

Министерство образования и науки Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

**РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ
И ТОКСИЧНОСТЬ
ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ СУДОВЫХ
ДИЗЕЛЬНЫХ И ГАЗОПОРШНЕВЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ**

Учебное пособие

Издание второе
переработанное и дополненное

Санкт-Петербург
2019

УДК 621.43 (075.8)

А в т о р ы:

Ю.В. Галышев, А.Б. Зайцев, А.А. Сидоров, А.Ю. Шабанов, И.А. Яксон

Рабочие процессы и токсичность отработавших газов судовых дизельных и газопоршневых двигателей : учебное пособие. Изд. второе перераб. и доп. / Ю.В. Галышев [и др.]. – СПб.: СПбПУ, 2019. – 355 с.

Учебное пособие соответствует государственному образовательному стандарту дисциплин по направлению «Энергетическое машиностроение», специализаций «Двигатели внутреннего сгорания» (бакалавры) и «Поршневые и комбинированные двигатели» (магистры), а также специальности «Эксплуатация судовых энергетических установок».

Представленный в пособии материал является составной частью лекционных курсов «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в ДВС», «Судовые ДВС», «Эксплуатация СДВС», «Методы улучшения экологических характеристик ДВС», «Предотвращение загрязнения с судов окружающей среды» и содержит сведения, необходимые для выполнения курсовых и выпускных работ специалистов, бакалавров и магистров.

Может быть использовано в учебном процессе при подготовке специалистов родственных специальностей для автомобиле- и тракторостроения, судостроительного, эксплуатационного и других направлений.

Табл. 35. Ил. 113. Библиогр.: 38 назв. Прил. 1.

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список использованных сокращений	5
Введение	6
1. Общие сведения об обосновании выбора исходных данных к расчету рабочих процессов ДВС	7
2. Моделирование индикаторного процесса поршневого двигателя на основе разомкнутой нульмерной модели цилиндра	21
2.1. Основные допущения математической модели индикаторного процесса поршневого ДВС	21
2.2. Дифференциальное уравнение индикаторной диаграммы на тактах сжатия-сгорания-расширения	23
2.3. Дифференциальное уравнение индикаторной диаграммы на тактах газообмена	28
2.4. Определение составляющих правых частей дифференциальных уравнений	34
2.4.1. Геометрические характеристики системы	34
2.4.2. Теплофизические характеристики рабочего тела	36
2.4.3. Моделирование характеристик тепловыделения	39
2.4.4. Моделирование процессов теплообмена со стенками камеры сгорания	43
2.4.5. Моделирование истечения рабочего тела через клапанные щели и неплотности кольцевого уплотнения	49
2.5. Организация процесса интегрирования	52
2.6. Расчет индикаторных и эффективных показателей цикла	54
2.7. Расчетное определение составляющих теплового баланса	56
3. Исходные данные и расчет рабочих циклов ДВС с открытой камерой сгорания	71
3.1. Подготовка исходных данных для расчета	71

3.2. Примеры расчета рабочего процесса ДВС различных типов	83
3.2.1. Быстроходный четырехтактный бензиновый двигатель	83
3.2.2. Быстроходный четырехтактный дизельный двигатель	91
3.2.3. Быстроходный четырехтактный дизель с объемно-пленочным смесеобразованием	97
3.2.4. Быстроходный четырехтактный дизель с открытой КС и двухфазной характеристикой подачи топлива	103
3.2.5. Малоразмерный двухтактный бензиновый двигатель	110
3.2.6. Малооборотный двухтактный дизельный двигатель	116
3.2.7. Малооборотный двухтактный газовый двигатель	122
3.2.8. Среднеоборотный четырехтактный газодизель	127
3.2.9. Высокофорсированный дизель с циклом Миллера	132
4. Моделирование показателей токсичности поршневых двигателей ..	139
4.1. Отработавшие газы ДВС и вредные выбросы	139
4.2. Методика расчета равновесного состава продуктов сгорания углеводородных топлив	149
4.3. Математическая модель процесса образования оксидов азота	164
4.4. Основные положения математической модели результатирующего сажевыделения в дизелях	170
4.5. Математическая модель выбросов оксидов углерода и серы	177
4.6. Модель выбросов несгоревших углеводородов	179
4.7. Примеры расчета токсичности выхлопа ДВС	185
4.7.1. Быстроходный четырехтактный бензиновый двигатель	185
4.7.2. Быстроходный четырехтактный дизельный двигатель	190
4.7.3. Малооборотный двухтактный дизельный двигатель	199
4.7.4. Малооборотный двухтактный газовый двигатель	207
4.7.5. Среднеоборотный четырехтактный газодизель	211
Библиографический список	214
Приложение	217

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АЧТ	–	абсолютно черное тело
ВВ	–	вредные выбросы
ВМТ	–	верхняя мертвая точка
ВСХ	–	внешняя скоростная характеристика
ГВК	–	газовоздушные каналы (головки цилиндра)
ГРМ	–	газораспределительный механизм
ДВС	–	двигатель внутреннего сгорания
ДТ	–	дизельное топливо
ДТВ	–	динамика тепловыделения
КС	–	камера сгорания
к.п.д.	–	коэффициент полезного действия
КШМ	–	кривошипно-шатунный механизм
НМТ	–	нижняя мертвая точка
НТД	–	нормативно-техническая документация
ОГ	–	отработавшие газы
ОЖ	–	охлаждающая жидкость
ОНВ	–	охладитель наддувочного воздуха
ОЧ	–	октановое число (бензина)
ПАУ	–	полиароматические углеводороды
ПДП	–	противоположно движущиеся поршни
п.к.в.	–	поворот коленчатого вала
СДВС	–	судовые двигатели внутреннего сгорания
СПГ	–	сжиженный природный газ
ТВС	–	топливо-воздушная смесь
ТНВД	–	топливный насос высокого давления
ТНВД	–	топливный насос высокого давления
ТЧ	–	Твердые частицы
ЦПГ	–	цилиндро-поршневая группа
ЦЧ	–	цетановое число (дизельного топлива)
ЧПС	–	чистые продукты сгорания

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее пособие предназначено для студентов, изучающих курсы «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в ДВС», «Судовые ДВС», «Эксплуатация СДВС», «Методы улучшения экологических характеристик ДВС», «Предотвращение загрязнения с судов окружающей среды», и служит для углубленного освоения теоретического материала путем самостоятельного выполнения расчетов рабочих процессов двигателей различного типа и назначения и токсичности выбросов ОГ.

Повышение мощности, топливной экономичности, моторесурса, снижение вредных выбросов являются основными направлениями развития двигателестроения. Эффективное решение этих проблем зависит от качества рабочего процесса.

Расчет рабочего процесса проводят на начальном этапе разработки проекта нового двигателя. Рабочий цикл включает в себя следующие последовательно протекающие процессы: наполнение, сжатие, сгорание топлива, расширение и выпуск. В результате расчета рабочего процесса определяются индикаторные и эффективные показатели двигателя, позволяющие судить об эффективности принятых конструктивных решений. Результаты расчета рабочего процесса необходимы для расчета на прочность механически нагруженных деталей двигателя, теплонапряженного состояния деталей, образующих камеру сгорания, расчета токсичности отработавших газов, систем наддува, смазки и охлаждения двигателя, определения работоспособности подшипников коленчатого вала.

Учебное пособие включает в себя две основные части. В первой части (главы 1-3) описана методика расчета рабочих процессов двигателей, использующих различные виды топлива. Во второй части (глава 4) представлены методики расчета параметров токсичности ОГ – выбросов оксидов азота, углерода и серы, и результирующего сажевыделения (в дизелях). Для облегчения освоения теоретического материала в пособии представлены примеры расчета рабочих процессов и токсичности ОГ ДВС.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОБОСНОВАНИИ ВЫБОРА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ К РАСЧЕТУ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ДВС

Как правило, в задании к расчету двигателя в качестве основных исходных данных обязательно указываются мощность и его назначение. Дополнительно могут быть заданы тактность, частота вращения коленчатого вала, наличие наддува, обеспечение многотопливности, особые условия работы (высокогорье, Крайний Север или Юг, пустыня Сахара и пр.), а также другие уточняющие данные.

Для проведения расчетов рабочего процесса необходимо выбрать и обосновать (по данным литературы) следующие основные параметры:

- n – частота вращения коленчатого вала, об/мин;
- p_0, p_k – давления окружающей среды и наддувочного (продувочного) воздуха перед впускными органами двигателя, МПа;
- T_0, T_k – температуры окружающей среды и наддувочного воздуха, К;
- ε – степень сжатия;
- α – коэффициент избытка воздуха при сгорании;
- m – показатель политропы сжатия в компрессоре;
- Δp_k – потери давления наддувочного воздуха в холодильнике, МПа;
- ΔT_k – снижение температуры наддувочного воздуха в холодильнике, К;
- ΔT – подогрев воздуха в процессе наполнения цилиндра, К;
- p_r – давление остаточных газов, МПа;
- γ_r – коэффициент остаточных газов;
- p_z – максимальное давление сгорания, МПа;
- η_m – механический КПД двигателя;

В зависимости от типа двигателя выбирается топливо – бензин, дизельное топливо или газ.

