УДК 621.4

ДВС С АККУМУЛЯТИВНЫМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ РАСШИРЕНИЕМ РАБОЧЕГО ТЕЛА

Александр Фроимович Равич, к. ф-м. н.,
Вячеслав Николаевич Опрышко, профессор, к.т.н., д фил. н., ФГОУ ВПО Саратовский Гос. Аграрный ун-т им. Н.И.Вавилова
Сергей Николаевич Богданов, профессор, д.т.н., Моск. автомобильно-дорожный гос. техн. университет, (МАДИ)

Изложены результаты анализа нетрадиционного термодинамического цикла – аккумулятивного ПДВС, абстрактной модификации идеального цикла Дизеля, где процесс изобарного предварительного расширения осуществляют при постоянной плотности рабочего тела.

The results of the analysis of unconventional thermodynamic cycle accumulative ELVS, abstract modification of the ideal cycle of a Diesel engine, where the isobaric process pre-expansion is carried out at a constant density of the working fluid.

Ключевые слова: ***поршневой двигатель, изобарное расширение, плотность рабочего тела, аккумулятивный процесс, цикл Дизеля.***

Keywords: ***piston engine, isobaric expansion, the density of the working fluid, accumulative process, the Diesel cycle.***

Постановка задачи:

При всём многообразии рабочих циклов и конструкций поршневых двигателей внутреннего сгорания (далее ПДВС), реализованных до настоящего времени, неизменным остаётся способ преобразования теплоты в полезную работу в процессе рабочего хода поршня в цилиндре при закрытых клапанах, т.е. в процессе расширения замкнутого рабочего объёма. Такой традиционный способ осуществления рабочего цикла предопределяет существенное ограничение максимально возможной величины КПД и порождает проблемы, обусловленные неравномерной динамикой движения поршня и недостаточно широкой возможностью в выборе альтернативных видов топлива.

В статье изложены результаты анализа нетрадиционного термодинамического цикла, реализация которого позволила бы существенно увеличить энергоэффективность и решить обозначенные выше проблемы ПВДС.

Рассматривается абстрактная модификация известного идеального цикла Дизеля, отличающаяся от оригинала тем, что процесс изобарного **(p = const)** предварительного расширения осуществляют при постоянной плотности рабочего тела **(r = const).** Далее термодинамический процесс с **p = const** и **r = const** называется аккумулятивным, а ПДВС с аккумулятивным предварительным расширением рабочего тела - аккумулятивным ПДВС.

Отметим важную для последующего изложения особенность аккумулятивного процесса расширения: масса $\mathbf{m = r \cdot V}$ рабочего тела изменяется (аккумулируется) пропорционально объёму **V** от $\mathbf{m_1 = r \cdot V_1 = 0}$ до $\mathbf{m_2 = r \cdot V_2}$ при изменении **V** от $\mathbf{V_1 = 0}$ до $\mathbf{V_2 >> 0}$ (т.е., синхронно с процессом расширения, непрерывно осуществляется ввод извне в освобождаемое рабочее пространство соответствующего количества рабочего тела). Это принципиально отличается от динамики рабочего тела в "классических" термодинамических процессах расширения, в которых m фиксировано **(m = const)** и $\mathbf{r = m/V}$ изменяется обратно пропорционально **V** от $\mathbf{r_1 = m/V_1}$ до $\mathbf{r_2 = m / V_2 < r_1\ (V_1 < V_2)}$.

Ожидаемый эффект

Для обоснования практической значимости предмета обсуждения сравним энергоэффективность аккумулятивного процесса расширения и изобарного процесса расширения фиксированной массы рабочего тела.

В качестве универсальной оценки энергоэффективности термодинамического процесса (или цикла) здесь и далее принята удельная, на единицу массы рабочего тела, теоретическая (индикаторная) работа данного процесса (цикла).

Вычислим сравнительную оценку энергоэффективности $\Theta_{f/cz} = l_f / l_{zc}$, где

l_f - энергоэффективность процесса аккумулятивного расширения **f** :

$$(p, r):\ (p_f, r_f) \Rightarrow (p_f, r_f),\quad V: 0 \Rightarrow V_f,\quad m: 0 \Rightarrow m_f,\quad r = r_f;$$

l_{zc} - энергоэффективность процесса "классического" изобарного расширения **cz** :

$$(p, r):\ (p_c, r_c) \Rightarrow (p_c, r_z),\quad V: V_c \Rightarrow V_z,\quad m = m_z,\quad r : r_c \Rightarrow r_z.$$

Имеем (используя известные формулы работы изобарного процесса [6]):

$$l_f = p_f (V_f - 0)/m_f = p_f/r_f;$$

$$l_{zc} = p_c(V_z - V_c)/m_z = p_c(V_z/m_z)\cdot(1 - 1/\rho) = (p_c/r_z)\cdot(\rho - 1)/\rho,$$ где $\rho = V_z/V_c = r_c/r_z$ - степень предварительного расширения рабочего тела в цикле Дизеля [2,3].

