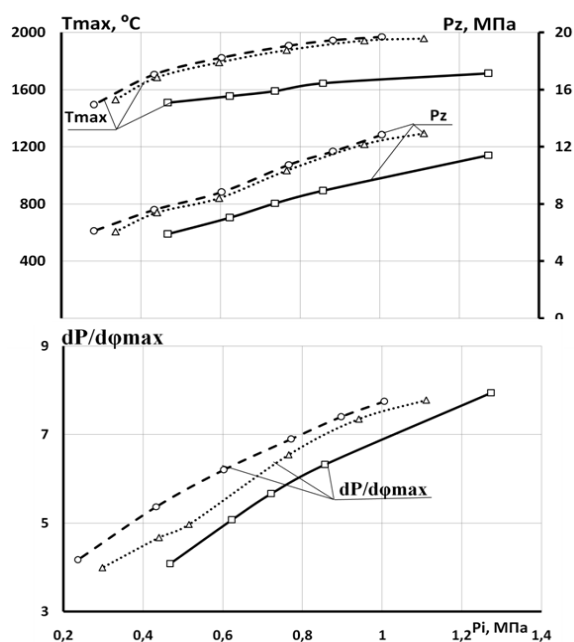
Следует отметить увеличение максимальной температуры в среднем на  $300^\circ\text{C}$ , рост максимального давления в среднем на 2 МПа, а также увеличение жесткости работы примерно на 1 МПа/град при использовании ТА CR по сравнению со штатной ТА.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 3/1 2012



— штатная; — CR;  
.... CR с пилотной п.т.

Рисунок 3 – Индикаторный расход топлива по нагрузочной характеристике при  $n=1750 \text{ мин}^{-1}$



— штатная; — CR;  
.... CR с пилотной ПТ

Рисунок 4 – Изменение максимальной температуры и жесткости по нагрузочной характеристике при  $n=1750 \text{ мин}^{-1}$

Применение пилотной ПТ в ТА CR. дает незначительное снижение этих показателей, которое происходит по причинам, указанным выше.

Как видно из графиков на рисунке 5, величина выбросов CO при переходе от штатной ТА к ТА CR без пилотной ПТ уменьшается в среднем на 60-90 ppm, и в дальнейшем с применением в ТА CR пилотной ПТ также происходит незначительное уменьшение выбросов по отношению к той же системе без пилота примерно на 10 ppm по причине интенсификации процесса сгорания.

Величина выбросов  $NO_x$  с применением ТА CR без пилотной ПТ резко увеличивается в среднем на 350-400 ppm, применение пилотной ПТ на ТА CR дает незначительный рост, примерно на 50 ppm, по отношению к той же ТА без пилотной ПТ.

Так же наблюдается незначительный рост температуры выхлопных газов при переходе от штатной ТА к ТА CR примерно на  $10^\circ C$ , применение в ТА CR пилотной ПТ дает снижение показаний в среднем на  $3-5^\circ C$ . Изменение показаний выбросов  $NO_x$  и температуры выхлопных газов можно объяснить увеличением максимальной температуры цикла.

Это происходит по причине повышенной вязкости рапсового масла. При переходе от штатной ТА к ТА CR без пилотной ПТ величины выбросов на тех же режимах значительно меньше и составляют 0,2 ед. Bosh, это можно объяснить улучшением качества распыливания, а применение пилотной ПТ дает равномерность показаний по всему нагрузочному режиму работы двигателя так как улучшаются процессы смесеобразования и сгорания.

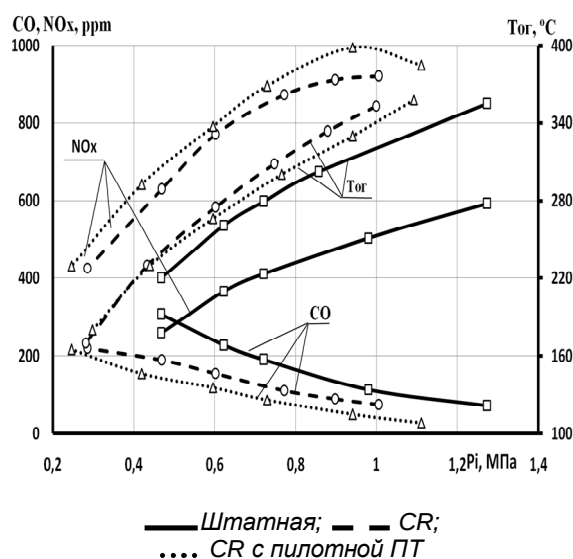


Рисунок 5 – Выбросы  $CO$ ,  $NO_x$  и  $T_{ог}$  по нагрузочной характеристике при  $n=1750 \text{ мин}^{-1}$