После выбора указанных параметров студент согласует их с преподавателем и приступает к расчету. Конкретные задания по расчету рабочих процессов могут охватывать широкий спектр двигателей различного назначения: автомобильные, тракторные, тепловозные, судовые, стационар-

ные, мотоциклетные, лодочные моторы и др. Сюда входят бензиновые двигатели и дизели, с наддувом и без наддува, двухтактные и четырехтактные. Выбранные и обоснованные параметры позволяют провести расчет цикла и определить характеризующие его параметры. К ним относятся:

- p_a, T_a – давление и температура в начале сжатия;
- η_v – коэффициент наполнения;
- n_1 – показатель политропы сжатия;
- p_c, T_c – давление и температура в конце сжатия;
- n_2 – показатель политропы расширения;
- p_z, T_z – максимальные давление и температура цикла;
- λ – степень повышения давления при сгорании;
- ρ – степень предварительного расширения;
- p_b, T_b – давление и температура в конце расширения;
- p_i – среднее индикаторное давление;
- p_e – среднее эффективное давление;
- η_i – индикаторный КПД;
- η_e – эффективный КПД;
- q_i – удельный индикаторный расход топлива;
- q_e – удельный эффективный расход топлива.

В процессе расчета рабочего процесса уточняется рабочий объем двигателя, число цилиндров и их геометрические размеры. При этом следует использовать для сравнения данные существующих двигателей аналогичного назначения (близкой размерности и частоты вращения).

Выполненный расчет позволяет построить индикаторную диаграмму в координатах $p - V$ и $p - \varphi$. Развернутая индикаторная диаграмма $p - \varphi$ позволяет оценить газовые нагрузки на детали двигателя по углу поворота коленчатого вала φ .

Пояснительная записка к расчету обычно содержит в себе обоснование выбора исходных данных, протоколы выполненных вариантов расчета рабочего процесса (с выбором окончательного варианта), построенные индикаторные диаграммы в координатах $p - V$ и $p - \varphi$, анализ результатов и выводы, а также список использованной литературы.

Условия окружающей среды

Согласно действующим стандартам [3, 4] все характеристики двигателей, поставляемых потребителям, приводятся к нормальным атмосферным условиям. Таковыми являются:

атмосферное давление – $p_0 = 100 \text{ кПа} = 0,1 \text{ МПа} = 750 \text{ мм. рт. ст.}$;

температура воздуха – $T_0 = 298 \text{ К} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$;

относительная влажность – $\varphi = 36 \%$ (давление водяного пара в воздухе $p_{\text{вп}} = 1,2 \text{ кПа} = 9 \text{ мм. рт. ст.}$).

Допустимыми параметрами считаются:

$p_0 = 101,3 \text{ кПа} = 760 \text{ мм. рт. ст.}$; $T_0 = 293 \text{ К} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi = 50 \%$.

Если проектируемый двигатель предполагается использовать в наземных и морских условиях или при небольших высотах над уровнем моря, расчет следует вести для нормальных атмосферных условий. Если предполагается узкая специализация создаваемого двигателя (высокогорные условия, условия полета, жаркий или холодный климат и т.д.), атмосферные условия могут быть приняты сообразно назначению двигателя. В этом случае рекомендуется выполнить расчет как для нормальных, так и для особых условий эксплуатации двигателя.

Степень сжатия

В ДВС вводятся понятия геометрической и действительной степени сжатия. Геометрической степенью сжатия ε_r называется отношение полного объема цилиндра $V_a = V_c + V_s$ к объему камеры сжатия V_c :

$$\varepsilon_r = \frac{V_a}{V_c} = \frac{V_c + V_s}{V_c}, \quad (1.1)$$

где V_s – рабочий объем цилиндра.

При этом предполагается, что процесс сжатия начинается в НМТ. Фактически фаза впуска в четырехтактном двигателе и процессы газообмена в двухтактном двигателе продолжаются на части хода поршня после НМТ. Поскольку на этой части хода поршня сжатие заряда не происходит, то она называется потерянной. Соответствующий ей потерянный объем

$$V_{\text{п}} = \psi V_s, \quad (1.2)$$

где ψ – доля потерянного объема (потерянного хода поршня).

Действительная степень сжатия ε учитывает уменьшение начального объема сжатия на величину потерянного объема $V_{п}$:

$$\varepsilon = \frac{V_c + (1 - \psi)V_s}{V_c}. \quad (1.3)$$

Связь между ε и ε_r устанавливается из уравнений (1.1 и (1.3):

$$\varepsilon = 1 + (1 - \psi)(\varepsilon_r - 1) \quad \text{или} \quad \varepsilon = \varepsilon_r(1 - \psi) + \psi. \quad (1.4)$$

Долю потерянного хода поршня можно получить из соотношений для кинематики кривошипно-шатунного механизма, задавшись углом φ завершения фазы газораспределения. Для центрального кривошипно-шатунного механизма получим:

$$\psi = 0,5(1 - \cos \varphi - 0,5\lambda \sin^2 \varphi), \quad (1.5)$$

где λ – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна.

При расчете рабочего процесса по излагаемой методике как четырехтактных, так и двухтактных двигателей используется значение геометрической степени сжатия, так как потеря рабочего хода в период газообмена учитывается автоматически.

В двигателях с искровым зажиганием используемое значение степени сжатия зависит от антидетонационных свойств бензина, определяемых октановым числом (ОЧ). Ориентировочная связь допустимой степени сжатия и необходимого ОЧ (исследовательский метод) топлива приведена ниже:

Степень сжатия	7,5...8,5	8,5...10,0	10,0...13,0
Октановое число	80...90	90...95	95...105

В последнее время, с целью повышения экономичности и литровой мощности, степень сжатия бензиновых двигателей постоянно растет, и на двигателях с впрыском топлива достигла значений 10,5...13,0. При этом октановые числа применяемых товарных бензинов также имеют тенденцию к росту. Следует также иметь в виду, что при использовании наддува необходимо использовать топливо с более высоким ОЧ.

В дизелях нижний предел степени сжатия определяется надежностью самовоспламенения дизельного топлива, которое впрыскивается в рабочий цилиндр в конце процесса сжатия. Для этого минимальная температура за-

ряда в конце процесса сжатия должна быть $T_c > 800 \dots 900$ К. Дополнительно степень сжатия зависит от типа смесеобразования, назначения двигателя, быстроходности, наличия наддува и других факторов. Наиболее низкие значения степени сжатия у двигателей с неразделенной камерой сгорания. У двигателей с разделенными камерами сгорания вследствие увеличения теплоотвода в стенки цилиндра и связанного с этим ухудшением пусковых свойств необходимо иметь более высокие степени сжатия. Повышенная степень сжатия используется в транспортных дизелях, работающих при низких температурах окружающей среды, и в многотопливных дизелях.

Использование наддува приводит к возрастанию максимального давления цикла p_z соответственно росту нагрузки на основные детали двигателя и увеличению механических потерь. Поэтому, для снижения p_z двигателя с наддувом имеют пониженную степень сжатия. Самое низкое значение ϵ (у дизелей с высоким наддувом) не менее 11.

По опытным данным современные дизели имеют следующие значения степени сжатия:

Двигатели автомобильные, тракторные	
с неразделенными камерами	13...17
с разделенными камерами	17...23
с наддувом	12...15
Двигатели с наддувом судовые, тепловозные, стационарные	
малооборотные	11...15
среднеоборотные	12...16
высокооборотные	15...18

Наддув двигателей

Наиболее используемым и эффективным средством повышения мощности двигателя является наддув, т.е. увеличение плотности воздуха или горючей смеси, поступающей в рабочий цилиндр. Увеличение плотности заряда при наддуве достигается его предварительным сжатием в компрессорах. В практике двигателестроения применяется механический, газотурбинный и комбинированный наддув, обеспечивающий не только увеличение мощности, но и (в двух последних вариантах) повышение экономичности. В связи с этим в настоящее время более 90 % дизелей и более 10 %

бензиновых двигателей выпускаются с наддувом. Среднее эффективное давление p_e примерно пропорционально давлению наддува p_k . По степени повышения давления ($\pi_k = p_k/p_0$) различают низкий ($\pi_k < 1,5$), средний ($\pi_k = 1,5 \dots 2,5$) и высокий ($\pi_k > 2,5$) наддув. Давление наддува, используемое на двигателе конкретного назначения, должно быть согласовано со степенью сжатия ϵ и коэффициентом избытка воздуха α .

В двухтактных двигателях давление p_k называют также давлением продувки, необходимым для качественного осуществления процессов продувки и наполнения цилиндра. Следует отметить, что существует способ «бескомпрессорного» наддува, называемый инерционным. Он дает возможность увеличить эффективную мощность до 25...30 % и применяется в основном в бензиновых двигателях. Инерционный наддув для дополнительного сжатия горючей смеси использует волновые явления при настройке системы впускные патрубки – рабочий цилиндр – выпускные патрубки. При этом экономичность аналогична экономичности двигателя без наддува, а настройка обеспечивает результат в сравнительно узком выбранном диапазоне частоты вращения.