Искомая *общая сравнительная оценка энергоэффективности* аккумулятивного процесса расширения:

$$Q_{f/cz} = l_f / l_{zc} = \frac{p_f/r_f}{p_c/r_z} \cdot \rho/(\rho - 1).$$

Уравняем параметры состояния рабочего тела в сравниваемых процессах, полагая:

$p_f = p_c$ и $r_f = r_z$ (кстати, последнее выполняется, в частности, при "геометрическом" уравнивании $V_f = V_z$, $m_f = m_z$). В результате, из данного выше выражения $Q_{f/cz}$ получим приведённую сравнительную оценку $Q_{f/cz} = \rho/(\rho - 1)$ и, принимая во внимание [2,3] $\rho = 1.2...1.7$, в цифрах, $Q_{f/cz} = l_a/l_{cz} = 2.4...6$.

Таким образом, *аккумулятивный процесс на порядок (в 2.4...6 раз) энергоэффективнее изобарного процесса расширения фиксированной массы рабочего тела.*

Разумеется, для того, чтобы перейти от полученной сравнительной оценки энергоэффективности аккумулятивного предварительного расширения к сравнительной оценке энергоэффективности рабочего цикла аккумулятивного ПДВС в целом, необходимо учесть энергозатраты на генерацию рабочего тела. Это и является целью представленного в статье термодинамического анализа. Главный результат - доказательство существенной конкурентоспособности аккумулятивного ПДВС по сравнению с термодинамически сопоставимым традиционным ПДВС.

Схемы реализации

1. Компаунд-схема. Реально осуществлённым прототипом проекта аккумулятивного ПДВС можно считать известную в ретроспективе (в "продвинутом" паровозостроении в первой половине прошлого века) компаунд-машину последовательного расширения пара. Принципиальное отличие проекта от прототипа состоит в том, что вместо парового котла используется последовательность *компрессор ⇒ камера сгорания постоянного давления*, генерирующая на входе в силовой агрегат стационарный рабочий газовый поток (продуктов сгорания). При этом, согласно концепции компаунд-схемы, процессы предварительного (аккумулятивного) и последующего ("классического") расширения рабочего тела осуществляются в раздельных цилиндрах.

В локальных обсуждениях возможной реализации проекта в таком виде "вырисовалась" проблема газодинамических потерь, обусловленных перетеканиями рабочего тела из цилиндров предварительного расширения в цилиндры последующего расширения. И, хотя анализ и обсуждение способов решения этой проблемы выходит за рамки данной статьи, однако, для полноты картины, следует отметить, что такая же, даже в ещё более сложном виде, проблема достаточно эффективно решена для двигателей Стирлинга [4].

2. Классическая схема. Принципиальное отличие этой схемы от вышеописанной компаунд-схемы состоит в том, что процессы предварительного и последующего расширения рабочего тела осуществляют последовательно в одном цилиндре - т.е., как в

обычном ПДВС. При этом, обозначенная выше проблема газодинамических потерь снимается "с повестки дня", однако возникает ещё не исследованная до конца проблема синхронизации процесса генерации рабочего газового потока с процессами рабочего цикла в цилиндрах силового агрегата аккумулятивного ПДВС.

3. Пульсирующий аккумулятивный ПДВС. Принципиальное отличие этой схемы от описанных выше состоит в том, что вместо камеры сгорания постоянного давления используется пульсирующая камера сгорания, которая генерирует дискретный рабочий газовый поток, аккумулирующий в процессе предварительного расширения рабочее тело с давлением не ниже давления сжатия и с плотностью, меньшей плотности сжатия в компрессоре. При этом, отдельно взятый "серийный" микропроцесс генерации дискретного заряда рабочего газового потока включает последовательно формирование рабочей смеси, сгорание рабочей смеси при постоянном объёме и термодинамическое расширение рабочего тела. Ожидаемый эффект - увеличение энергоэффективности в результате частичной рекуперации энергетических потерь в процессах сжатия и расширения [5].

Методология

Методология представленного в статье анализа термодинамики рабочего цикла аккумулятивного ПДВС исходит из общепринятой методики термодинамического анализа и расчёта обычного ПДВС [2,3] в части определения индикаторных параметров рабочего тела (давление, температура, плотность) и рабочего цикла (КПД, мощность, удельный расход топлива...) с учётом энергетических затрат на генерацию рабочего тела.

Задача определения эффективных параметров, учитывающих механические и другие энергетические потери, обусловленные конкретной конструкцией ПДВС, здесь не рассматривается.

Исследуемый теоретический аккумулятивный рабочий цикл можно изобразить в виде циклической последовательности процессов ...**⇒b⇒f⇒d⇒e⇒...** , где

b - процесс генерации рабочего тела (далее р.т.),

f - процесс предварительного аккумулятивного расширения р.т.,

d - процесс последующего адиабатного расширения (фиксированной массы) р.т.,

e - процесс выпуска отработанного р.т..

