



На правах рукописи

Мацулевич Михаил Андреевич

**ПОВЫШЕНИЕ ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ  
НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМАХ ПРИ СМЕШАННОМ  
РЕГУЛИРОВАНИИ МОЩНОСТИ БЕНЗИНОВОГО ДВИГАТЕЛЯ**

05.04.02 – Тепловые двигатели

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2013

Работа выполнена на кафедре «Двигатели внутреннего сгорания» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ») (Национальный исследовательский университет).

Научный руководитель – **Лазарев Евгений Анатольевич**,  
доктор технических наук, профессор, профессор  
кафедры «Двигатели внутреннего сгорания»  
ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (Национальный исследова-  
тельский университет), г. Челябинск.

Официальные оппоненты: **Малоземов Андрей Адиевич**,  
доктор технических наук, доцент, главный науч-  
ный сотрудник НП «Сертификационный центр  
автотракторной техники», г. Челябинск;

**Морозова Вера Сергеевна**,  
доктор технических наук, доцент, профессор ка-  
федры «Эксплуатация автомобильного транспор-  
та» ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (Национальный ис-  
следовательский университет), г. Челябинск.

Ведущая организация – ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный  
авиационный технический университет», г. Уфа.

Защита состоится 30 октября 2013 г., в 13 : 00 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.09 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1001 гл. корп. E-mail: D212.298.09@mail.ru, тел/факс (351)267-91-23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью Вашего учреждения, просим направлять в двух экземплярах по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



Лазарев Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Повышение топливной экономичности и снижение выбросов вредных веществ с отработавшими газами являются основными направлениями совершенствования рабочего цикла бензиновых двигателей. Хорошо организованные рабочие циклы на режимах номинальной мощности и максимального вращающего момента не полностью обуславливают высокие эксплуатационные показатели двигателей. Почти 70% времени бензиновые двигатели работают на частичных нагрузках (эксплуатационных режимах), которые сопровождаются дросселированием потока свежего заряда на впуске. Дросселирование приводит к увеличению работы совершения насосных ходов и снижению полноты сгорания топлива. Повышение топливной экономичности бензинового двигателя на основных эксплуатационных режимах является одним из условий достижения высокого технического уровня бензиновых двигателей.

Один из способов повышения технического уровня бензинового двигателя является использование рециркуляции охлажденных отработавших газов (РООГ) при снижении дросселирования воздушного потока на впуске. Повышение топливной экономичности бензинового двигателя на режимах частичных нагрузок использованием рециркуляции охлаждаемых отработавших газов, снижения степени дросселирования свежего заряда с корректировкой угла опережения воспламенения является актуальной научной задачей. При реализации, поставленных задач, техническое решение повышения топливной экономичности бензинового двигателя проверялось сравнением удельных индикаторного и эффективного расходов топлива при количественном и смешанном регулировании мощности.

**Цель работы.** Повышение топливной экономичности бензинового двигателя при работе на частичных нагрузочных режимах применением смешанного регулирования мощности с изменением степеней дросселирования свежего заряда и рециркуляции охлаждаемых отработавших газов.

Для достижения цели предусматривается решение следующих задач:

1. Разработать способ и устройство, которые позволяют повысить топливную экономичность бензинового двигателя на режимах частичных нагрузок.
2. Разработать математическую модель рабочего цикла бензинового двигателя, с учетом переменных степеней рециркуляции и охлаждения отработавших газов.
3. Выполнить расчетно-аналитическую оценку эффективности использования рециркуляции отработавших газов, снижения дросселирования свежего заряда и корректировки угла опережения воспламенения в бензиновом двигателе.
4. Экспериментально оценить эффективность разработанного способа и устройства при совершенствовании показателей рабочего цикла бензинового двигателя.
5. Разработать рекомендации по использованию системы рециркуляции охлаждаемых отработавших газов в бензиновых двигателях.

**Научная новизна.**

1. Разработана математическая модель синтеза рабочего цикла бензинового двигателя со смешанным регулированием мощности за счет комплексного изме-

нения степеней дросселирования свежего заряда, рециркуляции и охлаждения отработавших газов, угла опережения воспламенения топлива.

2. Установлены закономерные связи продолжительности и показателя характера процесса сгорания со степенью рециркуляции отработавших газов, коэффициентами наполнения и избытка воздуха в бензиновом двигателе.

3. Уточнена зависимость среднего давления механических потерь бензинового двигателя, учитывающая степень дросселирования свежего заряда на впуске.

4. Выявлена зависимость времени прогрева бензинового двигателя от степени охлаждения рециркулируемых отработавших газов жидкостью системы охлаждения.

**Методология и методы исследования.** Математическое моделирование внутрицилиндровых процессов при разных степенях дросселирования потока свежего заряда и рециркуляции отработавших газов, нагрузке и угле опережения воспламенения. Экспериментальные исследования рабочих циклов бензинового двигателя с использованием стандартных и оригинальных измерительной аппаратуры и методов испытаний.

**Объект исследования.** Рабочие циклы бензинового двигателя с изменением степеней дросселирования свежего заряда и рециркуляции охлажденных отработавших газов при работе на частичных нагрузках.

**Предмет исследования.** Влияние смешанного регулирования мощности изменением степеней дросселирования свежего заряда и рециркуляции охлажденных отработавших газов на параметры процесса сгорания и основные показатели рабочего цикла бензинового двигателя.

**Практическая ценность.**

1. Разработана программа синтеза рабочего цикла бензинового двигателя со смешанным регулированием мощности за счет комплексного изменения степеней дросселирования свежего заряда, угла опережения воспламенения топлива, рециркуляции и охлаждения отработавших газов.

2. Достигнуто повышение топливной экономичности бензинового двигателя на эксплуатационных режимах применением смешанного регулирования мощности изменением степеней дросселирования свежего заряда и рециркуляции охлажденных отработавших газов с корректировкой угла опережения воспламенения.

3. Разработано техническое решение, защищенное патентом Российской Федерации, обеспечивающее поддержание температуры охлаждающей жидкости использованием теплообменника системы рециркуляции отработавших газов в бензиновом двигателе.

**Реализация результатов.** Математическая модель синтеза рабочего цикла бензинового двигателя с разной степенью рециркуляции и охлаждения отработавших газов, методические указания формирования исходных данных используются в учебном процессе кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» Южно-Уральского государственного университета. Программа синтеза рабочего цикла «EGR» использована в НП «Сертификационный центр автотракторной техники» при оценке показателей бензиновых двигателей.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы обсуждены и одобрены на региональных, межрегиональных и международных научно-технических конференциях: Челябинск: ЮУрГУ, 2011-2013 гг.; Тамбов: ТГТУ, 2012 г.; Протвино: ГНИУИИО РАО, 2012 г.; Челябинск: ЧГАА, 2012–2013 гг.

Диссертационная работа одобрена на научном семинаре кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» Южно-Уральского государственного университета.

**Публикации.** Основные научные и практические результаты диссертационной работы изложены в 8 работах, в том числе 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК, 4 – в материалах международных конференций, в патенте РФ на полезную модель.

