

УДК 621.4:519.673

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА
ДВИГАТЕЛЯ МемЗ 2471 НА НОМИНАЛЬНОМ РЕЖИМЕ
С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДИЗЕЛЬ-РК**

Мурай С.В. , к.т.н.,

Данилевич Л.П., к.п.н.

Мелитопольский государственный педагогический университет

им. Б. Хмельницкого

Тел (06192) 6-91-90

E-mail: mural59@mail.ru

Квашневский А.И., главный конструктор

Олешенко О.И., начальник бюро

ХРП «АвтоЗАЗ-Мотор»

Тел. (06192) 7-44-54

Аннотация – расчет рабочего процесса двигателя внутреннего сгорания с использованием ЭВМ позволяет сократить время и затраты на разработку нового или модернизацию серийно выпускаемого двигателя внутреннего сгорания. Представлены результаты расчета рабочего процесса бензинового двигателя МемЗ 2471, полученные с помощью программного комплекса ДИЗЕЛЬ-РК, разработанного А.С. Кулешовым в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Ключевые слова – двигатель внутреннего сгорания, рабочий процесс, математическая модель, расчеты, входные данные, режимы работы, параметры.

Постановка проблемы. На автомобильном рынке Украины, как и во всем мире, существует острая конкуренция. Создание и освоение выпуска принципиально новых автомобилей связано с большими капиталовложениями, что в современных нестабильных политических и экономических условиях весьма рискованно. Модернизация существующей продукции позволяет Мелитопольскому моторному заводу выпускать бензиновые поршневые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) различной мощности для легковых автомобилей. Актуальной задачей является повышение мощности и снижение эксплуатационных расходов, уменьшение токсичности выхлопных газов этих двигателей, снижение себестоимости изготовления. Возможности дальней-

шого совершенствования выпускаемых моторов ограничены существующим технологическим оборудованием.

Анализ последних исследований. Первый в мировой литературе научный труд, посвященный теории рабочих процессов ДВС – «Тепловой расчет двигателей внутреннего сгорания», был выпущен в 1907г. профессором Императорского Московского технического училища (ныне Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана) Василием Игнатьевичем Гриневецким. Основные положения этой работы сохранили актуальность и в настоящее время.

На кафедре «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана к.т.н. доц. А.С. Кулешовым разработан программный комплекс «ДИЗЕЛЬ-РК», в котором используется широкий набор расчетных методов для моделирования происходящих в двигателе сложных физических процессов [1,2].

Целью работы является настройка программного комплекса Дизель-РК для расчета параметров рабочего процесса бензиновых двигателей, выпускаемых Мелитопольским моторным заводом.

Основная часть. Программный комплекс А.С. Кулешова принадлежит к классу термодинамических программ. Параметры газа в этих системах определяются путем пошагового решения системы разностных уравнений сохранения массы и энергии, а также уравнений состояния, записанных для открытых термодинамических систем. Метод разностных уравнений превосходит традиционные методы по точности и скорости в 5 раз. Учитывается зависимость свойств тела от состава и температуры. Теплообмен в цилиндре рассчитывается раздельно по разным поверхностям, температуры которых определяются путем решения задачи теплопроводности. Коэффициент теплоотдачи определяется по формуле Вошни.

Программный комплекс ДИЗЕЛЬ-РК позволяет проводить расчетные исследования рабочего процесса практически любых двигателей внутреннего сгорания. Использование в программе математических моделей, отражающих сущность физических процессов, происходящих в двигателе, позволяет получить высокую точность результатов численного эксперимента. Предварительная настройка программного комплекса ДИЗЕЛЬ-РК применительно к двигателям разного размера и назначения производится путем подбора используемых коэффициентов на конкретный двигатель. Достаточно использовать включенные в программу "мастера настройки", которые на основе распространенных в двигателестроении решений сформируют файл данных, пригодный для численного эксперимента.