На рисунке 6 видно, что при работе двигателя на штатной ТА на режимах минимальной и максимальной нагрузки величина выбросов сажи значительно возрастает по отношению к режиму средней нагрузки и составляет 0,5 и 0,6 ед. Bosh соответственно.

Объясняется это плохим качеством распыливания на этих режимах и, как следствие, большей вероятности образования локаль-

ных переобогащенных зон, приводящих к неполноте сгорания топлива.

Результаты обработки индикаторных диаграмм на тепловыделение показывают (рисунок 7), что количество выделившейся теплоты  $X_i$  во взрывной фазе составляет для штатной ТА 10%, для ТА CR без пилотной ПТ – 19%, для ТА CR с пилотной ПТ – 6%, что соответственно определяет наименьшую жесткость процесса ТА CR с пилотной ПТ.

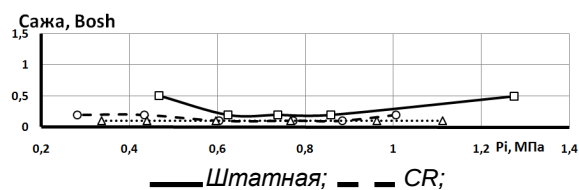


Рисунок 6 – Выбросы сажи по нагрузочной характеристике при  $n=1750 \text{ мин}^{-1}$

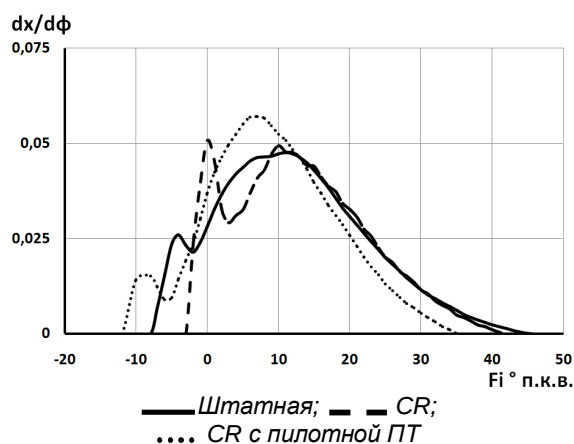


Рисунок 7 – Скорость тепловыделения при

В ТА CR без пилотной ПТ по сравнению со штатной ТА, топливо поступает при более высоком давлении и с большей скоростью, в результате чего за период задержки воспламенения большое его количество подготовлено к сгоранию, что вызывает резкий рост количества теплоты  $X_i$ , выделившейся во взрывной фазе. Для ТА CR с пилотной ПТ количество топлива, подготовленного к сгоранию за период задержки, ограничено величиной пилотной порции, что и определяет меньшее значение теплоты  $X_i$ , выделившейся во взрывной фазе. Основная порция топлива поступает в развитый очаг пламени, что предопределяет её быстрое сгорание.

При обработке экспериментальных данных использовался дифференциальный метод анализа индикаторного КПД [6], по которому индикаторный КПД определяется как

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА РАПСОВОМ МАСЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ COMMON RAIL

разность единицы и коэффициентов неиспользования теплоты в цикле:

$$h_i = 1 - d_g - d_c - d_T - d_{nc} - d_w,$$

где  $h_i$  - индикаторный КПД цикла;  $d_g$  - неиспользование теплоты в эталонном цикле;  $d_c$  - неиспользование теплоты по причине переменности состава рабочего тела;  $d_T$  - неиспользование теплоты по причине изменения температуры;  $d_{nc}$  - неиспользование теплоты из-за несвоевременности ввода теплоты в цикл;  $d_w$  - неиспользование теплоты вследствие теплообмена. Изменение названных коэффициентов в зависимости от нагрузки показано на рисунке 8.