В статье рассматриваются аккумулятивные ПДВС с камерами сгорания постоянного давления (компаунд- или классическая схема реализации). В этом случае **b** = **c⇒z** , где

c - процесс адиабатного сжатия воздуха в компрессоре,

z - процесс изобарного расширения генерируемого рабочего тела в камере сгорания.

В принципе, для определения индикаторных параметров анализируемого идеального рабочего цикла выбор схемы реализации не имеет значения, т.к. достаточно задать параметры состояния рабочего цикла в начальных и конечных точках составляющих цикл процессов. Однако, с целью упрощения и большей наглядности последующего изложения, далее принята компаунд-схема реализации.

Таким образом, рассматривается аккумулятивный ПДВС с генератором непрерывного стационарного рабочего газового потока и с силовым агрегатом, включающим

- цилиндры предварительного расширения (далее **Ц1**);
- цилиндры последующего расширения (далее **Ц2**) большего рабочего объёма;
- систему газораспределительных каналов, обеспечивающих транспорт рабочего тела от камеры сгорания (далее **КС**) к **Ц1**, от **Ц1** к **Ц2** и от **Ц2** на выпуск;
- механизмы, обеспечивающие синхронизацию газораспределительных каналов и отбор мощности в процессе рабочего цикла.

Последовательность (**Ц1⇒Ц2**) образует тандем-блок.

Здесь и далее рассматривается минимальная конфигурация аккумулятивного ПДВС, включающая два работающих в противофазе тандем-блока.

Обозначения

Далее используются следующие обозначения:

p-давление (МПа), **r**-плотность (кг/м^3), **T**-температура (К),

V-объём (м^3), **G**-расход рабочего тела (за ход поршня кг, секундный кг/с);

индексы $_{a,\ c,\ z,\ f,\ d}$ обозначают, соответственно,

a - параметры состояния воздуха на впуске,

c - процесс сжатия воздуха (в компрессоре),

z - процесс подвода теплоты (в **КС**),

f - процесс предварительного расширения (в **Ц1**),

d - процесс последующего расширения (в **Ц2**).

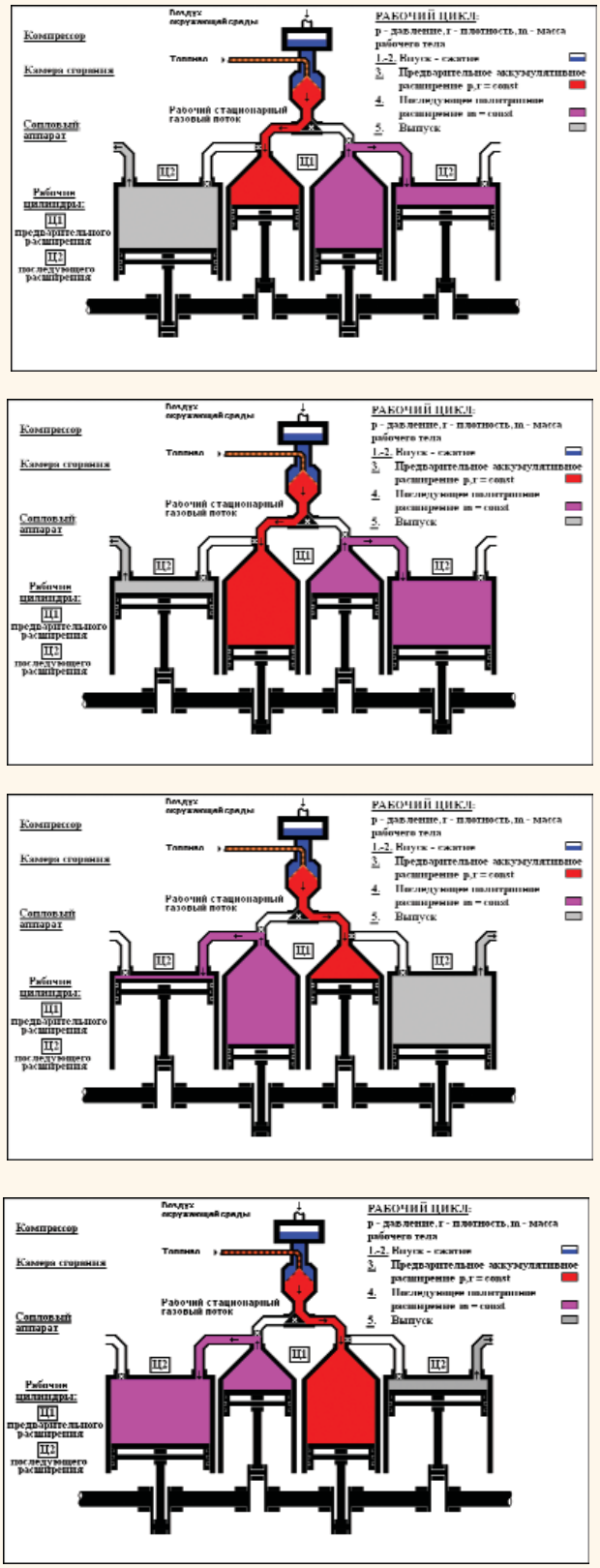

Рис. 1 Циклограмма работы двигателя

1.Термодинамика рабочих процессов

1.0. Формирование рабочего газового потока.