Основные возможности программы ДИЗЕЛЬ-РК во многом аналогичны широко известным программным продуктам: BOOST (AVL), WAVE (Ricardo), GT-Power (Gamma Technologies). Однако, кроме об-

щепринятых, программа ДИЗЕЛЬ-РК имеет дополнительные, принципиально новые возможности, которые отсутствуют в других программах, ориентированных в первую очередь на моделирование газодинамических процессов в разветвленных трубопроводах. Программа ДИЗЕЛЬ-РК не позволяет исследовать неравномерность очистки и наполнения отдельных цилиндров, не рассматривает неустановившиеся процессы, как указанные выше программы. Она ориентирована на процессы смесеобразования и сгорания в цилиндре, рассматривая нестационарные течения лишь в каналах, соединяющих цилиндр с другими элементами газоздушного тракта. Допущение о том, что все цилиндры работают идентично, позволяет существенно экономить время счета. Это делает возможным ставить и решать оптимизационные исследовательские задачи.

Для расчета сгорания в ДВС с искровым воспламенением, включая форкамерные, используется многозонная модель. Скорость тепловыделения рассчитывается по методу Вибе [3].

Для расчета смесеобразования и сгорания в дизелях используется РК-модель, в основе которой лежит расчетный метод, предложенный в начале 90-х годов проф. Н.Ф.Разлейцевым [5] и в дальнейшем доработанный А.С.Кулешовым [3].

РК-модель учитывает:

- особенности характеристики впрыска, включая многофазный впрыск, мелкость распыливания топлива,
- ориентацию струй в камере сгорания,
- динамику развития топливных струй,
- взаимодействие струй с воздушным вихрем и стенками.

Эмиссия оксидов азота рассчитывается по термическому механизму на основе схемы Зельдовича. Определение состава продуктов сгорания осуществляется по 18 компонентам. Для определения температур используется зонная модель (методика проф. В.А.Звонова [6]).

Эмиссия сажи рассчитывается по методу, разработанному проф. Н.Ф.Разлейцевым [5]. Учитываются конструктивные особенности системы рециркуляции отработавших газов.

Математическая модель газообмена учитывает нестационарное течение газа в каналах, особенности конструкций двухтактных ДВС, влияние соседних цилиндров и устройство преобразователя импульсов. Это позволяет проводить расчетную оптимизацию фаз газораспределения, а также определять наилучшую конфигурацию окон двухтактных двигателей.

Параметры турбин и компрессоров учитываются разными способами:

- задаются в явном виде,
- вычисляются из условия баланса турбины и компрессора,

- определяются путем согласования характеристик турбины и компрессора.

Методика совместного расчета поршневого ДВС и агрегатов наддува на различных режимах позволяет прогнозировать скоростные, нагрузочные, высотные и другие характеристики комбинированных двигателей.

Возможен подбор агрегатов наддува для обеспечения требуемых характеристик комбинированного двигателя. Поддерживается моделирование двухступенчатых систем наддува с приводом отдельных ступеней или только с газовой связью, моделирование системы Гипербар и т.д.

Разработчики программы обеспечили доступ к ее использованию через Интернет (программа размещена на сайте МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Для осуществления расчета рабочего процесса двигателя введены исходные данные, определяющие назначение, конструктивные особенности, геометрические размеры, условия работы двигателя. С учетом экспериментальных данных по испытанию двигателя произведен подбор коэффициентов, определяющих потери на трение, при этом критериями оптимальности подбора коэффициентов является получение расхода топлива и воздуха на номинальном режиме (табл.1).