**Личный вклад автора заключается в:**

- разработке математической модели рабочего цикла бензинового двигателя с учетом различных степеней рециркуляции и охлаждения отработавших газов;
- создании программы, позволяющей выполнить синтез рабочего цикла бензинового двигателя с различными степенями рециркуляции и охлаждения отработавших газов;
- разработке методики проведения испытаний и рекомендаций выбора исходных данных при синтезе рабочего цикла двигателя с рециркуляцией отработавших газов и снижением степени дросселирования свежего заряда на впуске;
- подготовке и проведении стендовых испытаний двигателя.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка (61 источник) и приложения. Диссертация содержит 155 страниц, 12 таблиц, 58 иллюстраций.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** отмечается, что улучшение эксплуатационных свойств бензинового двигателя зависит от качества организации рабочего цикла. Более 70% срока эксплуатации автомобильный двигатель работает при частичных нагрузках с дросселированием потока свежего заряда на впуске. Применение рециркуляции охлаждаемых отработавших газов для уменьшения степени дросселирования с целью повышения топливной экономичности на этих режимах является актуальным направлением развития рабочего цикла бензиновых двигателей.

**В первой главе** рассматриваются перспективные направления совершенствования рабочих циклов, а именно повышение топливной экономичности и снижение выбросов вредных веществ с отработавшими газами. Известно, что эксплуатация ДВС на частичных нагрузках сопровождается увеличением работы насосных ходов, вследствие дросселирования, и неполноты сгорания топлива.

Известны способы регулирования мощности, какими являются количественное, качественное и смешанное регулирование. Отмечается эффективность качественного регулирования мощности бензинового двигателя с использованием рециркуляции охлажденных отработавших газов при среднем эффективном давлении рабочего цикла  $p_e = 0,80 \dots 0,89$  МПа. С целью повышения топливной экономичности бензинового двигателя на характерных эксплуатационных режимах ( $p_e = 0,35 \dots 0,65$  МПа) целесообразно смешанное регулирование мощности с применением комплекса мероприятий: рециркуляции охлажденных отработавших газов, понижения степени дросселирования свежего заряда и увеличения угла опережения воспламенения.

Смешение отработавших газов со свежим зарядом, изменяя его физические свойства, оказывает влияние на процессы наполнения цилиндра и сгорания топлива. Имеющиеся данные не дают полной информации о моделировании рабочих циклов с рециркуляцией охлаждаемых отработавших газов при смешанном регулировании мощности бензинового двигателя. На основе анализа выполненных ранее исследований (G. Fontana, E. Galloni, T. Alger, O. A. Kutlar, H. Arslan, A. T. Calik и др.) и рабочей гипотезы сформулированы цель и задачи настоящей диссертационной работы.

**Во второй главе** приведена разработанная математическая модель синтеза рабочего цикла бензинового двигателя с комплексным учетом различных степеней рециркуляции, охлаждения отработавших газов и дросселирования свежего заряда.

Для учета влияния рециркуляции охлаждаемых отработавших газов на показатели бензинового двигателя, рабочий объем цилиндра разделен на два парциальных объема  $V_{TBC}$  и  $V_{РООГ}$  топливовоздушной смеси (ТВС) и рециркулируемых охлаждаемых отработавших газов (рис. 1).

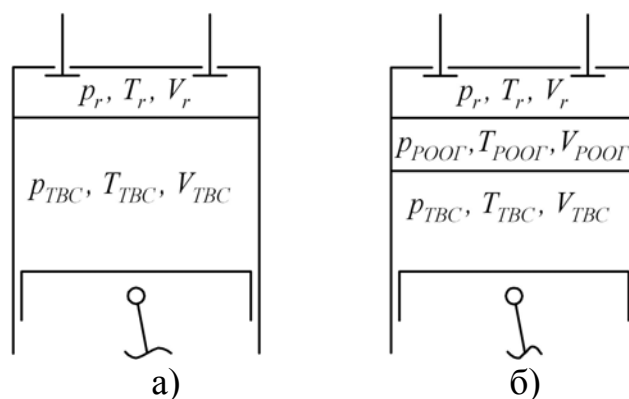


Рис. 1. Составляющие рабочего тела и параметры, характеризующие его состояние в цилиндре бензинового двигателя без РООГ (а) и с РООГ (б)

При построении математической модели синтеза рабочего цикла бензинового двигателя приняты следующие допущения: термодинамическая система однородна, уравнение состояния Менделеева – Клапейрона справедливо для действительного цикла, состав и свойства рабочего тела зависят от его температуры. Под рабочим телом понимается смесь, состоящая из топливовоздушной смеси, остаточных газов, которые находятся в цилиндре двигателя, и рециркулируемых отработавших газов. Степень рециркуляции отработавших газов оценивается отношением объема рециркулируемых отработавших газов, содержащихся в рабочем теле, к сумме объемов топливовоздушной смеси и рециркулируемых отработавших газов:

$$k_{РООГ} = \frac{V_{РООГ}}{V_{TBC} + V_{РООГ}}, \quad (1)$$

где  $k_{РООГ}$  – степень рециркуляции охлаждаемых отработавших газов.

Тогда параметры состояния рабочего тела в конце такта впуска определяются:  
– давление ( $p_a$ )

$$p_a = \frac{(\varepsilon - 1) \cdot \eta_v}{\varepsilon} \cdot \left[ \frac{(T_{TBC} + \Delta T_1) \cdot p_{TBC} \cdot (1 - k_{POOG})}{T_{TBC}} + \frac{(T_{POOG} + \Delta T_2) \cdot p_{POOG} \cdot k_{POOG}}{T_{POOG}} \right] + \frac{p_r}{\varepsilon}, \quad (2)$$

– коэффициент остаточных газов ( $\gamma$ )

$$\gamma = \frac{p_r \cdot T_{TBC} \cdot T_{POOG}}{\eta_v \cdot (\varepsilon - 1) \cdot (T_r \cdot T_{POOG} \cdot p_{TBC} \cdot (1 - k_{POOG}) + T_r \cdot T_{TBC} \cdot p_{POOG} \cdot k_{POOG})}, \quad (3)$$

– температура ( $T_a$ )

$$T_a = \frac{T_r \cdot \gamma + (T_{TBC} + \Delta T_1) \cdot K_1 + (T_{POOG} + \Delta T_2) \cdot K_2}{1 + \gamma}, \quad (4)$$

где  $p_{TBC}$ ,  $p_{POOG}$ ,  $p_r$  – давление топливоздушной смеси, рециркулируемых охлаждаемых отработавших газов, остаточных газов соответственно;  $T_{TBC}$ ,  $T_{POOG}$ ,  $T_r$  – температура топливоздушной смеси, рециркулируемых охлаждаемых отработавших газов, остаточных газов соответственно;  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$  – подогрев (охлаждение) топливоздушной смеси и рециркулируемых отработавших газов от стенок внутрицилиндрового пространства соответственно,  $\varepsilon$  – степень сжатия;

$$K_1 = \frac{p_{TBC} \cdot (1 - k_{POOG}) \cdot T_{POOG}}{p_{TBC} \cdot (1 - k_{POOG}) \cdot T_{POOG} + p_{POOG} \cdot k_{POOG} \cdot T_{TBC}},$$

$$K_2 = \frac{p_{POOG} \cdot k_{POOG} \cdot T_{TBC}}{p_{TBC} \cdot (1 - k_{POOG}) \cdot T_{POOG} + p_{POOG} \cdot k_{POOG} \cdot T_{TBC}},$$

– удельный объем ( $v_a$ )

$$v_a = R \cdot \frac{T_a}{p_a} \cdot \left[ \frac{\left( \frac{\alpha \cdot L_0'}{\mu_B} + \frac{1}{\mu_T} \right) \cdot (1 + K_4)}{(\alpha \cdot L_0' + 1) \cdot (1 + K_3)} \right], \quad (5)$$

где  $K_4 = \frac{k_{POOG}}{1 - k_{POOG}} \cdot \frac{p_{POOG} \cdot T_{TBC}}{p_{TBC} \cdot T_{POOG}}$ ;  $K_3 = \frac{k_{POOG}}{1 - k_{POOG}} \cdot \frac{p_{POOG} \cdot R_{TBC} \cdot T_{TBC}}{p_{TBC} \cdot R_{POOG} \cdot T_{POOG}}$ ;  $R_{TBC}$  и  $R_{POOG}$  – газ

овые постоянные для свежего заряда и рециркулируемых охлаждаемых отработавших газов;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;  $L_0'$  – теоретическое количество воздуха для сжигания одного кг топлива.