Значения давления наддува p_k (в МПа) существующих двигателей приведены ниже:

бензиновые двигатели	0,13...0,17
судовые малооборотные дизели	0,14...0,45
тепловозные и судовые дизели, среднеоборотные	0,17...0,30
автотракторные дизели, высокооборотные	0,15...0,30

На двигателях с наддувом (преимущественно со средним и высоким) применяется промежуточное охлаждение воздуха, что позволяет дополнительно увеличить мощность (приблизительно на 1...3 % на каждые 10 градусов снижения T_k), повысить экономичность и снизить теплонапряженность деталей двигателя. При наличии охладителя наддувочного воздуха (ОНВ) следует учитывать имеющиеся в нем потери давления

$$\Delta p_k = p'_k - p_k \approx 0,002 \dots 0,005 \text{ МПа}, \quad (1.6)$$

где p'_k – давление воздуха за компрессором.

В этом случае температура наддувочного воздуха за ОНВ:

$$T_k = T_0 \left(\frac{p'_k}{p_0} \right)^{\frac{m-1}{m}} - \Delta T_k, \quad (1.7)$$

где m – показатель политропы сжатия воздуха в компрессоре, ΔT_k – уменьшение температуры при охлаждении воздуха в ОНВ.

Величина m зависит от типа компрессора и составляет:

для поршневых	1,4...1,6
для объемных ротативных	1,6...1,8
для центробежных с неохлаждаемым корпусом	1,8...2,0
для центробежных с охлаждаемым корпусом	1,4...1,8

При использовании одной ступени охлаждения $\Delta T_k = 20...60$ К. В судовых и стационарных двигателях при двухступенчатом охлаждении ΔT_k может достигать до 120 К и более. При выборе значения ΔT_k следует обратить внимание, что T_k должна превышать температуру охлаждающего агента в холодильнике, как минимум на 10...15 К.

Коэффициент избытка воздуха

В ДВС в зависимости от типа смесеобразования и режима работы действительное количество воздуха, участвующего в сгорании топлива, может быть больше теоретически необходимого, равно ему или меньше.

Отношение количества воздуха, участвующего в процессе сгорания, к теоретически необходимому для полного сгорания топлива называется коэффициентом избытка воздуха:

$$\alpha = \frac{G_b}{l_0 \cdot G_T}, \quad (1.8)$$

где G_b – масса воздуха, участвующая в сгорании G_T топлива; l_0 – теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания одного кг топлива. Для бензина $l_0 = 14,1...14,9$ кг возд./кг. топл., для дизельного топлива $l_0 = 14,3...14,8$ кг возд./кг. топл., для природного газа (метана) $l_0 = 17,2...17,3$ кг возд./кг. топл., для сжиженного газа (пропан-бутановых смесей) $l_0 = 15,5...15,7$ кг возд./кг. топл.

В двигателях с искровым зажиганием, где применяют количественное регулирование мощности, используют бедные смеси ($\alpha > 1$), стехиометрические ($\alpha \approx 1$) и богатые ($\alpha < 1$).

В бензиновых двигателях максимальная мощность достигается при работе на богатых смесях при $\alpha = 0,85 \dots 0,92$, причем карбюраторные двигатели обычно требуют большей степени обогащения. Наилучшая экономичность достигается при $\alpha = 1,05 \dots 1,25$. Поэтому для получения меньшей токсичности отработавших газов и повышенной экономичности, в бензиновых двигателях без систем нейтрализации ОГ, на частичных режимах работы используют бедные топливо-воздушные смеси. На номинальном режиме работы смесь обогащают для повышения мощности (и частичного подавления детонации), поэтому коэффициент избытка воздуха следует принимать из указанного диапазона богатых смесей. Определенным компромиссом могут служить значения α , близкие к 0,96 [6].

В бензиновых двигателях с впрыском топлива и каталитическим нейтрализатором ОГ диапазон α на частичных режимах работы значительно уже: от 0,98 до 1,01, что обеспечивает надежную и эффективную работу нейтрализатора. На режимах полной нагрузки (для которых обычно ведут расчет) смесь также обогащают ($\alpha = 0,90 \dots 0,96$).

В дизелях, где применяется качественное регулирование мощности, полное сгорание топлива обеспечивается только при значительном избытке воздуха ($\alpha > 1$). Поэтому минимальное значение $\alpha \approx 1,25$ характерно для дизелей с разделенными камерами сгорания, где улучшение смесеобразования и сгорания достигается организацией вихревого движения заряда в камере сгорания. На дизелях с наддувом, а также двухтактных, для снижения теплонапряженности на номинальном режиме используются более высокие значения α :

малооборотные	1,8...2,2
средне- и высокооборотные	1,5...2,2
с наддувом	1,7...2,2
с разделенными камерами сгорания	1,3...1,5

В газовых двигателях, благодаря относительно широким пределам воспламеняемости газо-воздушных смесей, могут быть использованы как

богатые, так и обедненные рабочие смеси. При переводе изначально бензиновых двигателей на газ используют практически те же подходы к формированию состава смеси, как и в бензиновых двигателях (т.е. обогащение на режимах ВСХ $\alpha < 1$, и обеднение на частичных режимах работы двигателя). В газовых двигателях большой размерности (зачастую изначально работавших по дизельному циклу) работа на обогащенных смесях практически исключена из-за ограничений по тепловой напряженности ЦПГ двигателя. Для них режимы ВСХ обычно реализуют при коэффициентах избытка воздуха порядка 1,3...1,5.

Топливо

В качестве топлива для двигателей в основном используется жидкие нефтепродукты с различными добавками (бензин, дизельное топливо) и горючие газы, большую часть которых составляют углеводороды. Важнейшей характеристикой топлива является его теплотворная способность, то есть количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании топлива. Теплотворная способность жидкого топлива указывается для 1 кг, а газообразного – или для 1 кг, или для 1 м³ при нормальных условиях.

При тепловом расчете двигателей используется низшая теплотворная способность топлива Q_n , исключая теплоту конденсации водяных паров в продуктах сгорания. Нефтяное топливо состоит в основном из углерода С, водорода Н, и кислорода О. Определяя содержание отдельных химических элементов в 1 кг топлива их массовыми долями, можно записать, что $C + H + O = 1$ кг. Выраженный таким образом состав называют элементарным или элементарным составом топлива.

Величина Q_n напрямую зависит от элементарного состава топлива, а при расчете можно пользоваться следующими средними значениями: бензин – 41,5...45,0 МДж/кг, дизельное топливо – 42,0...44,5 МДж/кг, природный газ метан – 48,0...51,0 МДж/кг, сжиженные газы – 45,0...47,0 МДж/кг. Указанные значения в большей степени соответствуют хорошо очищенным топливам. Для дизелей, работающих на высокосернистых топливах, в элементарном составе следует учитывать содержание серы S (при этом с повышением содержания серы теплотворная способность топлива понижается до 39,5...41,5 МДж/кг).

В бензиновых и газовых двигателях (при $\alpha < 1$) следует учитывать химическую неполноту сгорания топлива из-за недостатка кислорода в горючей смеси, то есть уменьшение Q_H на величину ΔQ_H . Последняя приближенно может быть рассчитана по формуле [5, 10]

$$\Delta Q_H = 120(1 - \alpha)M_0, \text{ МДж/кг}, \quad (1.9)$$

Следует также иметь в виду, что при производстве современных бензинов широко используются кислородсодержащие добавки (спирты и эфиры), применение которых с одновременным улучшением экологических и антидетонационных свойств бензина приводит к снижению его теплотворной способности (до 41,0...42,5 МДж/кг) и стехиометрического соотношения l_0 (до 14,1...14,5 кг возд./кг. топл.). В этом случае существенно изменяется и величина ΔQ_H (более детальный расчет этой величины приводится, к примеру, в [2]). Аналогично бензинам, применение кислородсодержащих добавок в топливе для дизелей (к примеру диметилового эфира или эфиров растительных масел – биодизеля) также приводит к некоторому снижению Q_H .

Механический КПД

Часть индикаторной мощности N_i , развиваемой в цилиндрах двигателя, расходуется в самом двигателе и не может быть использована. Эта мощность называется мощностью механических потерь N_M . Она складывается из затрат на преодоление трения в сопряженных парах деталей двигателя $N_{тр}$, совершение процессов газообмена (насосных потерь) $N_{нас}$, привод вспомогательных механизмов $N_{всп}$ и на вентиляционные потери $N_{вент}$, вызванные трением между движущимися деталями и воздухом. С учетом перечисленных выше потерь:

$$N_M = N_{тр} + N_{нас} + N_{всп} + N_{вент}. \quad (1.10)$$

Оценить степень полезного использования индикаторной мощности позволяет механический КПД:

$$\eta_M = \frac{N_e}{N_i} = \frac{N_i - N_M}{N_i} = 1 - \frac{N_M}{N_i}. \quad (1.11)$$

При замене отношения мощностей через отношения средних давлений механический КПД представляется также в виде:

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i} = \frac{P_i - P_m}{P_i} = 1 - \frac{P_m}{P_i}, \quad (1.12)$$

где p_e – среднее эффективное давление, p_i – среднее индикаторное давление, p_m – среднее давление механических потерь.