Таблица 1 - Результаты расчетов на номинальном режиме работы двигателя MeM3 2471 при частоте вращения коленчатого вала 5500 об/мин

-----МОЩНОСТНЫЕ И ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ-----

5500.0	- n	- Частота вращения коленчатого вала, [1/мин]
42.317	- Ne	- Мощность, [кВт]
8.4615	- Pe	- Среднее эффективное давление, [бар]
73.478	- Me	- Крутящий момент, [Нм]
0.02110	- qc	- Цикловая подача топлива, [г]
0.32908	- ge	- Удельный эффект, расход топлива, [кг/(кВт*ч)]
0.24862	- Eta_e	- Эффективный КПД
11.790	- Pi	- Среднее индикаторное давление, [бар]
0.34643	- Eta_i	- Индикаторный КПД
2.6132	- Pтр	- Давление трения, [бар]
0.71767	- Eta мех	- Механический КПД

-----ПАРАМЕТРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ -----

1.0000	Рo*	- Давление заторм. потока, [бар]
309.00	То*	- Температура заторможенного потока, [К]
1.0000	Рo_т	- Статическое давление за турбиной, [бар]
0.99000	Рo vx*	- Давление заторм. потока за фильтром, [бар]

----- НАДДУВ И ГАЗООБМЕН -----

0.99000	- Pк	- Давление перед впускным коллектором, [бар]
309.00	- Tк	- Температура перед впускным коллектором, [K]
0.04946	- Gair	- Расход воздуха (+EGR) через цилиндры двиг.,[кг/с]
0.0000	- КПД_тк	- КПД агрегата наддува
1.1744	- Pt*	- Среднее давление перед турбиной, [бар]
1058.9	- Tt*	- Средняя температура перед турбиной, [K]
0.05308	- Ggas	- Расход О.Г. через цилиндры двиг., [кг/с]
0.85245	- Alfa_sum	- Коэфф. избытка воздуха суммарный
-0.71554	- Pнх	- Среднее давление насосных ходов, [бар]
0.91522	- Eta_v	- Коэффициент наполнения
0.04574	- Gamma_r	- Коэффициент остаточных газов
0.99998	- Fi	- Коэффициент продувки
0.15510	- G_Забр.%	- % заброса О.Г. во впускной коллектор
0.4 6365	- G_утеч.%	- % утечек через поршневые кольца

----- ВПУСКНОЙ КОЛЛЕКТОР -----

0.95550	- Ps	- Среднее давление во впуск, коллект., [бар]
316.31	- Ts	- Средн. температ. во впуск, коллект., [K]
366.31	- Tws	- Средняя температура стенки вп. колл., [K]
94.694	- Alfa_ws	- Коэфф. теплоотдачи во вп. колл., [Вт/(м ² *K)]
291.66	- Alfa_wsc	- Коэфф. теплоотд. в клап.канале, [Вт/(м ² *K)]

----- ВЫПУСКНОЙ КОЛЛЕКТОР -----

1.0997	- Pp	- Среднее статическое давление О.Г., [бар]
1042.5	- Tг	- Средняя статическая температура О.Г., [K]
216.45	- Wr	- Средняя скорость газа, [м/с]
987.80	- Twr	- Средняя температура стенки вып. колл., [K]
618.06	- Alfa_wr	- Коэфф. теплоотдачи в вып. колл., [Вт/(м ² *K)]
1078.7	- Alfa_wcr	- Коэфф. теплоотд. в клап.канале, [Вт/(м ² *K)]

----- СГОРАНИЕ -----

0.85247	- Alfa	- Коэффициент избытка воздуха при сгорании
80.361	- Pz	- Максимальное давление цикла,[бар]
2945.3	- Tz	- Максимальная температура цикла, [K]
6.0000	- Fi_pz	- Угол максимального давления, [град, за ВМТ.]
10.000	- Fi_tz	- Угол максималн. температуры,[град, за ВМТ.]
3.4539	- dP/dFi	- Макс. скор, нарастания давл., [бар/град]
36.000	- Teta_on	- Опережение впрыска / зажигания,[град.до ВМТ]
0.27720	- Fi_Задер	- Период задержки воспламен. в цилиндре,[град]
53.000	- Fi_гореН	- Продолжительность сгорания, [град.п.к.в.]
3.1053	- m_v	- Показатель сгорания в цилиндре по Вибе
87.986	- Октан.чсл	- Мин. октановое число топлива - грань детонации