Характеристики выгорания топлива описывались уравнением И.И. Вибе. Общая удельная использованная теплота процесса сгорания ( $q_z$ ):

$$q_z = \frac{\xi \cdot Hu}{(1 + \gamma) \cdot (\alpha \cdot L_0' + 1) \cdot (1 + K_3)}, \quad (6)$$

где  $Hu$  – низшая теплота сгорания топлива.

Коэффициент молекулярного изменения это есть отношение числа молей ТВС и РООГ после сгорания к количеству молей ТВС и РООГ до сгорания:

$$\beta_0 = \frac{M_{пр.сг.}}{M_{TBC} + M_{POOG}} = \frac{M_{TBC} + M_{POOG} + \Delta M}{M_{TBC} + M_{POOG}} = 1 + \frac{\Delta M}{M_{TBC} + M_{POOG}}, \quad (7)$$

где  $M_{ПР.СГ}$  – число молей продуктов сгорания;  $M_{ТВС}$  – число молей топливоздуш-  
душной смеси;  $M_{РООГ}$  – число молей рециркулируемых охлаждаемых отработав-  
ших газов;  $\Delta M$  – изменение числа молей рабочего тела в конце сгорания.

Считая, что в процессе сгорания отработавшие газы не вступают в химиче-  
скую реакцию, а являются лишь «аккумулятором» тепловой энергии и стабили-  
зирующим звеном в цепной реакции горения, допустим, что изменение количе-  
ства молей рециркулируемых отработавших газов не происходит. В силу этого  
число молей продуктов сгорания разобьем на две составляющие:  $M_{СГ.ч}$  – коли-  
чество молей сгоревшей топливоздушной смеси;  $M_{РООГ}$  – число молей рецир-  
кулируемых охлаждаемых отработавших газов. Тогда:  $M_{ПР.СГ} = M_{СГ.ч} + M_{РООГ}$ .

Изменение числа молей рабочего тела в конце сгорания:

$$\Delta M = M_{СГ.ч} + M_{РООГ} - M_{ТВС} - M_{РООГ} = M_{СГ.ч} - M_{ТВС} \quad (8)$$

Максимальное значение коэффициента молекулярного изменения:

для  $\alpha \geq 1$

$$\beta_{0\max} = 1 + \frac{\frac{H}{4} + \frac{O}{32} - \frac{1}{\mu_T}}{\left(\alpha \cdot L_0 + \frac{1}{\mu_T}\right) \cdot (1 + K_4)} \quad (9)$$

для  $\alpha \leq 1$

$$\beta_{0\max} = 1 + \frac{\frac{H}{4} + \frac{O}{32} + 0,21 \cdot (1 + \alpha) \cdot L_0 - \frac{1}{\mu_T}}{\left(\alpha \cdot L_0 + \frac{1}{\mu_T}\right) \cdot (1 + K_4)} \quad (10)$$

Давление рабочего тела рассчитывается пошагово по зависимости, получен-  
ной А.Н. Лавриком. Определение текущей температуры рабочего тела ведется  
параллельно с расчетом давления.

При синтезе рабочих циклов, уравнением А. Douaud и Р. Euzat оценивается  
возникновение детонационного сгорания.

По предложенной математической модели синтеза рабочего цикла бензино-  
вого двигателя разработана программа EGR. Рабочее окно программы изобра-  
жено на рис. 2.

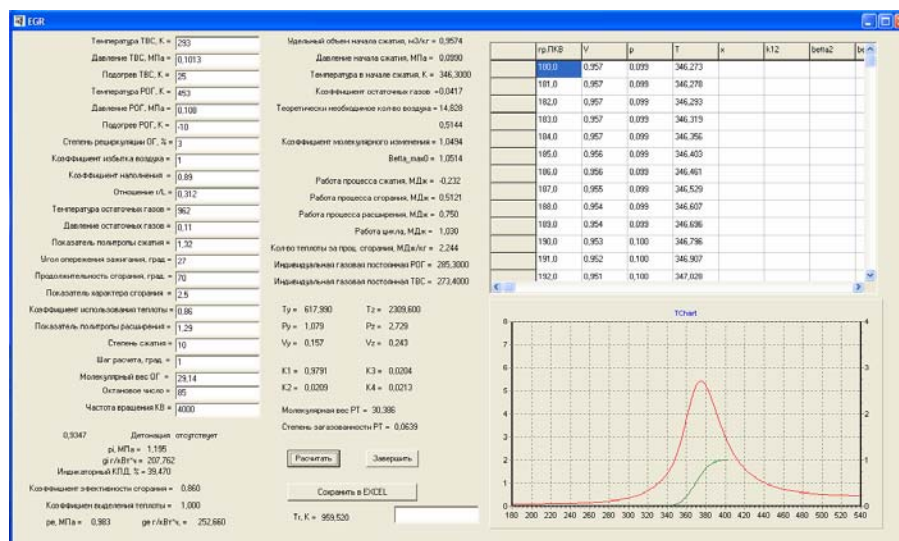


Рис. 2. Скриншот программы синтеза рабочего цикла EGR



**В третьей главе** приведены рекомендации выбора исходных данных для синтеза рабочих циклов при смешанном регулировании мощности бензинового двигателя используя программу EGR. В частности, для оценки кинетических констант процесса сгорания автором предложены зависимости:

– продолжительность процесса сгорания

$$\varphi_z = \left( 38 + \frac{3 \cdot n}{1000} + \frac{4,5}{\eta_v} + 8 \cdot \alpha^{1,2} \right) \cdot \left( 1 + \left[ 12 \cdot k_{\text{POOG}} - 36 \cdot k_{\text{POOG}}^2 \right]^3 \right) - 10 \cdot k_{\text{POOG}}^2, \quad (11)$$

– показатель характера сгорания

$$m = \frac{3,96 \cdot n + 1260}{n \cdot 1,8^{1-k_{\text{POOG}}}}. \quad (12)$$

Приведенные уравнения применимы в случае если:  $k_{\text{POOG}} = 0 \dots 20 \%$ ; момент достижения максимального давления цикла  $p_{\text{max}}$  находится в диапазоне  $15 \dots 23$  град ПКВ после верхней мертвой точки при частоте вращения коленчатого вала  $2000 \dots 3000 \text{ мин}^{-1}$ .

Для определения среднего давления механических потерь  $p_m$ , автором предложена формула:

$$p_m = 0,10565 + 0,0155 \cdot C_n + 0,5 \cdot p_{a \text{ ср.}} \quad (13)$$

где  $p_{a \text{ ср.}}$  – среднее давление газа в цилиндре двигателя за такт впуска,  $C_n$  – средняя скорость поршня.

Верификация предложенной математической модели производилась путем сопоставления результата расчетов с экспериментальными данными (рис. 3, 4, б), при этом погрешность не превышает 5 %.