Величина механического КПД определяется режимом работы и типом двигателя. Меньшие η_m имеют двигатели без наддува и высокооборотные. Большие значения η_m имеют двигатели с наддувом, наибольшие значения – судовые малооборотные крейцкопфные двигатели с наддувом, у которых нормальное усилие перенесено с поршня на крейцкопф, работающий при использовании антифрикционных материалов в условиях гарантированного жидкостного трения. По опытным данным η_m различных двигателей, работающих на номинальном режиме, находится в пределах:

Бензиновые и газовые двигатели	0,70...0,85
Четырехтактные дизели	
без наддува	0,70...0,80
с наддувом	0,75...0,90
Двухтактные малооборотные с наддувом	0,87...0,94

Так как наибольшую долю механических потерь составляют потери на трение, то опытные зависимости p_m от средней скорости поршня c_m (м/с) приближаются к линейной: $p_m = a + b c_m$. Значения коэффициентов a и b зависят от типа, конструкции, размеров, числа цилиндров и теплового состояния двигателя [5].

Для бензиновых двигателей с числом цилиндров $i \leq 6$ и с отношением $S/D \leq 1$.

$$p_m = 0,034 + 0,0113 c_m; \quad (1.13)$$

для автотракторных дизелей с неразделенными камерами

$$p_m = 0,089 + 0,0118 c_m; \quad (1.14)$$

для дизелей с вихревыми камерами

$$p_m = 0,089 + 0,0135 c_m. \quad (1.15)$$

По приведенным формулам (после определения размера цилиндра) уточняются ранее заданное значение η_m и корректируются значения D и S .

Для одно-, двух- и трехцилиндровых двигателей из-за увеличения механических потерь, приходящихся на один цилиндр, расчетное значение η_m , полученное с использованием формул (1.13), (1.14) и (1.15) следует уменьшить на 5...6 %, 2,5...3 % и 1,5...2 % соответственно.

Максимальные температуры и давления в цикле

Значения параметров процесса сгорания для современных двигателей лежат в следующих пределах:

Двигатели	T_z , К	p_z , МПа
Бензиновые двигатели (в т.ч. переведенные на газ)	2400...3100	3,5...10,0
Дизели автотракторные с неразделенными КС	1800...2200	7,5...20,0
с разделенными КС	1700...2000	5,5...7,5
Дизели тепловозные, судовые (в т.ч. высокофорсированные)	1600...2200	6,0...25,0

Индикаторные и эффективные показатели двигателя

Индикаторные показатели для существующих двигателей при номинальной мощности лежат в следующих пределах:

Двигатели	p_i , МПа	g_i , г/кВт·ч	η_i
Бензиновые (бензогазовые)	0,8...1,6	200...260	0,30...0,40
Дизели автотракторные	0,7...2,2	170...210	0,40...0,50
Дизели судовые с наддувом	0,9...2,7	155...205	0,42...0,53
Дизели двухтактные с наддувом	0,8...1,7	150...195	0,44...0,57
Газовые	1,0...2,0	190...250	0,36...0,48

Эффективные показатели для существующих двигателей:

Двигатели	p_e , МПа	g_e , г/кВт·ч	η_e
Бензиновые (бензогазовые)	0,6...1,3	210...310	0,25...0,38
Дизели автотракторные	0,65...2,0	200...260	0,35...0,42
Дизели судовые	0,75...2,4	160...250	0,35...0,54
Газовые	0,8...1,8	200...270	0,35...0,45

Выбор основных размеров рабочего цилиндра

При заданном значении эффективной мощности N_e , выбранном значении частоты вращения n , а также при полученном в расчете значении среднего эффективного давления, определяется рабочий объем двигателя (в дм^3):

$$iV_s = \frac{60mN_e}{p_e n}, \quad (1.16)$$

где i – число цилиндров, m – коэффициент тактности (для четырехтактных двигателей $m = 2$, для двухтактных двигателей $m = 1$).

Далее в зависимости от типа и назначения двигателя необходимо выбрать число цилиндров i и отношение хода поршня к диаметру цилиндра S/D в рекомендуемых пределах.

Одноцилиндровые двигатели используются в садовой технике (мотокультиваторы и мотоблоки), в бензопилах, для привода генераторов, насосов и компрессоров, на мотоциклах и в качестве лодочных моторов. Двух- и трехцилиндровые двигатели используются на автотракторных средствах, мотоциклах, для привода генераторов и в качестве лодочных моторов. Большая часть автотракторных двигателей имеет $i = 4$, с увеличением числа цилиндров до $i = 12$. При рядном расположении цилиндров $i = 2, 3, 4, 5$ и 6 , при V – образном $i = 2, 4, 6, 8, 12$. Судовые и тепловозные дизели выпускают с $i = 4 \dots 18$, причем V – образные начиная с $i = 8$.

Размеры рабочего цилиндра, выраженные через отношение S/D , зависят от частоты вращения n и средней скорости поршня $c_m = \frac{Sn}{30}$ (м/с). Средняя скорость поршня является характеристикой динамической нагруженности и моторесурса двигателя. Поэтому при увеличении n , чтобы избежать роста c_m следует уменьшать ход поршня S . При неизменном рабочем объеме V_s уменьшение S должно сопровождаться увеличением D т.е. уменьшением S/D . Существуют и определенные ограничения, накладываемые на величину S/D , поскольку она оказывает влияние как на рабочий процесс, так и на массовые и габаритные показатели двигателя.

Для выполненных конструкций двигателей характерны следующие отношения S/D :

Бензиновые и бензогазовые двигатели	0,75...1,05
Автотракторные дизели	1,0...1,2
Четырехтактные среднеоборотные дизели	1,0...1,35
Малооборотные двухтактные крейцкопфные дизели	1,8...3,8

При выбранном значении i рабочий объем цилиндра (в литрах) из формулы (1.16):

$$V_s = \frac{60mN_e}{p_e n i}, \quad (1.17)$$

а диаметр цилиндра (в дм)

$$D = 3 \sqrt{\frac{V_s}{0,785 S/D}} \quad (1.18)$$

и соответственно $S = D \frac{S}{D}$.

Выбранные численные значения D и S , с учетом уравновешенности и равномерности хода следует округлить без уменьшения V_s , гарантируя получение заданной мощности. Значения c_m современных двигателей находятся в пределах:

Бензиновые двигатели	12...20 м/с
Дизели и газопоршневые двигатели	6...13 м/с.

По величине c_m двигатели подразделяют на тихоходные ($c_m < 10$ м/с) и быстроходные ($c_m \geq 10$ м/с). По числу оборотов двигатели подразделяют на малооборотные, с $n < 350$ об/мин;
 среднеоборотные, с $n = 350...700$ об/мин;
 повышенной оборотности, с $n = 700...1500$ об/мин;
 высокооборотные с $n > 1500$ об/мин.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДИКАТОРНОГО ПРОЦЕССА ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ РАЗОМКНУТОЙ МОДЕЛИ ЦИЛИНДРА

2.1. Основные допущения математической модели индикаторного процесса поршневого ДВС

Рабочий процесс, протекающий в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания, определяется совокупностью очень сложных физических и физико-химических процессов – газодинамических, термокинетических, термодинамических и пр. В своей основной массе эти процессы являются нестационарными, неравновесными, стохастическими, и в силу этого сложно поддающимися точному описанию.

Поэтому для получения упрощенной инженерной модели индикаторного процесса, пригодной для реализации расчета в режиме ограниченного времени и не требующего чрезмерных затрат для подготовки исходных данных, необходимо ввести определенную систему упрощений, снижающих трудоемкость решения задачи и при этом не приводящих к существенной потере точности результатов.

В настоящее время в практике моделирования рабочих процессов ДВС широкое распространение имеют термодинамические модели, построенные на основе первого начала термодинамики. Такие модели часто называют “нульмерными”, поскольку предполагают идентичность протекания процессов во всех точках пространства камеры сгорания (таким образом, процесс не имеет линейной протяженности и уподобляется процессу в точке нулевой величины). В качестве основных допущений таких моделей рабочего процесса обычно принимают:

1. Допущение о разделении всего времени рабочего цикла на два основных участка – работы термодинамической системы в условиях практически постоянной массы (такты сжатия и сгорания-расширения – условно замкнутая термодинамическая система) и переменной массы (такты газообмена – разомкнутая термодинамическая система).

Принимая данное допущение, на тактах сжатия и сгорания-расширения из рассмотрения исключаются потери массы рабочего тела из

камеры сгорания через кольцевое уплотнение поршня и неплотности прилегания клапанов к седлам. В целом, для исправного двигателя, уровень этих протечек достаточно мал: для высокооборотных двигателей он не превышает 0,1 %, для малооборотных – 1,5 % от массы заряда, что позволяет пренебречь этими протечками без существенной потери точности решения. Однако, при необходимости моделирования протечек (к примеру, для изношенной цилиндро-поршневой группы), в рамках рассматриваемой модели это несложно сделать. Поэтому данное допущение не является обязательным и в дальнейшем может быть снято.