-----ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ -----

1086,1	- NO _x ,ppm	- Концентр, влажных NO _x , [1/млн, (ppm)]
5.4401	- NO,г/кВтч	- Эмиссия NO _x приведен. к NO, [г/(кВт*ч)] [Zeldovich]
0.0000	- SO ₂	- Эмиссия SO ₂ , [г/кВтч]

-----ВНУТРИЦИЛИНДРОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ -----

1.2337	- P _a	- Давление начала сжатия, [бар]
389.40	- T _a	- Температура начала сжатия, [K]
20.028	- P _c	- Давление конца сжатия, [бар]
764.12	- T _c	- Температура конца сжатия, [K]
4.8719	- P _б	- Давление начала выпуска, [бар]
1483.8	- T _б	- Температура начала выпуска, [K]

-----ПАРАМЕТРЫ ТЕПЛООБМЕНА ЦИЛИНДРА-----

1646.9	- T _{ср}	- Средняя эквивалентная температура цикла, [K]
778.07	- Alfa _w	- Ср. коэфф. теплоотд. от газа к стен,[Вт/м ² /K]
509.95	- T _{w_поршн}	- Средн. температура огневого днища поршня, [K]
413.00	- T _{w_втулк}	- Средн. температ. огневой поверхн. втулки,[K]
472.18	- T _{w_крышк}	- Средн. температ. огневой поверхн. крышки,[K]
434.67	- T _{w_охл}	- Средн. температура со стороны охлаждения крышки цилиндра, [K]
386.65	- T _{кип.}	- Температ.кипения в сист. жид. охлаждения,[K]
12235.	- Alfa _{w_охл}	- Средн. коэфф. теплоотдачи [Вт/(м ² *K)] от крышки стенки крышки цилиндра к охладж. среде
3721.4	- q _{крышки}	- Тепловой поток в крышку цилиндра, [Дж/с]
3601.7	- q _{поршня}	- Тепловой поток в поршень, [Дж/с]
2558.1	- q _{цилинд}	- Тепловой поток во втулку цилиндра, [Дж/с]

----- ПАРАМЕТРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС -----

9.5000	- Степ.сжатия	- Степень сжатия (для ПДП при обоих поршнях в ВМТ)
4 0.000	- Нач.вып	- Начало выпуска, [град, до НМТ] (ВПуск. вала)
17.000	- Кон.вып	- Конец выпуска, [град, за ВМТ] (ВПуск. вала)
12.000	- Нач.впуск	- Начало впуска, [град, до ВМТ] (ВПуск. вала)
51.000	- Кон.впуск	- Конец впуска, [град, за НМТ] (ВПуск. вала)

На рис. 1 представлена индикаторная диаграмма давления газа в цилиндре P, на рис. 2 представлено изменение температуры газа в цилиндре по углу поворота коленчатого вала φ.

В таблице 2 приведены значения мощности N_e (кВт), удельного эффективного расхода топлива G_e (кг/(кВт*ч)), коэффициента избытка воздуха Alfa на номинальном режиме при частоте вращения коленчатого вала двигателя n=1500 об/мин.