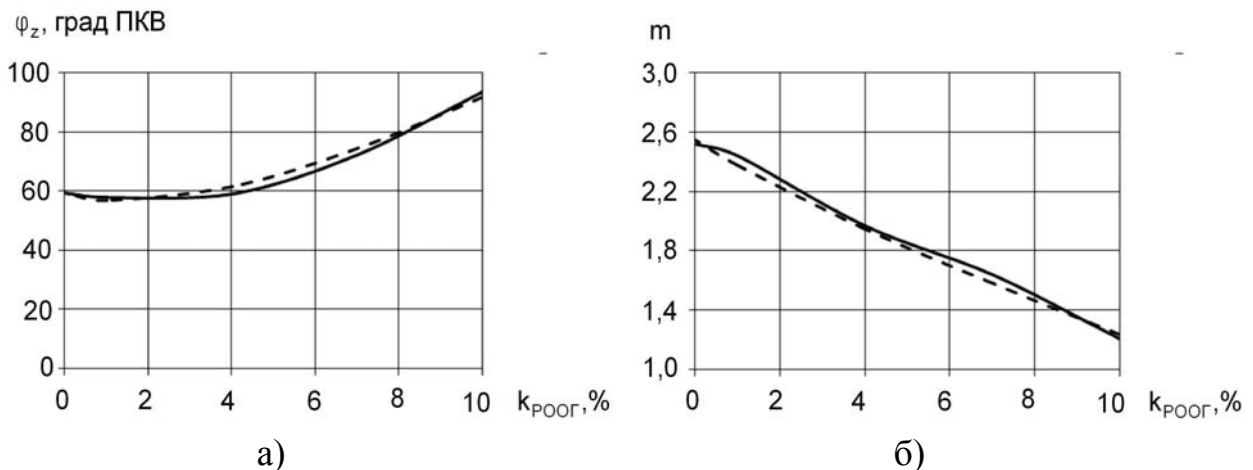


Рис. 3. Изменение продолжительности (а) и показателя характера (б) сгорания при смешанном регулировании мощности бензинового двигателя:

--- расчет; — эксперимент

Выполнено теоретическое исследование влияния различных степеней снижения дросселирования свежего заряда и корректировки угла опережения воспламенения  $\theta_s$  на основные показатели рабочего цикла при смешанном регулировании мощности бензинового двигателя (рис. 5). Изменение показателей рабочего цикла бензинового двигателя при различной степени охлаждения рециркулируемых отработавших газов приведено на рис. 7.

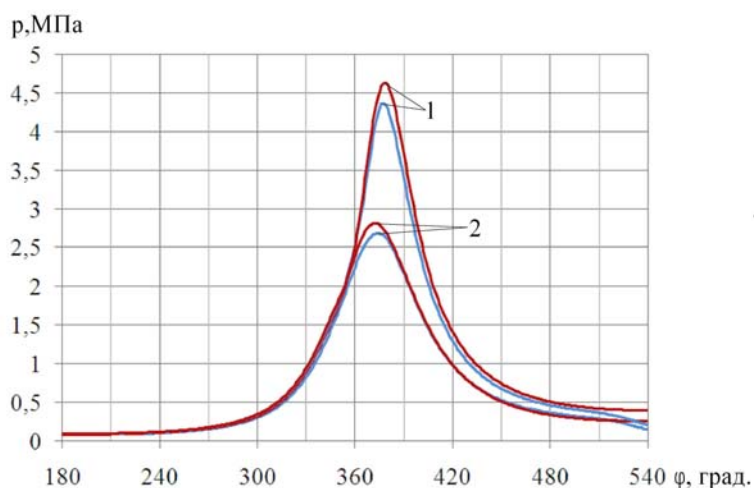


Рис. 4. Изменение давления в цилиндре при работе двигателя с РООГ — расчет, — эксперимент: 1)  $p_e = 0,67$  МПа,  $k_{РООГ} = 7\%$ ; 2)  $p_e = 0,35$  МПа,  $k_{РООГ} = 19\%$

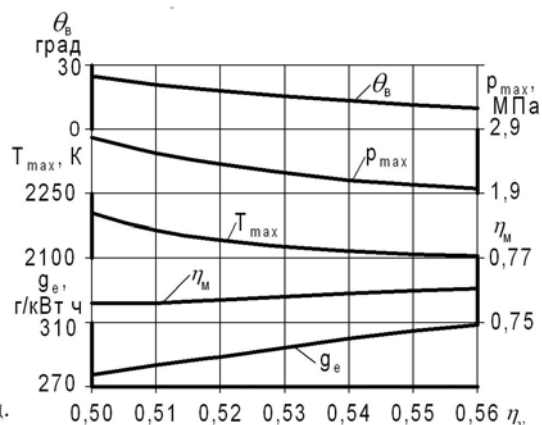


Рис. 5. Показатели рабочего цикла при различных условиях смешанного регулирования мощности бензинового двигателя ( $k_{РООГ}, p_e = \text{const}; \eta_v, \theta_B = \text{var}$ )

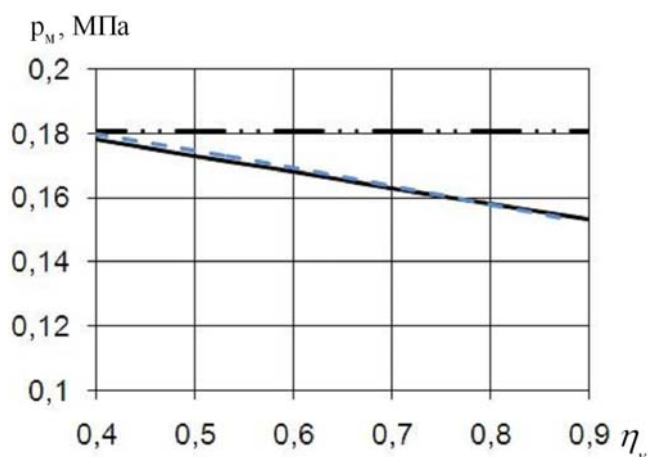


Рис. 6. Давление механических потерь при разном коэффициенте наполнения: --- без учета дросселирования свеж. заряда; --- эксперимент; — расчет по формуле (13)

Из анализа можно заключить, что охлаждение рециркулируемых отработавших газов на  $280^\circ\text{C}$  позволяет снизить удельный эффективный расход топлива и максимальную температуру рабочего тела на  $4$  г/кВт ч и  $102^\circ\text{C}$  соответственно. При смешанном регулировании достижение необходимой мощности бензинового двигателя может быть различным (рис. 5). При этом, чем больше компенсируется понижение среднего эффективного давления цикла (вследствие рециркуляции отработавших газов) углом опережения воспламенения, тем в большей степени снижается удельный эффективный расход топлива. В таких условиях повышается тепломеханическая напряженность

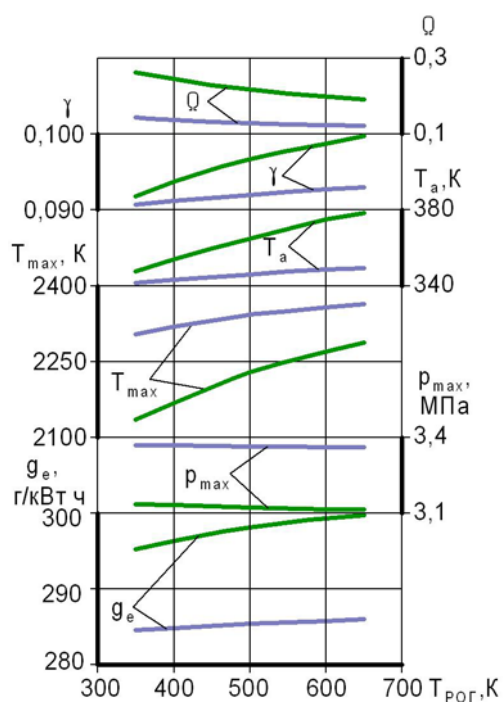


Рис. 7. Влияние охлаждения рециркулируемых отработавших газов на показатели рабочего цикла: —  $k_{РООГ} = 5\%$ ; —  $k_{РООГ} = 15\%$

деталей двигателя. Поэтому параметры смешанного регулирования мощности бензинового двигателя, такие как степени дросселирования свежего заряда и рециркуляции охлажденных отработавших газов, угол опережения воспламенения зависят от поставленных задач (достижение высокой топливной экономичности или снижение выбросов вредных веществ с отработавшими газами).