Последовательность (компрессор⇒**КС**) формирует рабочий стационарный газовый поток с параметрами:

давление $p_z = p_c$, плотность $r_z = (R_c / R_z)r_cT_c/T_z$, где

p_c , r_c , T_c - соответственно, давление, плотность, температура рабочей смеси (далее р.с.),

Tz - температура р.т. в конце процесса сгорания,

R_c, R_z - удельная газовая постоянная, соответственно, р.с., р.т. (МДж/(кг•К)).

При этом $T_c << T_z$, и, следовательно, $r_z << r_c$. Это обстоятельство предопределяет направление движения рабочего газового потока от камеры сгорания в рабочие цилиндры и предотвращает (в "расчётном" режиме) реверс из камеры сгорания в компрессор (помпаж).

1.1. Предварительное расширение.

В цилиндрах **Ц1** предварительного расширения осуществляется аккумулятивный процесс с параметрами рабочего тела:

плотность $r_f = r_z =$ const , давление $p_f = p_z =$ const .

Необходимое условие "аккумулятивности" **Ц1**:

$V_f = G_{zS}/r_z$, где

V_f - объём **Ц1** (м^3), G_{zS}=const - расход рабочего тела за полный ход поршня (кг).

В этом случае работа предварительного расширения в **Ц1**

$L_f = p_z V_f = (p_z/r_z) G_{zS}$ (МДж).

1.2. Последующее расширение.

В процессе последующего расширения рабочее тело воздействует на поршень в **Ц1** и

на поршень в **Ц2**. С учётом отрицательной работы расширения в **Ц1** (против движения поршня), суммарная работа политропного расширения в тандем-блоке **Ц1⇒Ц2**

$L_d = (p_fV_f - p_dV_d)/(n_d -1)$ (МДж), где

V_d - объём (м3) Ц2,

p_d - давление (МПа) рабочего тела в **Ц2** в конце расширения,

n_d - показатель политропы расширения.

1.3. Суммарная полезная работа в тандем-блоке (МДж)

$L_{fd}=L_f+L_d=p_fV_f+(p_fV_f-p_dV_d)/(n_d-1)=p_zV_f+(p_zV_f-p_dV_d)/(n_d-1)$.

2.Сравнение с обычным ПДВС

2.1. Постановка задачи.

Объекты сравнительного анализа.

Прототип (1) - обычный четырёхтактный ПДВС, работающий по смешанному термодинамическому циклу Тринклера-Сабате.

Проект (2) - предлагаемый аккумулятивный ПДВС.

Способ сравнения. Сравнение величин энергоэффективности проекта $l_{(2)}$ и прототипа $l_{(1)}$ при одинаковых условиях генерации рабочего тела.

Исходные условия.

Применительно к обозначенным выше объектам сравнительного анализа требование одинаковых условий генерации рабочего тела означает, в общем случае,

$l_{c(2)} = l_{c(1)}$ и $\Delta q_{(2)} = \Delta q_{(1)}$, где

l_c - удельная работа сжатия воздуха (МДж/кг рабочего тела),

Δq - удельное количество подведённой теплоты (МДж/кг рабочего тела).

Этому требованию удовлетворяют следующие принятые здесь исходные условия сравнительного анализа:

1)$p_{a(2)}=p_{a(1)}$, $r_{a(2)}=r_{a(1)}$, $p_{c(2)}=p_{c(1)}$, $r_{c(2)}=r_{c(1)}$, где p_a, r_a и p_c , r_c - давление, плотность воздуха, соответственно, в начале и в конце процесса сжатия;

2) одинаковый состав рабочей смеси (воздух, топливо);

3) $G_{zS(2)} = G_{zS(1)}$, $G_{z(2)} = G_{z(1)}$, где G_z , G_{zS} - расход рабочего тела, соответственно,секундный (кг/с), за ход поршня (кг).

2.2. Сравнительный анализ.

2.2.0. Удельная работа цикла (МДж/кг рабочего тела).

Удельная работа для прототипа:

$l_{(1)} = l_{zd} - l_{c(1)}$, где

l_{zd} - суммарная удельная работа расширения в рабочем цилиндре,

$l_{c(1)}$ - удельная работа сжатия воздуха в рабочем цилиндре.

Удельная работа для проекта:

$l_{(2)} = l_{fd} - l_{c(2)}$, где

l_{fd} - суммарная удельная работа в рабочих цилиндрах тандем-блока,

$l_{c(2)}$ - удельная работа сжатия воздуха в компрессоре.

При этом, так как $l_{c(2)} = l_{c(1)} = l_c$ (исходные условия, 2.1.), то сравнение величин

$l_{(1)}$ и $l_{(2)}$ сводится к сравнению величин l_{fd} и l_{zd}.

2.2.1. Удельная работа расширения в рабочих цилиндрах прототипа [2,3].