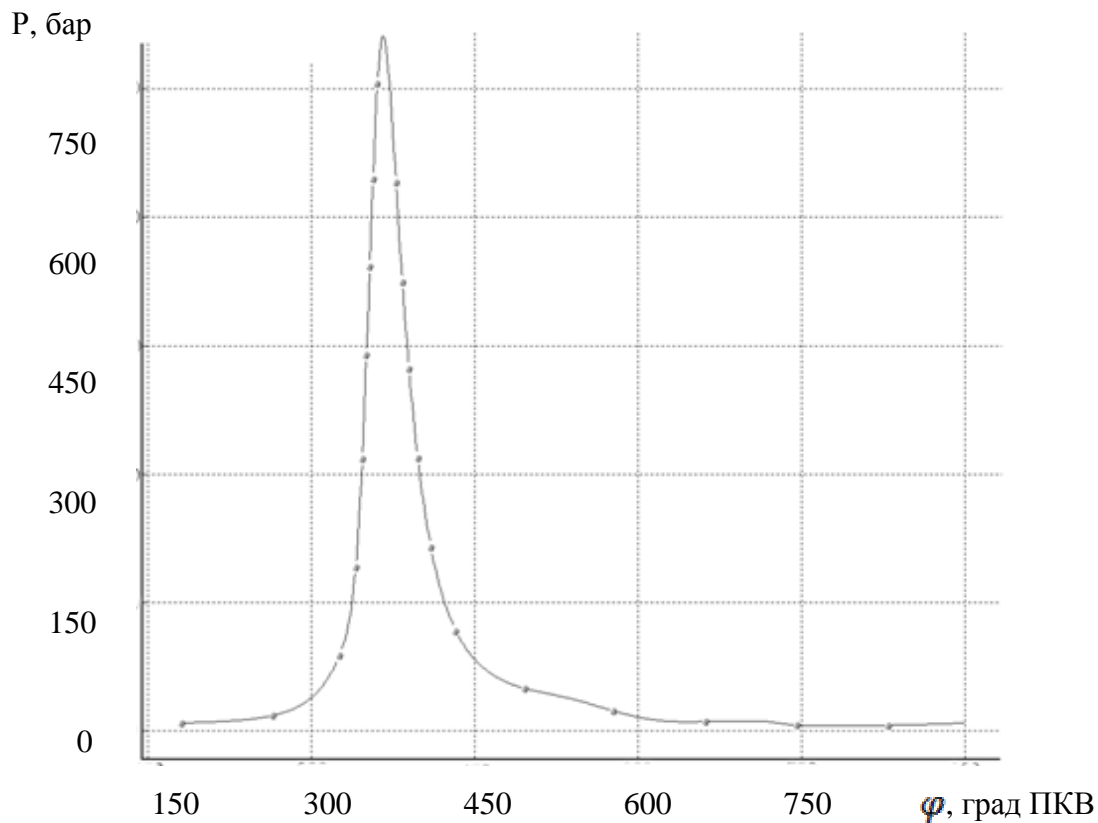


Рис. 1. Индикаторная диаграмма давления газа в цилиндре.