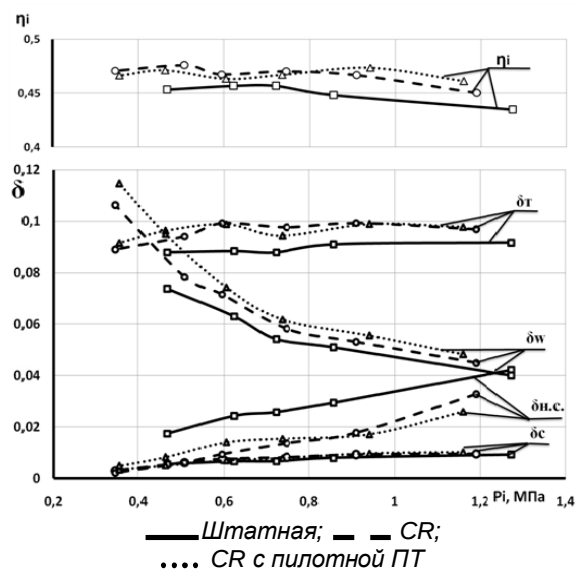


Рисунок 8 – Коэффициенты неиспользования теплоты по нагрузочной характеристике при  $n=1750 \text{ мин}^{-1}$

Графики изменения коэффициента неиспользования теплоты вследствие изменения температуры  $d_T$  показывают, что переход на ТА CR даёт рост  $d_T$  по отношению к штатной ТА, на 0,01 на режиме малых нагрузок и снижение до 0,008 на режиме средних и максимальных нагрузок, а применение пилотной ПТ. в ТА CR незначительно влияет на этот коэффициент. Увеличение этого коэффициента происходит по причине роста максимальной температуры.

Графики изменения коэффициента неиспользования теплоты вследствие изменения состава  $d_c$  показывают, что переход на

ТА CR без пилотной ПТ даёт незначительный рост величины  $d_c$  по отношению к штатной ТА, применение пилотной ПТ в ТА CR не ведёт к серьёзному изменению этого коэффициента.

Графики изменения коэффициента неиспользования теплоты вследствие теплообмена  $d_w$  показывают незначительный рост при переходе от штатной ТА к ТА CR в среднем на 0,002, а применение пилотной ПТ даёт рост по отношению к той же ТА без пилота еще в среднем еще на 0,001. Это связано с тем, что в ТА CR значительно большие значения максимального давления сгорания по отношению к штатной ТА за счет роста температуры рабочего тела.

Графики изменения коэффициента неиспользования теплоты вследствие несвоевременности ее ввода  $d_{nc}$  показывают, что при переходе от штатной ТА к ТА CR без пилотной ПТ заметно снижение величины  $d_{nc}$ , в среднем на 0,014 ед., происходит это из-за уменьшения по времени продолжительности ввода теплоты.

Применение пилотной ПТ в ТА CR на режиме малых и средних нагрузок по отношению к той же системе без пилотной п.т. практически не дает изменений, так как на этих режимах отличий в протекании рабочего процесса почти не наблюдается, но на режиме близком к максимальной нагрузке заметно понижение величины  $d_{nc}$  примерно на 0,01 ед. по сравнению к ТА CR без пилотной п.т. при тех же нагрузках. Объясняется это уменьшением продолжительности фазы диффузионного горения и следовательно более оптимальным характером тепловыделения.

Изменение коэффициентов неиспользования теплоты в итоге определяет характер протекания индикаторного к.п.д. (рисунок 8), который соответствует изменению индикаторного расхода топлива  $g_i$  (рисунок 3).

Все вышеизложенное дает основание рекомендовать пилотный впрыск для применения в ТА CR на больших нагрузках.

### Выводы

В результате проведенного исследования по сравнению и выявлению отличий в протекании рабочего процесса дизеля при его работе на различных ТА, а также исследования работы ТА CR с подачей пилотной порции топлива (ПТ) было получено следующее:

1. ТА CR дает возможность уменьшить продолжительность ввода порции топлива, времени подачи и улучшить качество смесеобразования более мелко распылять топливо по КС, а применение пилотной ПТ на этой ТА позволяет получить лучшую гомогенизацию и сокращение подачи основной ПТ, что ведет к уменьшению индикаторного расхода топлива, а также росту максимального давления, температуры цикла и температуры ОГ, жесткости сгорания в КС дизеля по сравнению со штатной ТА.