$l_{zd} = l_1 + l_2$, где

$l_1=p_{z(1)}(1/r_{z(1)}-1/r_c)=p_{z(1)}/r_{z(1)}-\lambda p_c/r_c$ - удельная работа (изобарного) предварительного расширения;

$l_2=(p_{z(1)}/r_{z(1)}-p_{d(1)}/r_{d(1)}/(n_{d(1)}-1)$ - удельная работа (политропного) последующего расширения;

p_c, r_c - соответственно, давление (МПа), плотность (кг/м^3) рабочей смеси;

$p_{z(1)}$, $r_{z(1)}$ - соответственно, давление (МПа), плотность (кг/м^3) рабочего тела в конце процесса предварительного расширения;

$\lambda=p_{z(1)}/p_c > 1$ - степень повышения давления,

$p_{d(1)}$, $r_{d(1)}$- соответственно, давление (МПа), плотность (кг/м^3) рабочего тела в конце процесса последующего расширения,

$n_{d(1)}$ - показатель политропы расширения.

Из предыдущего следует

$l_{zd} = p_{z(1)}/r_{z(1)}+p_{z(1)}/r_{z(1)}-p_{d(1)}/r_{d(1)}/(n_{d(1)}-1)-\lambda p_c/r_c$.

2.2.2. Удельная работа расширения в рабочих цилиндрах проекта.

Из 1.3. и исходных условий 2.1 следует

$l_{fd} = l_{fd}/G_{zS}=p_c/r_{z(2)}+(p_c/r_{z(2)} - p_{d(2)}/r_{d(2)}/(n_{d(2)} -1)$, где

$r_{d(2)}$ - плотность (кг/м^3) рабочего тела в конце расширения в Ц2.

2.2.3. Абсолютная сравнительная оценка $\Delta_i=l_{(2)} -l_{(1)}=l_{fd}-l_{zd}$.

Искомая оценка Δ_i далее находится из системы уравнений 2.2.1.-2. и известных уравнений процесса сгорания для смешанного способа подвода теплоты.

Для единицы массы рабочего тела (кг) эти уравнения сгорания имеют вид:

$\Delta q = \Delta u +\Delta l$ (МДж/кг рабочего тела), где

Δq - удельное количество подведённой теплоты,

$\Delta u = u_z - u_c$ - удельное количество внутренней энергии рабочего тела,

$u_z = (R_z /R)\cdot mcV[T_0,T_z]\cdot(T_z -T_0)$ (количество внутренней энергии в конце процесса),

$u_c= (R_c/R)\cdot mcV[T_0,T_c]\cdot(T_c -T_0)$ (количество внутренней энергии в начале процесса);

$\Delta l=p_z (1/r_z-1/r_c)$ - удельная работа изобарного расширения рабочего тела в процессе,

T_c, T_z - температура (К), соответственно, р.с., р.т. в конце процесса сгорания (1.0),

T_0=273.15 К, R =10^{-3}·8.3144(3) МДж/кмоль·К - универсальная газовая постоянная,

R_c , R_z - удельная газовая постоянная, соответственно, р.с., р.т. (МДж/(кг?К)),

$mcV[T_1,T_2] = (mcV(T_0, T_2)\cdot(T_2-T_0)-mcV(T_0, T_1)\cdot(T_1 -T_0))/(T_2 -T_1)$ - теплоёмкость (МДж/(кмоль•К)) р.т. в интервале температур $[T_1,T_2]$.

Для прототипа и проекта, соответственно:

$\Delta l_{(1)}= p_{z(1)}/r_{z(1)}-p_{z(1)}/r_c=p_{z(1)}/r_{z(1)}-\lambda p_c/r_c=R_z\cdot T_{z\,(1)}-\lambda R_c\cdot T_{c\,(1)}$,

$\Delta l_{(2)} = p_{z(2)}/r_{z(2)}-p_{z(2)}/r_c = p_{z(2)} /r_{z(2)}-p_c/r_c = R_z\cdot T_{z\,(2)}- R_z\cdot T_{z\,(2)}$.

При этом (из исходных условий, 2.1.)

$T_{c(1)}=T_{c(2)}=T_c$, $mcV[T_0,T_{c(1)}]=mcV[T_0,T_{c(2)}]=mcV[T_0,T_c]$, $u_{c(1)} =u_{c(2)}=u_c$

Из предыдущего и 2.2.1, 2.2.2 и адиабатности процессов расширения

$n_d =1+R/mcV[T_d,T_z]$ следует ("энергетический остаток"):

(1) $\Delta q-l_{zd} =(R_z/R)\cdot mcV[T_0,T_{d(1)}]\cdot(T_{d(1)}-T_0)-(R_c/R)\cdot mcV[T_0,T_c]\cdot(T_c-T_0)$,

(2) $\Delta q-l_{fd}=(R_z/R)\cdot mcV[T_0,T_{d(2)}]\cdot(T_{d(2)}-T_0)-(R_c/R)\cdot mcV[T_0,T_c]\cdot(T_c-T_0)-R_c\cdot T_c$.