2. Допущение о квазистационарности термодинамических параметров в цилиндре двигателя во время совершения рабочего цикла ДВС. Тем самым пренебрегают факторами сжимаемости рабочего тела и исключают влияние волновых газодинамических процессов на протекание индикаторного процесса в цилиндре ДВС.

Это допущение основывается на оценках величин чисел Струхалия (не более 0,1) и Маха (менее 0,1 за исключением короткого участка в начале такта свободного выпуска) для характерных участков рабочего цикла двигателя [6, 10].

3. Допущение о квазиравновесности термодинамических параметров в цилиндре двигателя. Тем самым принимают, что в любой момент времени, термодинамические параметры (давление и температура рабочего тела в камере сгорания) полностью выровнены по всему объему цилиндра.

Это допущение основывается на анализе скорости выравнивания поля давлений по цилиндру [7], а также на предположении о высоком уровне турбулентности воздушного заряда в камере сгорания, способствующем практически мгновенному выравниванию поля температур по всему объему (для двигателей с воспламенением от сжатия), либо в пределах термодинамических зон продуктов сгорания и свежего заряда (для двигателей с искровым зажиганием).

4. Параметры рабочего тела перед впускными и за выпускными клапанами являются постоянными во времени для установившегося режима работы двигателя. Наличием волновых явлений во впускных и выпускных системах двигателя пренебрегают, однако при выборе термодинамических параметров газа на впуске и выпуске из цилиндра их учитывают.

5. Цикловые подачи топлива по всем цилиндрам строго идентичны [1]. Это же относится и к другим параметрам топливоподачи и смесеобразования – углу опережения впрыска топлива и форме характеристики впрыска для дизеля и углу опережения зажигания для бензинового двигателя. Таким образом, в совокупности с допущением 4, это предположение определяет полную идентичность состава смеси и протекания индикаторных процессов по различным цилиндрам многоцилиндрового двигателя.

6. Истечение рабочего тела через клапанные щели впускных и выпускных клапанов является адиабатным и квазистационарным. Режим истечения в зависимости от величины перепада давления на клапане может быть как подкритическим, так и критическим [11].

7. Процесс сгорания топливовоздушной смеси в цилиндре происходит вблизи ВМТ, и к моменту открытия выпускных клапанов полностью завершается.

Сделанные допущения определяют степень достоверности и точности получаемых при моделировании результатов. Оценки, а также прямые сопоставления данных расчета и индицирования (измерения давления) цилиндров двигателя показывают, что при корректно заданных исходных данных, погрешность расчета не превышает погрешности измерения давлений в цилиндре и составляет не более 1,0 %.

2.2. Дифференциальное уравнение индикаторной диаграммы на тактах сжатия-сгорания-расширения

Основной задачей математического моделирования индикаторного процесса ДВС является установление функциональной связи между термодинамическими параметрами газа (давлением и температурой) и воздействием на рабочее тело, находящегося в цилиндре, в результате перемещения поршня, выделения и отвода теплоты, а также переменности массы самого рабочего тела (рис. 2.1). В рамках сделанных выше допущений, для описания индикаторного процесса в цилиндре ДВС можно использовать уравнения первого начала термодинамики переменной массы и состояния рабочего тела (Менделеева-Клапейрона). Первое начало термодинамики говорит о том, что подведенное к рабочему телу тепло, а также внесенное в него с

потоком массы, идет на изменение внутренней энергии системы и выполнение внешней работы:

$$dQ \pm \sum_1^n i_j dM_j = d(Mu) + pdV, \quad (2.1)$$

где dQ – элементарное количество теплоты, подведенное к рабочему телу; $i_j dM_j$ – потоки энтальпии (внесенный (+) и вынесенный (-) с элементарными массами dM_j); M – масса рабочего тела; u – удельная внутренняя энергия; p – давление в цилиндре; dV – элементарное изменение объема.

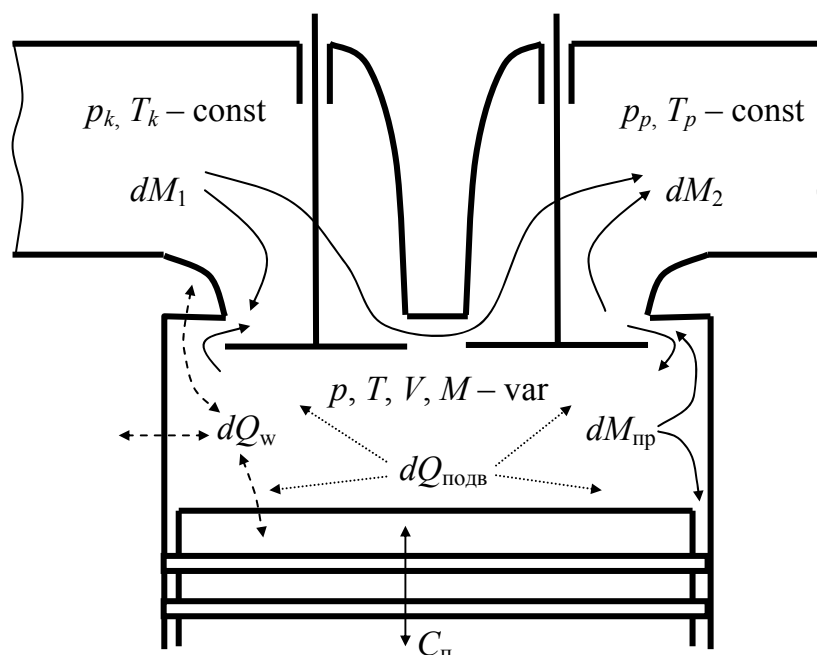


Рис. 2.1. К построению термодинамической модели цилиндра ДВС

Уравнение состояния идеального газа используется в виде:

$$pV = MRT, \quad (2.2)$$

где p , V , T , M – соответственно текущие давление, объем, температура и масса рабочего тела в цилиндре.

При выводе дифференциального уравнения для скорости изменения давления в процессе сжатия-сгорания-расширения учтем наличие протечки рабочего тела через неплотности кольцевого уплотнения камеры сгорания.

Следует также отдельно обговорить факт изменения массы рабочего тела в связи с протеканием процессов топливоподачи, смесеобразования и

выгорания топлива. В [2] подробно показано, что для горючих смесей при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$, объемная доля паров топлива в смеси не превышает 2 % для паров бензина и 1 % для паров дизельного топлива. При больших коэффициентах избытка воздуха эта доля пропорционально уменьшается. Массовая цикловая подача топлива $g_{ц}$ также достаточно мала и может быть подсчитана по выражению:

$$g_{ц} = \frac{g_{в}}{\alpha l_0}, \quad (2.3)$$

где $g_{в}$ – масса воздушного заряда в цилиндре; α – коэффициент избытка воздуха в смеси; l_0 – стехиометрическое соотношение (для бензина $l_0=14,1...14,9$ [кг возд./кг топл.], для дизельного топлива среднего состава $l_0=14,3...14,8$ [кг возд./кг топл.]).

В дизельном двигателе и в бензиновом с внутренним смесеобразованием цилиндр наполняется воздухом, а топливо подается на такте сжатия, прогревается, испаряется, перемешивается с воздухом и далее участвует в экзотермических реакциях с окислителем. Таким образом, в цилиндр попадает дополнительная масса топлива и его энтальпия. Учитывая то, что как объемная, так и массовая доля топлива в смеси относительно мала, а также то, что топливо для прогрева и испарения использует энергию рабочего тела в цилиндре, привнесенной энтальпией топлива пренебрежем, а изменение массы рабочего тела можно легко учесть в общем балансе массы газа в цилиндре, либо вообще не учитывать.

В бензиновом двигателе с внешним смесеобразованием процессы смесеобразования протекают вне цилиндра, а он наполняется уже готовой смесью, причем пары бензина вытесняют часть воздуха при наполнении цилиндра (в указанных выше пределах). Чтобы не учитывать достаточно сложные нюансы процессов смесеобразования (в том числе и предварительную диссоциацию молекул топлива), в первом приближении посчитаем, что и в этом случае цилиндр наполняется свежим воздухом, а не смесью, а топливо привносится в цилиндр лишь в процессе его сгорания.

Если в двигателе используются другие виды топлива, в частности газовое, его объемная доля в горючей смеси может быть достаточно большой [2], и это уже нельзя игнорировать при моделировании наполнения цилиндра.

С учетом изложенного уравнение [2.1] перепишем в виде:

$$dQ_{\text{подв}} - i_0 dM_{\text{пр}} = d(Mu) + pdV + dQ_w, \quad (2.4)$$

где $dQ_{\text{подв}} = g_{\text{ц}} Q_{\text{н}} dx$ – количество теплоты, выделившееся при сгорании элементарной относительной массы топлива $g_{\text{ц}} dx$; $Q_{\text{н}}$ – низшая теплотворная способность топлива; $i_0 dM_{\text{пр}}$ – энтальпия заряда, потерянная через неплотности камеры сгорания; dQ_w – элементарная доля теплоты, отданная в стенки камеры сгорания.