Используя теоретические исследования можно сформулировать основной принцип организации смешанного регулирования мощности бензинового двигателя: для повышения топливной экономичности при сохранении среднего эффективного давления на эксплуатационных режимах в условиях рециркуляции охлажденных отработавших газов необходимо воздействовать на рабочий цикл изменением угла опережения воспламенения и степени дросселирования свежего заряда.

**В четвертой главе** приведено описание испытательного стенда, измерительной и регистрирующей аппаратуры с приведением их характеристик. Испытуемый двигатель оборудован системой рециркуляции отработавших газов с промежуточным охлаждением и специальным электронным блоком управления (для изменения таких параметров, как угол опережения зажигания и состав смеси в режиме реального времени). Разработана методика проведения испытания, которая позволяет решить следующие задачи: определение количества отработавших газов, перепускаемых в систему впуска; проведения сравнительных испытаний бензинового двигателя при количественном и смешанном регулировании мощности с определением нагрузочных характеристик (при частоте вращения коленчатого вала 2000, 2500 и 3000 мин<sup>-1</sup>).

Смешанное регулирование мощности двигателя осуществлялось изменением степеней открытия дроссельной заслонки  $\varphi_{дз}$  и рециркуляции предварительно охлажденных отработавших газов  $k_{роог}$  с корректировкой угла опережения зажигания  $\theta$ . При этом температура  $t_{роог}$  рециркулируемых охлажденных отработавших газов в процессе эксперимента поддерживалась равной 80 °С.



Рис. 8. Общий вид испытательного стенда

**В пятой главе** приведены: результаты расчетно-экспериментального анализа смешанного регулирования мощности бензинового двигателя; разработанные

рекомендации по использованию системы рециркуляции отработавших газов с их промежуточным охлаждением.

Экспериментальные индикаторные диаграммы давления и расчетные температуры газов в цилиндре на различных режимах нагружения при количественном (КРМ) и смешанном (СРМ) регулировании мощности исследуемого двигателя изображены на рис. 9.

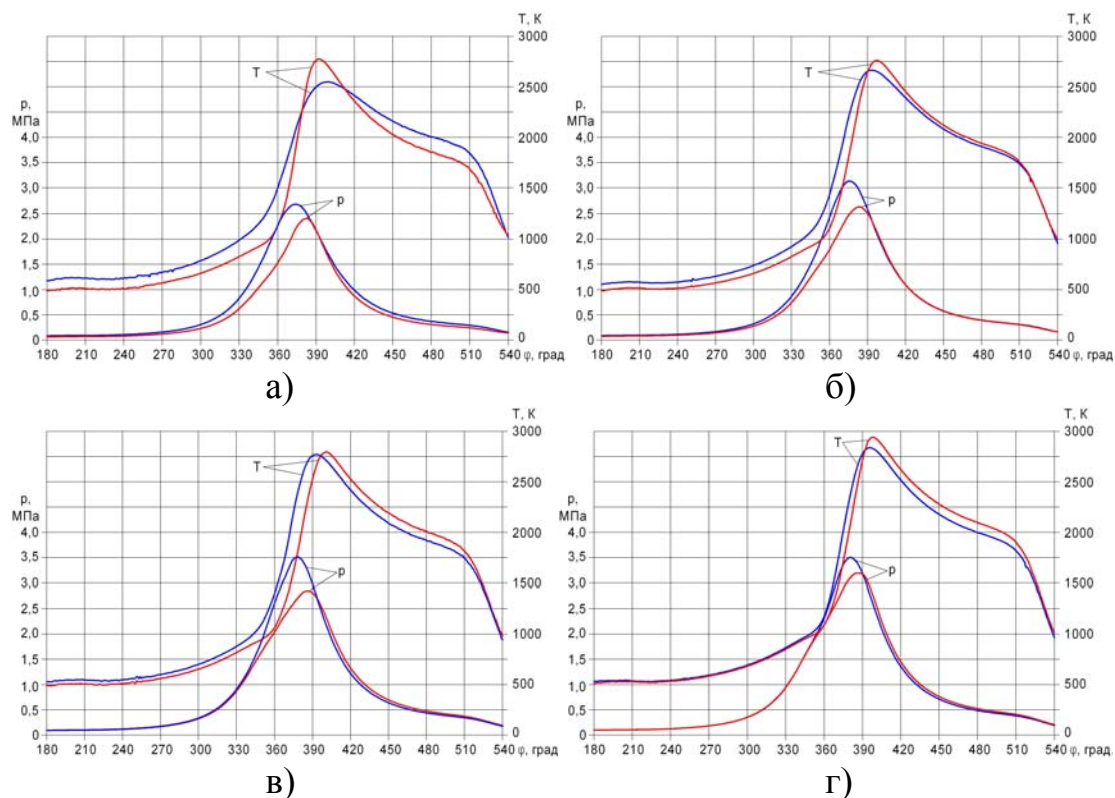


Рис. 9. Зависимость давления и температуры рабочего тела в цилиндре двигателя при работе двигателя с КРМ — и СРМ — ( $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ )  
 (а) –  $p_e = 0,35 \text{ МПа}$ ; (б) –  $p_e = 0,47 \text{ МПа}$ ; (в) –  $p_e = 0,58 \text{ МПа}$ ; (г) –  $p_e = 0,67 \text{ МПа}$

С увеличением нагрузки наблюдается рост максимальных давления и температуры газа в цилиндре двигателя. Особенно интенсивное приращение максимального давления имеет место при использовании рециркуляции отработавших газов с понижением степени дросселирования свежего заряда в диапазоне  $p_e = 0,45 \dots 0,60 \text{ МПа}$  (рис. 9, б и 9, в). Вследствие более раннего угла опережения зажигания в рабочем цикле при смешанном регулировании мощности бензинового двигателя наблюдается смещение кривой термодинамической температуры газов к ВМТ.

Интегральные  $x = f(\varphi)$  и дифференциальные  $dx/d\varphi \equiv w_o = f(\varphi)$  характеристики выгорания, а также интегральная  $x_{\text{пот}} = f(\varphi)$  характеристика тепловых потерь за процесс сгорания топлива на различных режимах нагружения двигателя приведены на рис. 10. Анализ характеристик выгорания при использовании количественного и смешанного регулирования мощности испытуемого двигателя свидетельствует о несущественном изменении продолжительности  $\varphi_z$  процесса сгорания, за исключением режимов малых нагрузок (среднее эффективное давление  $p_e = 0,35 \text{ МПа}$ ).