Вычитание (1) - (2) даёт

$\Delta i=(R_z/R)\cdot mcV[T_{d(2)},T_{d(1)}]\cdot(T_{d(1)}-T_{d(2)}) + R_c\cdot Tc.$

2.2.4. Относительная сравнительная оценка $\Theta=(I_{(2)}-I_{(1)})/I_{(1)}$.

Из 2.2.1. - 2.2.3.:

$\Theta=\Delta i/I_{(1)}=((R_z/R)\cdot mcV[T_{d(2)},T_{d(1)}]\cdot(T_{d(1)}-T_{d(2)}) + R_c\cdot Tc/I_{(1)}.$

На рис. 2 представлен результат компьютерного расчёта Θ по данной формуле в виде индексированного семейства графиков $\Theta(\alpha)_{[\varepsilon]}$, где переменная α - коэффициент избытка воздуха, индекс ε - степень сжатия воздуха, для типичных значений исходных данных (p_a, T_a, λ).

В актуальной области данных ε:[8...20], α:[1.2...2.6] функции

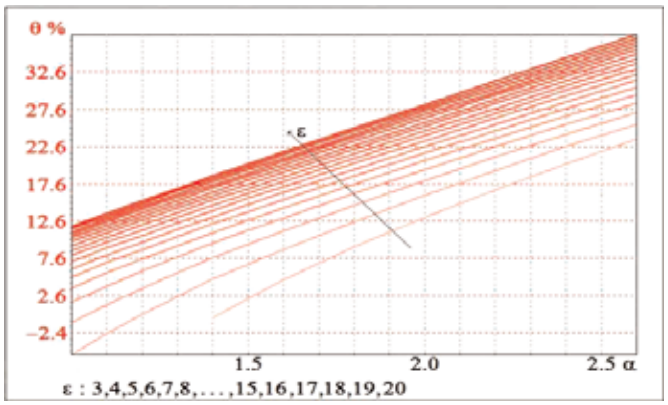

Рис. 2 Относительная сравнительная оценка $\Theta = (I_{(2)} - I_{(1)})/ I_{(1)}$

$\Theta(\alpha)_{[\varepsilon]}$ почти линейны и, с достаточной точностью , могут быть аппроксимированы линейной интерполяцией между узлами-вершинами, представленными (для данных графиков) в следующей таблице:

ε	Θ_{min} для α=1.2	Θ_{max} для α=2.6
8	7.55	29.63
20	15.32	37.62

2.2.5. КПД, мощность, удельный расход топлива.

Параметры рабочего цикла ПДВС - КПД η_i , мощность N_i , удельный расход топлива g_i являются функциями удельной работы l_i :

$\eta_i= l_i/\Delta q = (l_i / H_u)\cdot m_z$,

$N_i=l_i\cdot G_z=l_i\cdot G_т\cdot m_z$ (МВт),

$g_i=G_т/Ni=1/(li\cdot m_z)$ (кг/(МВт·с)), где

H_u - низшая теплота сгорания топлива (МДж/кг топлива),

$G_т$- секундный. расход топлива (кг/с),

$m_z = m_0\cdot\alpha +1$ - количество рабочей смеси (кг рабочей смеси/кг топлива),

m_0 - теоретически необходимое количество воздуха (кг воздуха/кг топлива).

Отсюда следуют оценки

$(\eta_{i(2)}-\eta_{i(1)})/\eta_{i(1)}= \Theta$, $(N_{i(2)}-N_{i(1)})/N_{i(1)}=\Theta$, $(g_{i(2)}-g_{i(1)})/g_{i(1)}=1/\Theta$.

2.2.6. Результаты расчёта параметров рабочего цикла аккумулятивного ПДВС.

На рис. 3-6 представлены результаты компьютерного расчёта параметров рабочего цикла аккумулятивного ПДВС в виде индексированного семейства графиков функций $f_{(\alpha)[\varepsilon]}$, где f - соответствующий параметр: N_i, η_i, g_i, p_i.