Считая, что удельная энтальпия протечки $i_0 = c_p T$ (подсчитывается по параметрам источника), а удельная внутренняя энергия $u = c_v T$, и полагая, что в окрестностях рассматриваемой точки по углу поворота коленчатого вала $c_p = \text{const}$ и $c_v = \text{const}$, а $M \neq \text{const}$ за счет протечки, преобразуя выражение (2.4) и деля все его составляющие на мгновенный запас внутренней энергии заряда в цилиндре $Mc_v T$, получим

$$\frac{dQ_{\text{подв}}}{Mc_v T} - \frac{c_p T dM_{\text{пр}}}{Mc_v T} = \frac{Mc_v dT}{Mc_v T} + \frac{c_v T dM}{Mc_v T} + \frac{pdV}{Mc_v T} + \frac{dQ_w}{Mc_v T}, \quad (2.5)$$

Рассмотрим величину $\frac{pdV}{Mc_v T}$. Воспользуемся характеристическим

уравнением (2.2) и выразим из него отношение $\frac{p}{MT} = \frac{R}{V}$. Тогда

$$\frac{pdV}{Mc_v T} = \frac{R}{c_v} \frac{dV}{V}. \quad (2.6)$$

По формуле Майера $R = c_p - c_v$, а $c_p/c_v = k$. В этом случае

$$\frac{R}{c_v} \frac{dV}{V} = \frac{c_p - c_v}{c_v} \frac{dV}{V} = (k - 1) \frac{dV}{V}. \quad (2.7)$$

После подстановки (2.7) в (2.5) и некоторых сокращений, получим

$$\frac{g_{\text{ц}} Q_{\text{н}} dx}{Mc_v T} - k \frac{dM_{\text{пр}}}{M} = \frac{dT}{T} + \frac{dM}{M} + (k - 1) \frac{dV}{V} + \frac{dQ_w}{Mc_v T}. \quad (2.8)$$

Возьмем далее логарифмическую производную от характеристического уравнения (2.2) в предположении постоянства газовой постоянной R , и развернем его относительно dp/p , тогда получим

$$\frac{dp}{p} = \frac{dT}{T} + \frac{dM}{M} - \frac{dV}{V}. \quad (2.9)$$

Используя замену в (2.8) согласно (2.9), деля обе части (2.8) на элементарное приращение угла поворота вала $d\varphi$ и разворачивая полученное выражение относительно $dp/d\varphi$, окончательно получим

$$\frac{dp}{d\varphi} = p \left[\frac{g_{ц} Q_{н}}{Mc_{v} T} \frac{dx}{d\varphi} - \frac{k}{M} \frac{dM_{пп}}{d\varphi} - \frac{k}{V} \frac{dV}{d\varphi} - \frac{1}{Mc_{v} T} \frac{dQ_w}{d\varphi} \right]. \quad (2.10)$$

Уравнение (2.10) – дифференциальное уравнение скорости изменения давления в цилиндре двигателя в процессе сгорания-расширения. Это уравнение учитывает основные значимые факторы, влияющие на скорость изменения давления. К ним относятся: скорость выделения теплоты при сгорании топлива, скорость потери массы заряда за счет протечек, скорость изменения объема цилиндра и скорость теплоотвода от рабочего тела в стенки камеры сгорания. При этом следует помнить, что все величины, входящие в правую часть уравнения (2.10), строго говоря, переменны (исключение составляют только теплотворная способность топлива $Q_{н}$ и значение его цикловой подачи $g_{ц}$). Если не считаться с потерей рабочего тела через неплотности камеры сгорания, то уравнение (2.10) упрощается:

$$\frac{dp}{d\varphi} = p \left[\frac{g_{ц} Q_{н}}{Mc_{v} T} \frac{dx}{d\varphi} - \frac{k}{V} \frac{dV}{d\varphi} - \frac{1}{Mc_{v} T} \frac{dQ_w}{d\varphi} \right]. \quad (2.11)$$

В большинстве случаев для технических расчетов уравнения скорости изменения давления газа в цилиндре в виде (2.11) вполне достаточно.

Дифференциальное уравнение скорости изменения давления в цилиндре двигателя в процессе сжатия также можно легко получить из (2.10) путем изъятия из него составляющей тепловыделения:

$$\frac{dp}{d\varphi} = -p \left[\frac{k}{M} \frac{dM_{пп}}{d\varphi} + \frac{k}{V} \frac{dV}{d\varphi} + \frac{1}{Mc_{v} T} \frac{dQ_w}{d\varphi} \right], \quad (2.12)$$

или, при отсутствии протечки

$$\frac{dp}{d\varphi} = -p \left[\frac{k}{V} \frac{dV}{d\varphi} + \frac{1}{Mc_v T} \frac{dQ_w}{d\varphi} \right]. \quad (2.13)$$

Таким образом, определены уравнения скорости изменения давления газа в цилиндре для всех стадий рабочего процесса с условно постоянной массой рабочего тела. В зависимости от стадии протекания процесса и задач исследования, следует пользоваться или усложненной, или упрощенной модификацией приведенных зависимостей.

2.3. Дифференциальное уравнение индикаторной диаграммы на тактах газообмена

В процессе газообмена, т.е. при открытых органах газораспределения, параметры состояния рабочего тела существенно изменяются за счет замещения отработавших газов свежим зарядом. Во время свободного выпуска масса рабочего тела быстро уменьшается, падает давление и, как следствие, температура. То же самое наблюдается при наполнении цилиндра свежим зарядом. Особое место занимает продувка цилиндра. В этой фазе рабочего цикла отработавшие газы покидают цилиндр не только за счет вытеснения его свежим зарядом, но и за счет эжекции в воздушный поток, идущий транзитом от впускных органов к выпускным. В то же время, при определенных обстоятельствах, возможен заброс ОГ во впускную систему. В рамках рассматриваемой термодинамической модели эти процессы моделировать наиболее сложно и, тем не менее, необходимо, поскольку именно продувка определяет показатели качества процесса газообмена.

Таким образом, отличительной особенностью процесса газообмена является протекание его при переменной массе рабочего тела. При этом газ не имеет термического равновесия со стенками цилиндра и продолжает выполнять механическую работу, в том числе отрицательную.

Моделирование рабочего процесса на тактах газообмена строится на том же принципе, что и на тактах сжатия-расширения, т.е. на базе интегрирования дифференциального уравнения первого закона термодинамики для

открытой системы, записанного при тех же допущениях, что и уравнение (2.1). Будем считать, что процессы сгорания топлива завершены, а поскольку больших давлений в цилиндре уже нет и органы газораспределения открыты, с протечками через кольцевое уплотнение считаться не будем, тогда первое начало термодинамики примет вид:

$$\pm i_1 dM_1 \pm i_2 dM_2 = d(Mu) + pdV + dQ_w, \quad (2.14)$$

где: $i_1 dM_1$, $i_2 dM_2$ – поток энтальпии втекающего (вытекающего) газа через впускные и выпускные органы соответственно (см. рис. 2.1); $d(Mu)$ – изменение внутренней энергии газа; pdV – механическая работа; dQ_w – слагаемое, учитывающее теплообмен со стенками КС.

Обязательным дополнительным условием к (2.14) является выполнение закона сохранения массы:

$$\pm dM_1 \pm dM_2 = dM. \quad (2.15)$$

Далее проводятся преобразования, полностью аналогичные выполненным в параграфе 3.2, т.е. определяется выражение для скорости изменения давления в цилиндре:

$$\frac{dp}{d\varphi} = p \left[\pm \frac{c_{p1} T_1}{Mc_v T} \frac{dM_1}{d\varphi} \pm \frac{c_{p2} T_2}{Mc_v T} \frac{dM_2}{d\varphi} - \frac{k}{V} \frac{dV}{d\varphi} - \frac{1}{Mc_v T} \frac{dQ_w}{d\varphi} \right], \quad (2.16)$$

где: c_{p1} , c_{p2} – изобарная теплоемкость рабочего тела, перетекающего через впускные и выпускные органы; T_1 , T_2 – температура рабочего тела, перетекающего через эти же органы.

В (2.14) и (2.16) знак “плюс” перед энтальпией соответствует входящему в цилиндр потоку, а “минус” – покидающему. Значения энтальпий подсчитываются по параметрам газа, находящегося в объеме, из которого происходит истечение (т.е. “по источнику”). Если какой-либо из органов газораспределения закрыт, то соответствующее ему слагаемое в (2.16) зануляется, поскольку в этом случае расхода газа через него нет.

Полученная система уравнений (2.15)-(2.16) применима как для 4-х тактных, так и для 2-х тактных двигателей. Однако моделирование процессов газообмена для них имеют некоторые особенности. На них и остановимся.