С падением нагрузки двигателя при РООГ, пониженной степени дросселирования свежего заряда и корректировке угла опережения воспламенения до значений среднего индикаторного давления  $p_i \approx 0,55$  МПа улучшается характер теплоиспользования. Это подтверждается тем, что работа при количественном и смешанном регулировании мощности двигателя сопровождается несущественным различием продолжительность  $\varphi_z$  сгорания, а показатель характера сгорания  $m$  при смешанном регулировании приближается к оптимальному значению  $m = 1,5$ .

Смещение максимального значения температуры газов к ВМТ (рис. 9, а, б, в) в сторону меньшей площади поверхности внутрицилиндрового пространства сопровождается снижением тепловых потерь  $x_{\text{пот}}$  в стенку за процесс сгорания (рис. 10, а, б, в).

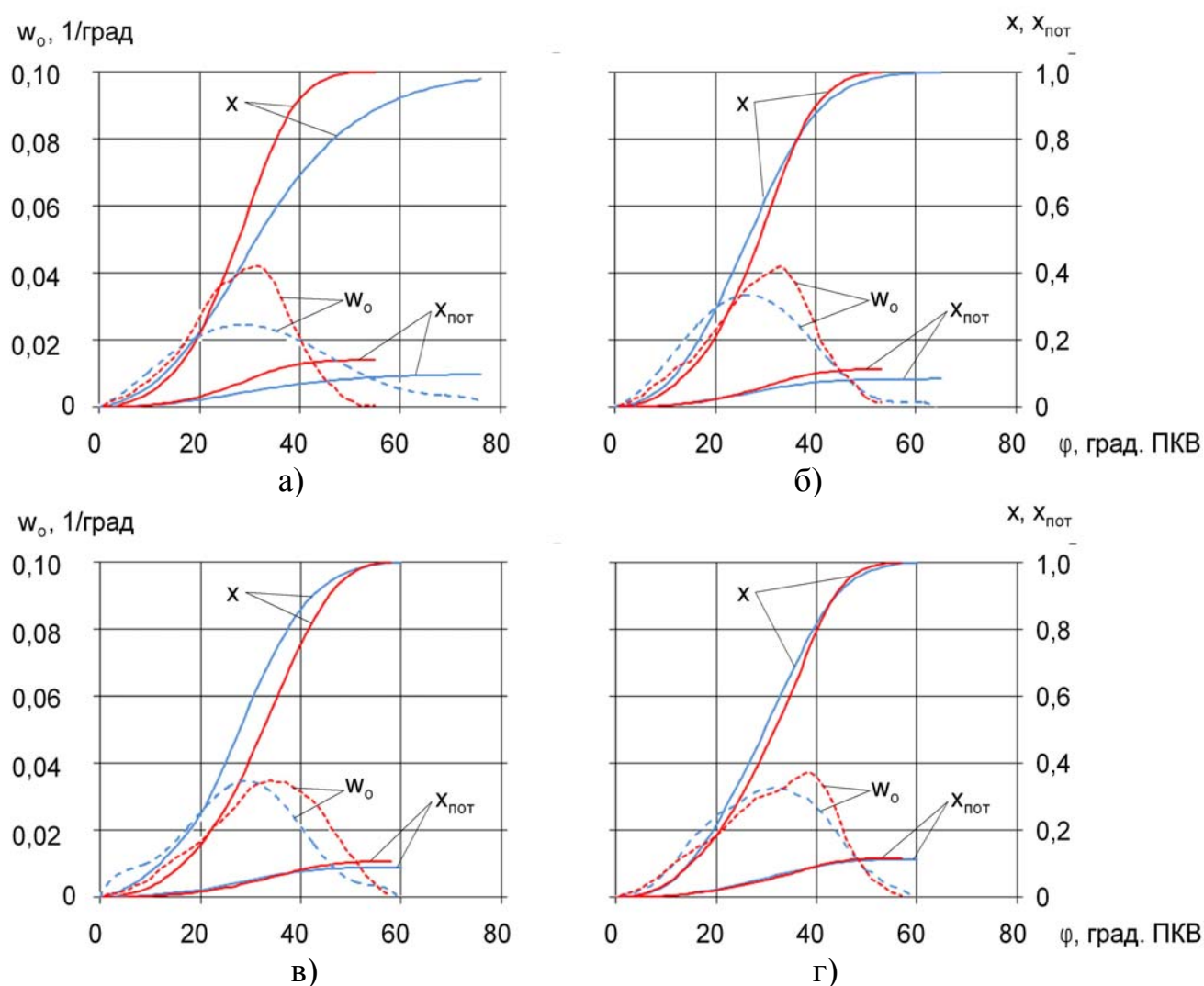


Рис. 10. Интегральные и дифференциальные характеристики выгорания топлива при работе двигателя с КРМ — и СРМ — ( $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ )  
 (а) —  $p_e = 0,35$  МПа; (б) —  $p_e = 0,47$  МПа; (в) —  $p_e = 0,58$  МПа; (г) —  $p_e = 0,67$  МПа

На рис. 11 приведены зависимости параметров процесса сгорания и основных показателей рабочего цикла и двигателя в целом при работе по нагрузочной характеристике при количественном и смешанном регулировании мощности.

Из анализа представленных данных следует, что топливная экономичность, характеризуемая удельными индикаторным  $g_i$  и эффективным  $g_e$  расходами топ-

лива, имеет наибольшие значения при нагрузках двигателя с  $p_e = 0,4 \dots 0,6$  МПа. Для нагрузок с  $p_e = 0,35 \dots 0,39$  МПа при смешанном регулировании мощности двигателя наблюдается несколько увеличенная продолжительность процесса сгорания, что является ограничивающим фактором в достижении высокой топливной экономичности.

При работе со смешанным регулированием мощности двигателя во всем исследуемом диапазоне нагрузок наблюдается повышение максимального давления цикла на 8...22%. Максимальная температура  $T_{max}$  цикла при средних нагрузках (среднее эффективное давление  $p_e \approx 0,45 \dots 0,65$  МПа) изменяется незначительно не более 1%, за исключением малых нагрузок (снижение  $T_{max}$  составляет 149 К). Снижение  $T_{max}$  объясняется большей продолжительностью процесса сгорания. Максимальная быстрота нарастания давления  $w_{p\ max}$  практически не меняется по характеристике. Несколько большие ее значения характерны для смешанного регулирования мощности двигателя вследствие увеличенных значений угла опережения зажигания  $\theta$ . Повышенные значения коэффициента эффективности сгорания  $\xi$  топлива при работе двигателя с рециркуляцией охлажденных отработавших газов можно объяснить увеличенным коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$ .