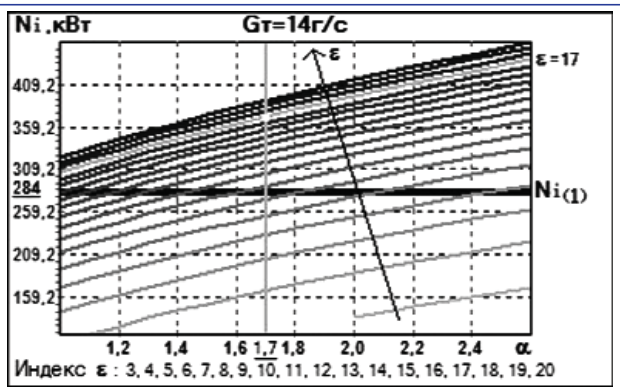

Рис. 3 f = N_i - индикаторная мощность

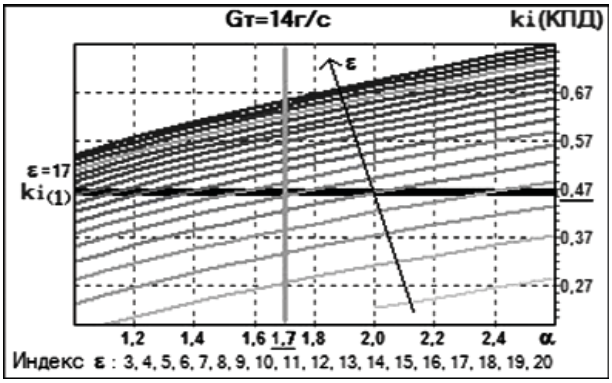

Рис. 4 f = η_i - индикаторный КПД

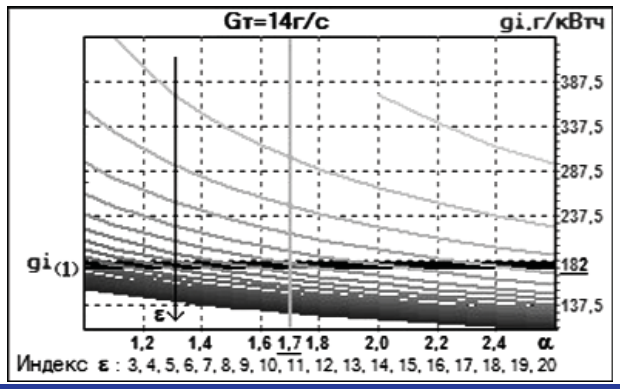

Рис. 5 f = g_i - индикаторный удельный расход топлива,

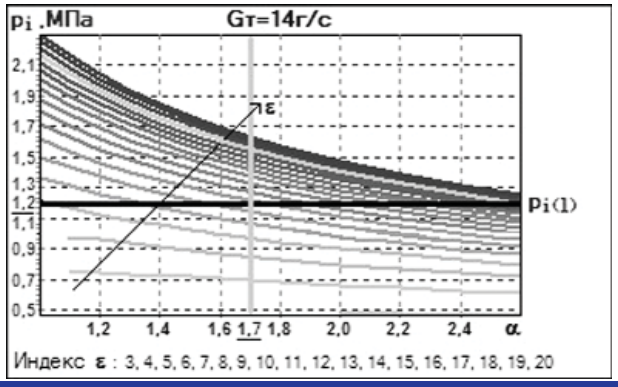

Рис. 6 f = p_i - среднее индикаторное давление.

Двигатель-прототип определён данными [3]: дизель с турбонаддувом, дизельное топливо, тактность 4, цилиндров 8,

$D=S=$ 0.12 м, $n=$ 2600 мин $^{-1}$, ε =17, α =1.7, λ =1.5, N_i =282.8 кВт, η_i= 0.47, g_i =182 г/кВтч, p_i =1.2 МПа, расход топлива $G_т$ =14 г/с.

Двигатель-проект определён условиями 3.1. и $r_{d(2)} = r_{d(1)}$.

Данные прототипа отмечены подчеркнутыми значениями на координатных шкалах и соответствующими координатными линиями "уровня".

В ниже следующей таблице сопоставлены численные значения тех же параметров для ε=17, λ=1.5, $G_т$= 14 г/с, G_z= 337.73 г/с, G_{zS}= 4.34 г за ход поршня S = 0.12 м

параметр f	прототип (1)	проект (2)	$\Delta f = f(2) - f(1)$	$\theta f = \Delta f/f(1)$ %
α	1.7	1.6	-	-
N_i, кВт	282.8	346.11	63.31	22.4
η_i	0.467	145.62	36.38	20
g_i г/кВтч	182	145.62	36.38	20
p_i, МПа	1.2	1.54	0.34	28

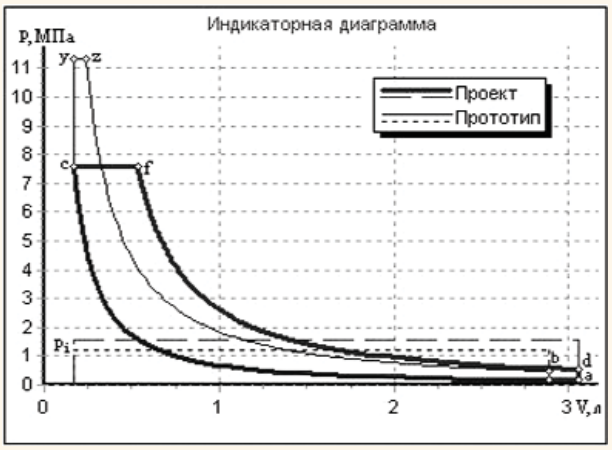

Рис. 7 Расчётные теоретические индикаторные диаграммы

2.2.7. Сравнение рабочих объёмов.

Для предлагаемого ПДВС минимальной конфигурации (2Ц1+2Ц2) сопоставимым по количеству рабочих ходов за синхронный ход поршней будет 8-цилиндровый прототип. При этом в случае одинаковых условий генерации рабочего тела, обозначенных в 2.1, суммарный рабочий объём цилиндров проекта будет существенно меньше рабочего объёма (на ≅ 44% в вышеприведенном расчётном примере) цилиндров прототипа.