В 4-х тактных двигателях основная масса ОГ покидает цилиндр в процессе свободного и принудительного выпуска. В это время впускные органы закрыты. Дальнейшее развитие процесса газообмена связано с продувкой цилиндра при открытых впускных и выпускных органах и существенно зависит от перекрытия фаз и располагаемых площадей в этот период (рис. 2.2). Если перекрытие фаз достаточно малое, что характерно для двигателей без наддува, то явление продувки фактически отсутствует. Кроме того, в двигателях без наддува давление воздуха во впускном ресивере обычно меньше, чем выпускном, поэтому в период перекрытия фаз возможен заброс ОГ во впускную систему. Возможности нульмерной термодинамической модели выделенного цилиндра не позволяют учесть возврат ОГ обратно в цилиндр при наполнении. Если двигатель снабжен системой настроенного впуска и осуществляется инерционный наддув, явления заброса можно избежать (и расчетных ошибок, связанным с этим тоже), однако полноценная продувка цилиндра при этом также отсутствует.

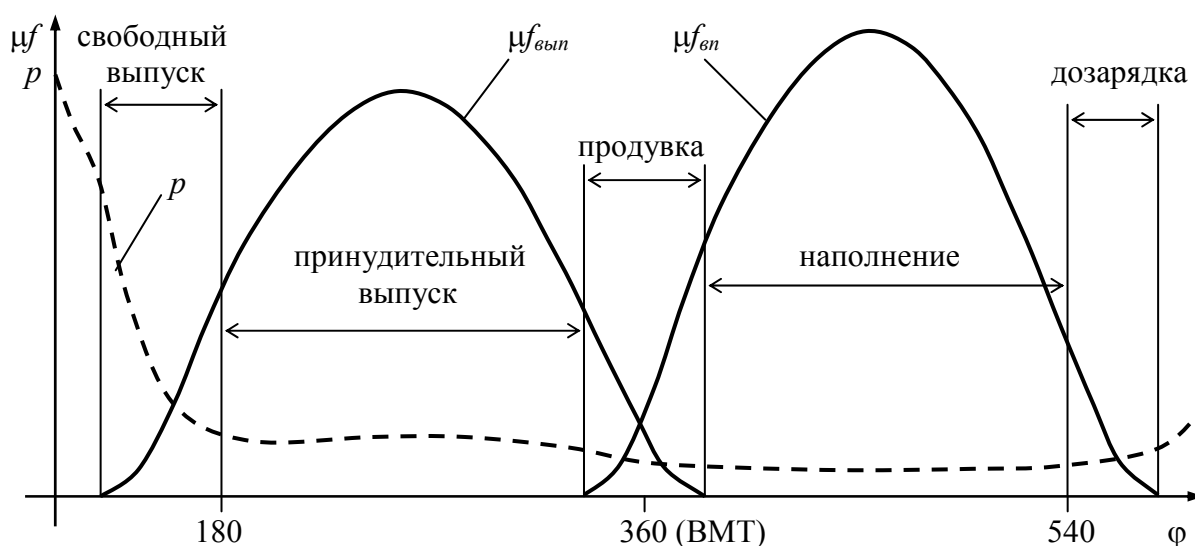


Рис. 2.2. Диаграмма изменения давления в цилиндре (p), условных площадей проходного сечения (μf) и фаз открытия газораспределительных органов (φ) 4-х тактного двигателя

В 4-х тактных двигателях с наддувом систему воздухообмена организуют таким образом, чтобы давление на впуске было больше чем на выпуске. Поэтому при перекрытии фаз газораспределения вблизи ВМТ газ из впускного ресивера поступает в цилиндр, а из цилиндра в выпускную

систему. Часть продувочного воздуха в виде пристеночной струи [7] течет от впускных клапанов к выпускным. В рамках рассматриваемой модели ответить на вопрос, с какими параметрами газ покидает цилиндр через выпускные органы, точно ответить сложно. Поэтому в данном случае используем предположение о “полном перемешивании” рабочего тела при продувке, т.е. продувочный воздух, попадая в цилиндр, сначала полностью перемешивается с ОГ, а цилиндр покидает уже смесь ОГ и воздуха. Такая схема легко реализуема в рамках данной модели.

Окончание процесса газообмена (фаза наполнения) происходит при открытых впускных и закрытых выпускных органах. Поршень движется от ВМТ к НМТ, образуя некоторое падение давления в цилиндре, относительно p_k , при этом цилиндр наполняется свежим зарядом. Определенные нюансы связаны с окончанием процесса наполнения. В традиционных 4-х тактных двигателях окончание впуска обычно приходится на движение поршня от НМТ к ВМТ, образуя фазу дозарядки цилиндра. Следует отметить, что рассматриваемая модель не может учесть инерционных явлений при движении газа через впускные органы в данный период (это тоже можно отнести к погрешностям модели), а дозарядка идет до выравнивания давлений в цилиндре и впускной системе. Поэтому при достаточно “длинной” фазе дозарядки возможен обратный (расчетный) заброс во впускную систему. В данном случае используется та же модель полного перемешивания входящего газа в цилиндре.

В заключение к 4-х тактным двигателям можно сказать, что несмотря на отмеченные погрешности нульмерной разомкнутой модели, процессы газообмена здесь вполне удачно моделируются при точном задании условий на впуске и выпуске. Подбором проходных сечений органов газораспределения (коэффициента расхода) можно добиться хорошей сходимости расчетных и экспериментальных данных по параметрам продувки и наполнения цилиндра. Следует отметить, что процессы газообмена нетрадиционных рабочих циклов (к примеру, Миллера, Аткинсона и др.) также успешно моделируются в рамках рассмотренной модели.

В 2-х тактных двигателях на процесс газообмена отводится часть рабочих ходов двигателя, по углу поворота вала он значительно короче, чем в 4-х тактном двигателе, поэтому и протекает он значительно интенсивнее.

Конструктивные схемы организации газообмена 2-х тактных двигателей весьма разнообразны и широко описаны в литературе [7, 10], поэтому остановимся лишь на особенностях моделирования данных процессов.

В качестве характерной схемы для рассмотрения используем схему контурной продувки, диаграммы площадей сечений для которой приведены на рис. 2.3. Следует отметить, что для осуществления продувки в 2-х тактном двигателе необходимо иметь избыточное давление на впуске в цилиндр относительно выпуска. В целом процесс состоит из трех этапов: свободного выпуска, продувки и дозарядки (либо потери заряда, в зависимости от конструктивной схемы).

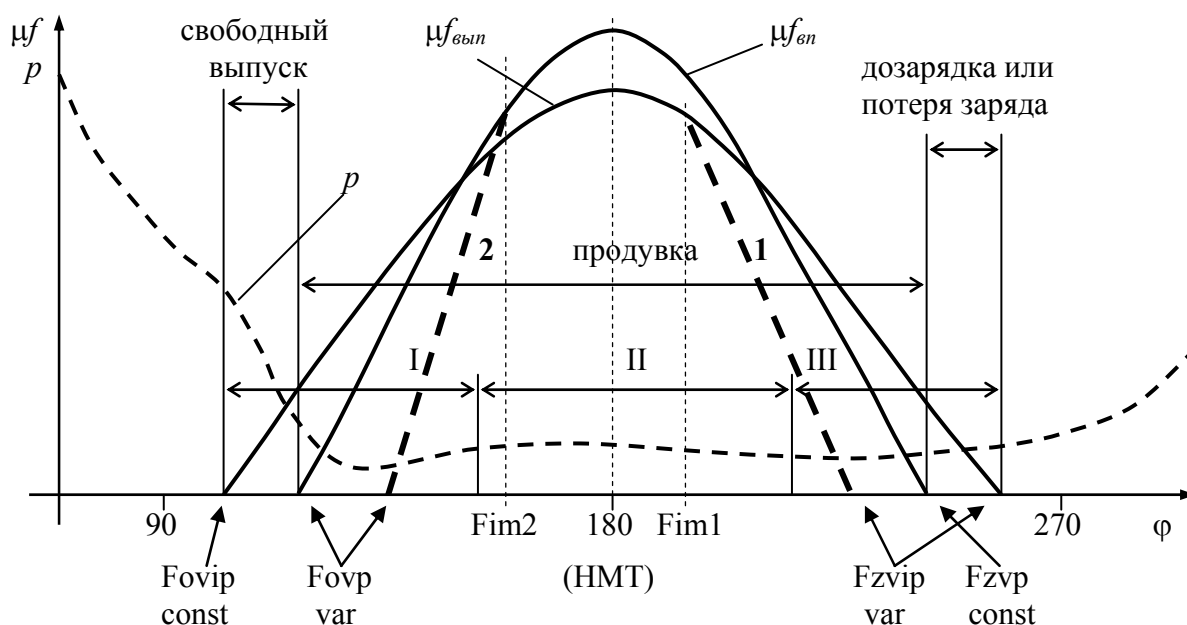


Рис. 2.3. Диаграмма изменения давления в цилиндре (p), условных площадей проходного сечения (μf) и фаз открытия газораспределительных органов (ϕ) 2-х тактного двигателя с контурной схемой продувки

В первой фазе процесса, как и в 4-х тактном ДВС цилиндр покидают продукты сгорания. Наиболее сложным для моделирования является участок продувки, поскольку в это время в цилиндр поступает свежий заряд, и с какими параметрами газ цилиндр покидает, определить весьма затруднительно, а модель полного перемешивания заряда не дают адекватного результата по параметрам газообмена. Поэтому при определении термодинамических параметров покидающего цилиндр газа примем следующую схе-

му (см. рис. 2.3): весь период газообмена условно разобьем на три участка – чистого вытеснения ОГ (I), частичного перемешивания ОГ и свежего заряда (II) и полного перемешивания (III). Будем также считать, что в начале второго участка степень перемешивания нулевая, а в конце – полная, внутри самого второго участка примем линейное изменение степени перемешивания. Варьируя относительной продолжительностью выделенных участков, можно достичь таких параметров газообмена (а это в первую очередь коэффициенты наполнения и остаточных газов), которые адекватно сходятся с экспериментальными характеристиками.