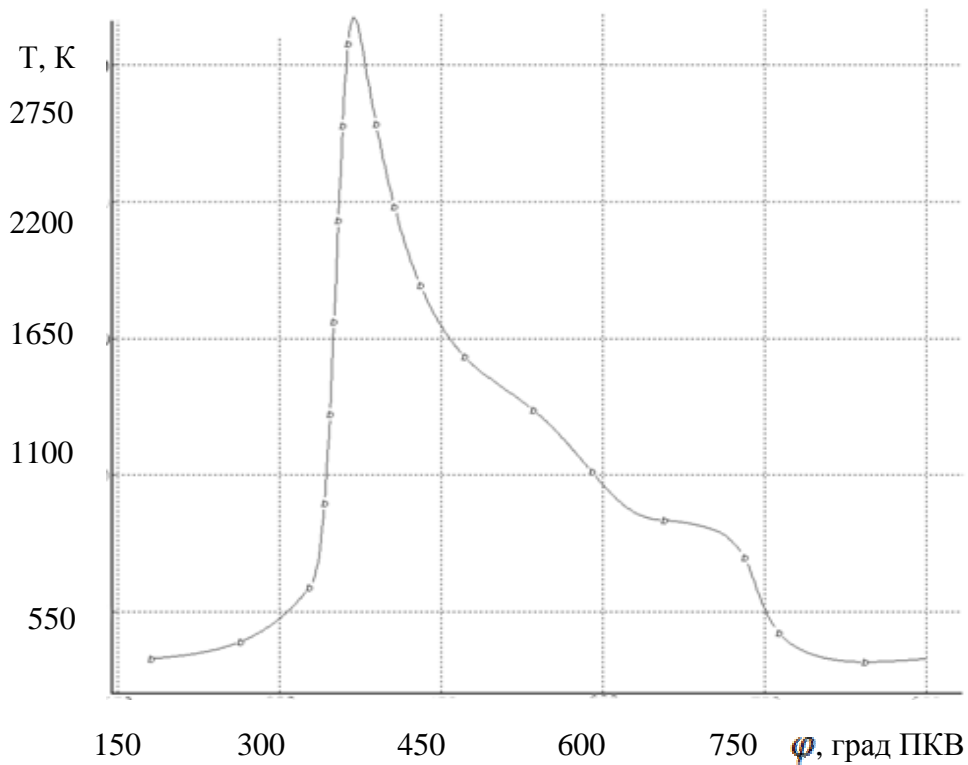


Рис. 2. Изменение температуры газа в цилиндре.

Таблица 2 - Экспериментальные и расчетные параметры

Параметр	Эксперимент	Расчет
n, (об/мин)	1500	1500
N _e (КВт)	42,30	42,32
G _e (кг/(кВт/ч))	0,330	0,329
Alfa	0,878	0,852

Сравнение представленных результатов показывает удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных.

Выводы. Проведена настройка программы ДИЗЕЛЬ-РК для расчетов параметров рабочего процесса бензиновых двигателей, выпускаемых Мелитопольским моторным заводом. Полученные результаты позволяют провести расчет теплового и напряженного состояния деталей двигателя для оценки ресурса и возможности форсирования двигателя по мощности.

Программа может быть использована в учебном процессе для изучения методов математического моделирования при подготовке специалистов по специальности поршневые двигатели внутреннего сгорания, причем расчеты могут производиться через Интернет.

Литература

1. Кулешов А.С. Многозонная модель для расчета сгорания в дизеле. Расчет распределения топлива в струе / А.С. Кулешов. - Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2007.- 18-31с.
2. Кулешов А.С. Многозонная модель для расчета сгорания в дизеле. Расчет скорости тепловыделения при многократном впрыске / А.С. Кулешов. - Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2007. - 32-45с.
3. Kuleshov A.S. Model for predicting air-fuel mixing, combustion and emissions in DI diesel engines over whole operating range, SAE Paper No 2005-01-2119, 2005.
4. Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателей / И.И. Вибе. – М.: Машгиз, 1962с.- 272 с.
5. Разлейцев Н.Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях / Н.Ф. Разлейцев. - Харьков: Вища школа, 1980. - 169 с.
6. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В.А. Звонов - М.: Машиностроение, 1981. - 160 с.

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ДВИГУНА MeMЗ 2471 НА НОМІНАЛЬНОМУ РЕЖИМІ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДІЗЕЛЬ-РК

Мурай С.В., Данилевич Л.П., Квашнівський А.І., Олешенко О.І.

Анотація – розрахунок робочого процесу двигуна внутрішнього згорання з використанням ЕОМ дозволяє скоротити час і витрати на розробку нового або модернізацію двигуна внутрішнього згорання, що серійно випускається. Представлені результати розрахунку робочого процесу бензинового двигуна MeMЗ 2471, отримані за допомогою програмного комплексу ДІЗЕЛЬ-РК, розробленого А.С. Кулешовим в МГТУ ім. Н.Е. Баумана.

THE CALCULUS OF THE WORKING TIME PARAMETERS OF ENGINE MEMZ 2471 IN THE NOMINAL MODE WITH THE HELP OF THE PROGRAMMED COMPLEX DIESEL-RK

S. Muray, L. Danilevich, A. Kvashnevskiy, O. Oleshenko

Summary

The calculus of the internal-combustion engine working time with help of the computer helps to reduce the time and costs of the new serially produced engine design or its modernization. The work represents the results of the petrol engine MeMZ 2471 working process calculus received with the help of the programmed complex DIESEL-RK engineered by A.S. Kuleshov in MSTU of N.E. Bauman.