3. Увеличение выбросов  $NO_x$  и снижение  $CO$ , для ТА CR и в дальнейшем с применением в ней пилотной ПТ, происходит вследствие улучшения интенсификации процесса сгорания, что приводит к повышению локальных температур и давления.

4. При использовании ТА CR уменьшается количество выбросов сажи, а применение пилотной ПТ в ТА CR дополнительно снижает выброс сажи.

5. Количество выделившейся теплоты  $X_i$  во взрывной фазе составляет для штатной ТА 10%, для ТА CR без пилотной ПТ 19%, для ТА CR с пилотной ПТ 6%, что соответственно определяет меньшую жесткость процесса ТА CR с пилотной ПТ по сравнению с беспилотной ТА CR.

6. Переход от штатной ТА к ТА CR ведет к незначительному увеличению коэффициентов неиспользования теплоты цикла вследствие изменения температуры  $\delta_t$  и теплообмена  $\delta_w$ , при этом уменьшается коэффициент неиспользования теплоты вследствие несвоевременности её ввода  $\delta_{нс}$ , а коэффициент неиспользования теплоты вследствие изменения состояния остается практически без изменения.

Применение пилотного впрыска ПТ в ТА CR показывает, что коэффициенты неиспользования теплоты вследствие изменения температуры  $\delta_t$  и состава  $\delta_c$  остаются практически без изменений, а коэффициент неиспользования теплоты вследствие теплообмена  $\delta_w$  увеличивается. При этом коэффициент неиспользования теплоты вследствие несвоевременности её ввода  $\delta_{нс}$  даёт рост показаний на режимах малых и средних нагрузок и уменьшение показаний при увеличении

нагрузок. В целом индикаторный к.п.д. на больших нагрузках выше для ТА CR с пилотной ПТ.

Все вышеизложенное дает основание рекомендовать пилотный впрыск для применения в ТА CR на больших нагрузках.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Автомобильные двигатели: Рабочие циклы. Показатели и характеристики. Методы повышения эффективности энергопреобразования / В.Р. Бурячко, А.В. Гук.— СПб.: НПИКЦ, 2005.— 292 с.

2 Свистула А.Е. Двойная подача топлива в дизеле с топливной системой непосредственного действия разделённого типа / А.Е. Свистула, Г.Д. Матиевский / Ползуновский вестник.— 2009.— №4.— С. 166-173.

3 Свистула, А.Е. Улучшение рабочего процесса дизеля при двойной подаче топлива / А.Е. Свистула, Г.Д. Матиевский / Сборник научных трудов международной конференции «Двигатель 2010», посвященной 180-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана / Под ред. Н.А. Иващенко, В.А. Вагнера, Л.В. Грехова.— М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.— С. 224-226.

4 Мысник, М.И. Анализ теплофизических свойств альтернативных топлив для двигателей внутреннего сгорания/ М.И. Мысник, А.Е. Свистула / Ползуновский Вестник.— 2009.— № 1-2.— С. 37-44.

5 Шашев, А.В. Особенности топливо подачи и сгорания топлив на основе рапсового масла / А.В. Шашев / Двигатели внутреннего сгорания // Научно-технический журнал. Харьков: НТУ «ХПИ».— 2010.— № 1.— С. 32-35.

6 Матиевский, Д.Д. Показатели эффективности двигателей внутреннего сгорания и их анализ: учеб. пособие / Д.Д. Матиевский; АлтГТУ им. И.И. Ползунова.— Барнаул, 2006.— 80 с.

**Свистула А.Е.**, д.т.н., проф., заведующий кафедрой ДВС, e-mail: [Sae59@mail.ru](mailto:Sae59@mail.ru)

**Мысник М.И.**, аспирант кафедры ДВС, e-mail: [D21200403@mail.ru](mailto:D21200403@mail.ru)  
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»,  
656038, Барнаул, просп. Ленина, 46,  
тел. (83852) 260516.