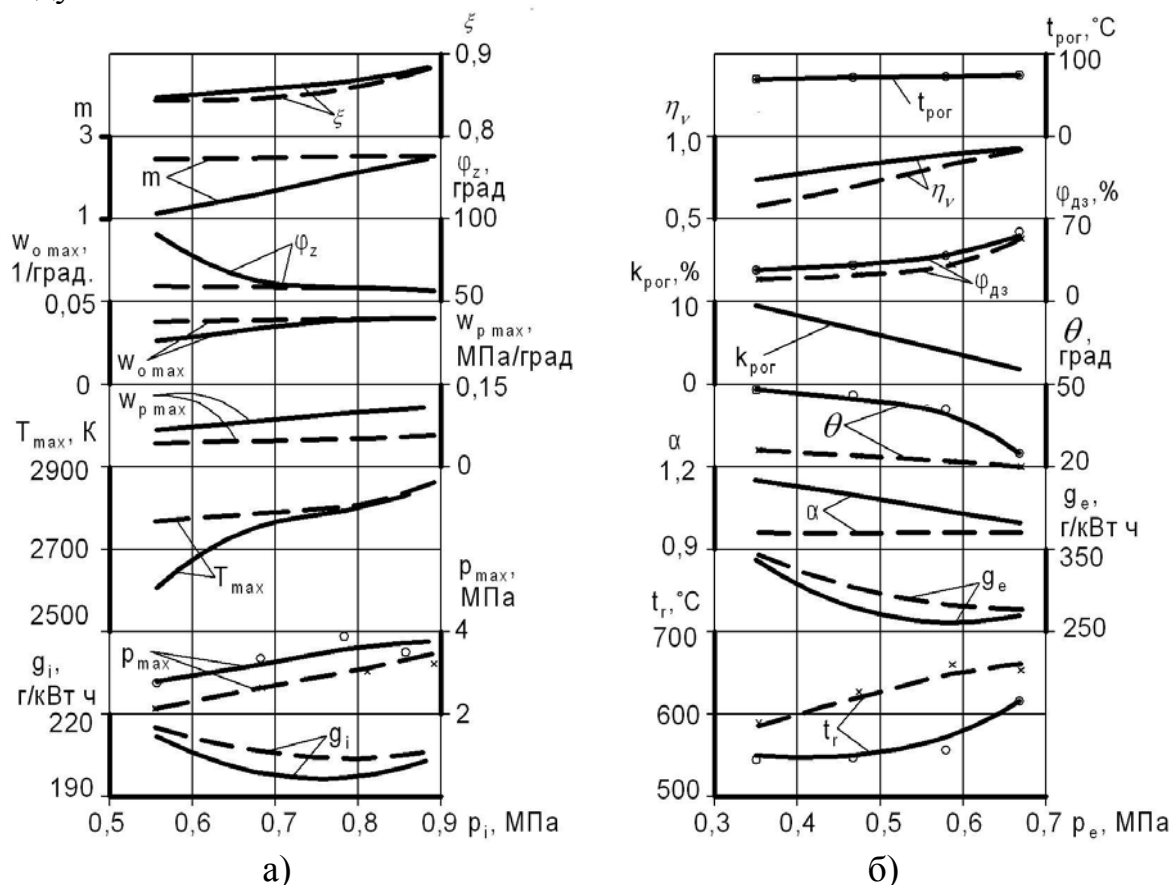


Рис. 11. Зависимость параметров процесса сгорания и показателей рабочего цикла от средних индикаторного  $p_i$  (а) и эффективного  $p_e$  (б) давлений при постоянной частоте вращения коленчатого вала  $n$  при работе двигателя с КРМ - - - и СРМ — ( $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\varphi_{дз} = \text{var}$ ,  $k_{поог} = \text{var}$ ,  $\theta = \text{var}$ )

Температура отработавших газов  $t_r$  имеет меньшие значения (от 20°C до 55°C) при работе двигателя с РООГ, пониженной степенью дросселирования

свежего заряда и корректировкой угла опережения воспламенения, что хорошо согласуется с характером изменения топливной экономичности.

При смешанном регулировании мощности бензинового двигателя дросселирование свежего заряда незначительное даже при малых нагрузках. Изменение коэффициента наполнения составляет 16% относительно его максимального значения, в то время как снижение  $\eta_v$  при количественном регулировании мощности составляет 37%.

На рис.12 приведены диаграммы изменения давления внутри цилиндра двигателя в период смены рабочего тела при количественном и смешанном регулировании мощности.

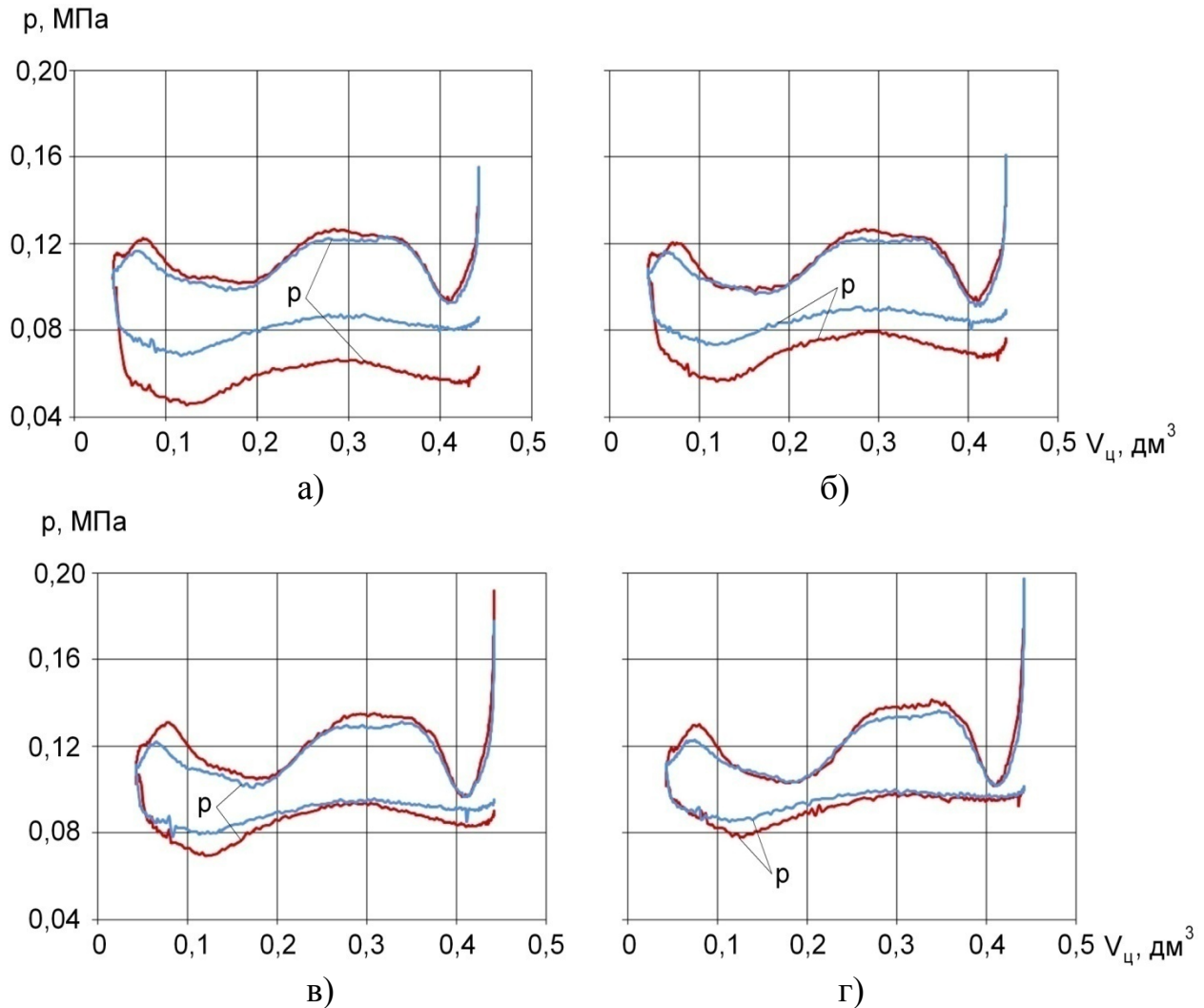


Рис. 12. Изменение давления рабочего тела на тактах впуска и выпуска при работе двигателя с КРМ — и СРМ — ( $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ )  
 (а) –  $p_e = 0,35 \text{ МПа}$ ; (б) –  $p_e = 0,47 \text{ МПа}$ ; (в) –  $p_e = 0,58 \text{ МПа}$ ; (г) –  $p_e = 0,67 \text{ МПа}$

Из анализа изменения давления газа в цилиндре на тактах выпуска и впуска (рис. 12) при различной нагрузке можно отметить, что смена рабочего тела при смешанном регулировании мощности бензинового двигателя происходит в лучших условиях. В большей степени это проявляется при нагрузке с  $p_e = 0,35 \dots 0,55 \text{ МПа}$ , что способствует снижению удельного эффективного расхода топлива при большой продолжительности сгорания.