2.2.8. Механические потери.

Меньшее число и меньший суммарный обьём рабочих цилиндров (2.2.7) означает меньшие механические потери в предлагаемом ПДВС по сравнению с прототипом. При этом эти потери будут ещё меньше вследствие более благоприятной динамики воздействия рабочего тела на поршни, исключающей вредные ударные нагрузки, характерные для прототипа.

ВЫВОДЫ

1. ПДВС с аккумулятивным рабочим циклом теоретически существенно (на 15-30%) превосходит обычный ПДВС, работающий по смешанному термодинамическому циклу Тринклера-Сабате, по основным индикаторным показателям - КПД, мощности и удельному расходу топлива.

2. Равномерная динамика давления рабочего тела в аккумулятивном ПДВС исключает вредные ударные нагрузки на поршни, характерные для обычного ПДВС, и уменьшает механические потери.

3. Осуществление процесса генерации рабочего тела посредством камер сгорания высокого давления вне рабочих цилиндров открывает возможность использования альтернативных видов топлива.

Литература

1.А.Ф.Равич, В.Н.Опрышко, А.С.Кутин. Способ осуществления рабочего цикла и устройство пятитактного двигателя внутреннего сгорания: патент РФ №2326250.

2.М.Г.Шатров, И.В.Алексеев, С.Н.Богданов и др. Автомобильные двигатели: Курсовое проектирование. М.: Издательский центр "Академия", 2011.

3.А.И.Колчин, В.П.Демидов. Расчёт автомобильных и тракторных двигателей. М.: Высшая школа. 2008.

4. В.А.Коваленко. Тепловая машина, реализующая термодинамический цикл Рейлиса. www.holodilshchik.ru . "Холодильщик.RU". №8(56). 08.2009.

5.А.Ф.Равич. Способ осуществления рабочего цикла и устройство пульсирующего двигателя внутреннего сгорания: патент РФ № 2455507.

6. Кудинов В.А., Карташов Э.М. Техническая термодинамика.М.:ВШ.2005.

Связь с автором: ravichaf@mail.ru

11-й МОСКОВСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ
ТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ – ОСНОВА КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ
проводится в соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 5 апреля 2014 г. № 541-р

19-21 мая 2015
Москва ВДНХ Павильон №69

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ВЫСТАВКИ
MetrolExpo
Control&Diagnostic
ResMetering
LabTest
PromAutomatic

20 мая - Всемирный день метрологии

СИМПОЗИУМ «ТОЧНОСТЬ. КАЧЕСТВО. БЕЗОПАСНОСТЬ»

ОРГАНИЗАТОР
Министерство промышленности и торговли Российской Федерации (Минпромторг России) и Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт)

СОДЕЙСТВИЕ
Аппарат Правительства Российской Федерации

МЕЖДУНАРОДНЫЕ ПАРТНЕРЫ
The International Bureau of Weight and Measures (BIPM)
International Organization of Legal Metrology (OIML)
The International Committee for Non-Destructive Testing (ICNDT)
Euro-Asian Cooperation of National Metrology Institutions (COOMET)

С ЭКСПОЗИЦИОННЫМ УЧАСТИЕМ
Минпромторг России, Минэнерго России, Минобрнауки России, МВД России, Росстандарт, Ростехнадзор, Роскосмос, ГК «Росатом», ГК «Ростехнологии», ОАО «РОСНАНО», ОАО «РЖД», Фонд «Сколково»

КОНКУРСНАЯ КОМИССИЯ
ФБУ «Ростест-Москва»

УСТРОИТЕЛЬ И ВЫСТАВОЧНЫЙ ОПЕРАТОР
Компания «Вэстстрой Экспо»

ПРОГРАММА ФОРУМА
• 11-я выставка средств измерений и метрологического обеспечения «METROLEXPO-2015»
• 4-я выставка промышленного оборудования и приборов для технической диагностики и экспертизы «CONTROL&DIAGNOSTIC-2015»
• 4-я выставка технологического и коммерческого учета энергоресурсов «RESMETERING-2015»
• 3-я выставка лабораторного, испытательного и тестового оборудования «LABTEST-2015»
• 3-я выставка КИПиА и компонентов для промышленной автоматизации «PROMAUTOMATIC-2015»
• 7-й Всероссийский симпозиум метрологов «ТОЧНОСТЬ. КАЧЕСТВО. БЕЗОПАСНОСТЬ»
• Всероссийская выставочно-конкурсная программа «ЗА ЕДИНСТВО ИЗМЕРЕНИЙ»

ДИРЕКЦИЯ ФОРУМА
129223, Москва, а/я 35. ул. Сельскохозяйственная, д. 35, стр. 182
Тел./Факс: +7 (495) 937-40-23 (многоканальный)
E-mail: metrol@expoprom.ru • www.metrol.expoprom.ru