На рис. 13 приведено техническое решение, позволяющее использовать внутреннюю энергию отработавших газов для нагрева жидкости системы охлаждения двигателя.

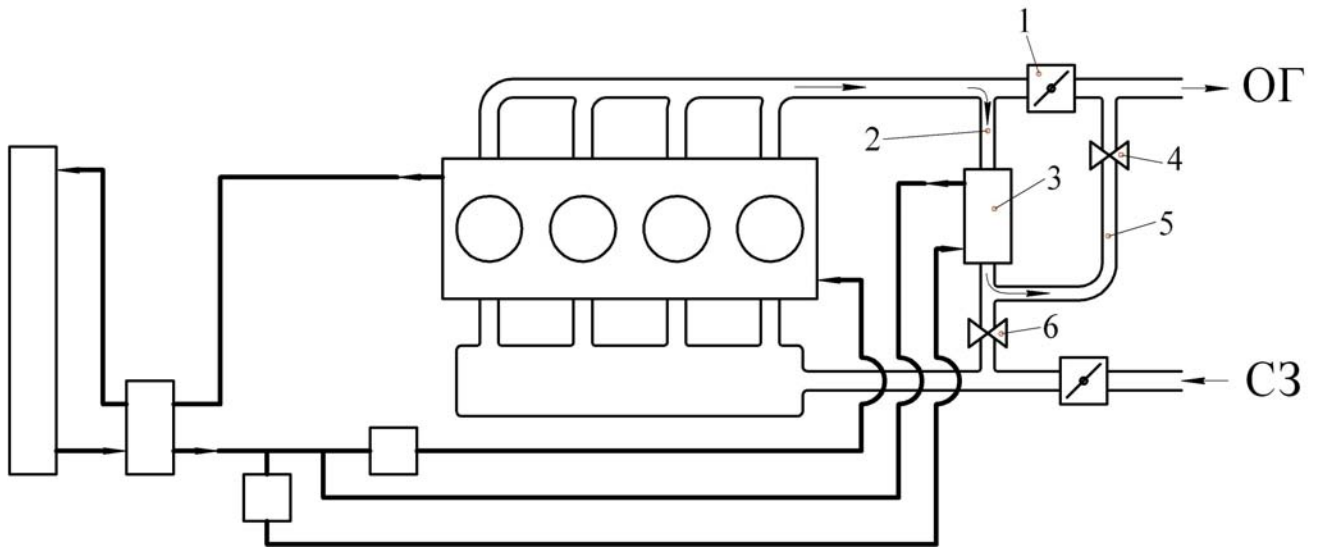


Рис. 13. Двигатель с системой рециркуляции охлаждаемых отработавших газов и использованием теплоты отработавших газов при прогреве.

При этом работа двигателя осуществляется следующим образом (один из возможных вариантов): заслонка 1 перекрывает тракт выпуска отработавших газов, направляя последние через трубку 2 в теплообменник 3 системы рециркуляции отработавших газов. При этом часть тепла отводится в охлаждающую жидкость двигателя. Далее отработавшие газы по трубке 5 через клапан 4 подаются обратно в тракт выпуска отработавших газов за заслонку 1. Клапан 6 системы рециркуляции отработавших газов закрыт, клапан 4 открыт. Нагретая охлаждающая жидкость поступает в систему охлаждения двигателя.

### Выводы

1. Разработана и реализована в программе EGR математическая модель синтеза рабочего цикла бензинового двигателя со смешанным регулированием мощности комплексным изменением степеней дросселирования свежего заряда, рециркуляции и охлаждения отработавших газов, угла опережения воспламенения топлива.

2. Установлены закономерные связи продолжительности и показателя характера процесса сгорания со степенью рециркуляции отработавших газов, коэффициентами наполнения и избытка воздуха в бензиновом двигателе.

3. Использование рециркуляции охлажденных отработавших газов при смешанном регулировании мощности бензинового двигателя для эксплуатационных режимов сопровождается повышением коэффициента наполнения за счет уменьшения степени дросселирования свежего заряда в среднем на 14 %.

4. Смешанное регулирование мощности двигателя изменением степеней дросселирования свежего заряда и рециркуляции охлажденных отработавших газов с корректировкой угла опережения воспламенения позволяет уменьшить удельный эффективный расход топлива для эксплуатационных режимов на



8...24 г/кВт·ч (3...9%) в зависимости от нагрузки при некотором повышении максимального давления газов и быстроты его нарастания.

5. Использование системы рециркуляции отработавших газов позволяет сократить время прогрева бензинового двигателя после пуска на 7...8% в зависимости от характеристик промежуточного охладителя отработавших газов.

### **Основные результаты опубликованы в следующих работах:**

#### ***Ведущие рецензируемые научные журналы и издания***

1. **Мацулевич, М.А.** Влияние рециркуляции отработавших газов на топливную экономичность бензиновых двигателей / М.А. Мацулевич, Е.А. Лазарев // Транспорт Урала. – 2012. – Вып. 3. – С.30 – 32.

2. **Мацулевич, М.А.** Математическая модель рабочего цикла бензинового двигателя с рециркуляцией отработавших газов / М.А. Мацулевич, Е.А. Лазарев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2012. – Вып. 20. – №33 (292). – С.60 – 64.

3. **Мацулевич, М.А.** Параметры процесса сгорания и показатели рабочего цикла бензинового двигателя с промежуточным охлаждением рециркулируемых отработавших газов / М.А. Мацулевич, Е.А. Лазарев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2013. – Том 13. – №1. – С.127 – 131.

#### ***Патенты***

4. Патент РФ на полезную модель RU № 122126 U1, МПК F02G5/00. Силовая установка // Е.А. Лазарев, **М.А. Мацулевич**. – 2012. – Бюл. № 32.

#### ***Материалы международных конференций***

5. **Мацулевич, М.А.** Рабочий цикл бензинового двигателя с рециркуляцией отработавших газов / М.А. Мацулевич // Материалы VI международной научно-практической конференции. – Протвино: ГНИУ ИИО РАО. – 2012. – С.439 – 443.

6. **Мацулевич, М.А.** Учет рециркуляции отработавших газов при синтезе рабочего цикла бензинового двигателя / М.А. Мацулевич // Материалы 7-ой международной заочной конференции. – Тамбов: издательство ТМБпринт. – 2012. – С.22 – 25.

7. **Мацулевич, М.А.** Повышение топливной экономичности бензинового двигателя на режимах частичных и полной нагрузок путем рециркуляции отработавших газов / М.А. Мацулевич // Материалы LI международной научно-технической конференции. – Челябинск: ЧГАА. – 2012. – Ч. IV. – С.201 – 206.

8. **Мацулевич, М.А.** Повышение топливной экономичности бензинового двигателя на частичных режимах работы рециркуляции отработавших газов / М.А. Мацулевич // Материалы LII международной научно-технической конференции. – Челябинск: ЧГАА. – 2013. – Ч. V. – С.85 – 88.