К рисунку 2.3, а также заданию фаз газораспределения и углов F_{im1} и F_{im2} , необходимо дать следующие пояснения.

В двухтактном двигателе с продувкой через окна фазы газораспределения симметричны относительно НМТ (180° п.к.в.), что предопределяет потерю заряда при продувке в завершающей фазе процесса, т.к. закрытие впуска происходит раньше закрытия выпуска.

Эту ситуацию исправляет установка золотникового механизма на выпуске (это возможно в конструкциях судовых дизелей большой размерности), что ограничивает фазу закрытия выпуска с переносом ее влево по углу п.к.в. (линия 1 на рисунке 2.3) с ограничением $180^\circ < F_{im1} < F_{zvip}$. Однако условия работы золотникового механизма на выпуске крайне тяжелы.

Более предпочтительно установить золотниковый механизм на впуске с одновременным расширением всей фазы впуска увеличением высоты окон, либо их поднятием (линия 2 на рисунке 2.3, расширение фазы не показано). Очевидно, что в этом случае $F_{ovp} < F_{im2} < 180^\circ$. Принципиально возможна комбинация обоих способов. Исходя из этого:

- если на впуске и выпуске 2-х тактного двигателя имеем продувочные окна, золотники отсутствуют, фазы газораспределения симметричны;
- если присутствуют золотники, фазы газораспределения могут быть несимметричными относительно НМТ;

- задаваемые фазы газораспределения – начала выпуска F_{ovp} и конца впуска F_{zvpr} определяют положение верхней кромки окон. При заданных значениях высоты окон, нижняя кромка окон может оказаться выше/ниже точки нахождения поршня в НМТ (это легко рассчитывается). Также легко рассчитывается относительная длина окружности цилиндра,

занимаемая окнами. Если геометрия продувочных окон изначально неизвестна, то этими данными можно воспользоваться для корректировки геометрии окон.

Таким образом, в настоящей главе мы связали скорость изменения давления в цилиндре на тактах газообмена со скоростью изменения его объема, интенсивностью теплообмена со стенками и скоростью замещения массы ОГ свежим зарядом.

2.4. Определение составляющих правых частей дифференциальных уравнений

Нахождение скорости изменения давления рабочего тела в цилиндре на любом из тактов рабочего цикла связано со знанием относительных изменений массы и объема цилиндра, скорости тепловыделения и интенсивности теплообмена между рабочим телом и стенками цилиндра. Эти величины в процессе совершения двигателем рабочего цикла не остаются постоянными, а непрерывно изменяются. Ниже остановимся на более детальном рассмотрении составляющих правых частей уравнений (2.11), (2.12) и (2.16), описывающих указанные процессы.

2.4.1. Геометрические характеристики системы

К геометрическим характеристикам цилиндра отнесем значения текущего объема цилиндра, скорости его изменения по углу п.к.в. и текущей площади поверхности КС, необходимой для расчета доли теплоты, отдаваемой в стенки.

Рабочий объем цилиндра есть объем, описываемый поршнем:

$$V_h = \frac{\pi D^2}{4} S, \quad (2.17)$$

где: D – диаметр цилиндра, S – ход поршня.

Текущий объем цилиндра состоит из объема цилиндра в ВМТ (точка с рабочего цикла) и части объема, открываемого поршнем:

$$V(\varphi) = V_c + V_x = \frac{V_h}{\varepsilon - 1} + \frac{\pi D^2}{4} x(\varphi), \quad (2.18)$$

где: φ – угол поворота вала; ε – степень сжатия; $x(\varphi)$ – расстояние, пройденное поршнем от ВМТ, которое определяется как

$$x(\varphi) = \frac{S}{2} \left(1 - \cos \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin^2 \varphi \right), \quad (2.19)$$

где: λ – постоянная КШМ.

Таким образом, текущий объем выражается формулой:

$$V(\varphi) = \frac{V_h}{2} \left(\frac{2}{\varepsilon - 1} + 1 - \cos \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin^2 \varphi \right). \quad (2.20)$$

В связи с тем, что ε для данного двигателя величина постоянная, производная от объема цилиндра:

$$\frac{dV}{d\varphi} = \frac{V_h}{2} \left(\sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right). \quad (2.21)$$

Текущая площадь поверхности камеры сгорания состоит из площадей поверхности поршня и крышки, которые неизменны, и площади втулки цилиндра, открытой поршнем. В первом приближении она может быть определена по формуле:

$$F(\varphi) = F_k + F_{\pi} + F_b(\varphi) = k_k \frac{\pi D^2}{4} + k_{\pi} \frac{\pi D^2}{4} + \pi D (x_0 + x(\varphi)), \quad (2.22)$$

где: k_k и k_{π} – повышающие коэффициенты, учитывающие отклонение формы поверхностей крышки и поршня от плоской; x_0 – часть высоты втулки, открытой поршнем в ВМТ, определяемой как:

$$x_0 = k_b \frac{S}{\varepsilon - 1}, \quad (2.23)$$

где: k_b – понижающий коэффициент, учитывающий уменьшение высоты втулки, открытой поршнем в ВМТ в профилированной КС.

Коэффициенты k_k , k_{π} и k_b могут быть точно определены для конкретного двигателя путем анализа реальной геометрической формы камеры сгорания.

2.4.2. Теплофизические характеристики рабочего тела

Теплофизические характеристики рабочего тела, непосредственно входящие в правые части дифференциальных уравнений скорости изменения давления, это удельная теплоемкость газа (при постоянном объеме – c_v и давлении – c_p) и показатель адиабаты k . При определении температуры рабочего тела необходимо знать значение газовой постоянной R .

В общем случае, все теплофизические характеристики являются функцией температуры и состава газовой смеси. Температура рабочего тела в цикле постоянно меняется. Состав смеси в процессах сжатия и расширения можно считать постоянным, а в процессах сгорания и газообмена также меняется. Следовательно, изменение теплофизических свойств рабочего тела необходимо учитывать на каждом шаге расчета по углу п.к.в. Следует, тем не менее, отметить тот факт, что при выводе уравнений скорости изменения давления в цилиндре, все теплофизические характеристики газовой смеси принимались постоянными. Это, принятое при построении модели допущение основано на том, что относительное изменение рассматриваемых здесь параметров, ничтожно мало по отношению к другим составляющим правых частей используемых дифференциальных уравнений.

Будем считать, что температура рабочего тела на каждом шаге расчета известна. Смесь газов в цилиндре в первую очередь состоит из воздушного заряда и остаточных газов. Состав смеси газов существенно меняется в сторону ОГ в процессе сгорания. В любой момент рабочего цикла изохорная теплоемкость рабочего тела, как смеси воздуха и продуктов сгорания может быть определена из выражения:

$$c_v^{cm} = \gamma_r c_v^{nc} + (1 - \gamma_r)(c_v^{nc} x + c_v^g(1 - x)), \quad (2.24)$$

где: c_v^{nc} – теплоемкость продуктов сгорания; c_v^g – теплоемкость воздуха; x – текущая доля выгоревшего топлива, γ_r – коэффициент остаточных газов.

В классической литературе по теории ДВС (к примеру, в [5]) и в теплотехнических справочниках обычно приводятся таблицы зависимостей изохорной теплоемкости отдельных газов от температуры. Пользоваться напрямую ими неудобно, поэтому в расчетах широко используют аппрок-

симации данных таблиц полиномами тех или иных степеней. Приводимые ниже зависимости имеют точность аппроксимации не хуже 1...2 % для диапазона температур от 300 до 2800 К. В частности, мольная изохорная теплоемкость воздуха аппроксимируется зависимостью:

$$c_v^e = (-3,4629102 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 3,2517648 \cdot T + 1,9683891 \cdot 10^4), \quad (2.25)$$

где: T – термодинамическая температура, К.

Массовая изохорная теплоемкость воздуха:

$$c_{vm}^e = c_v^e / 28,96, \quad (2.26)$$

где: 28,96 – условная молярная масса воздуха.

Изохорная теплоемкость продуктов сгорания рассчитывается с учетом их состава:

$$c_v^{nc} = \frac{c_{CO} M_{CO} + c_{H_2O} M_{H_2O} + c_{O_2} M_{O_2} + c_{N_2} M_{N_2} + c_{CO_2} M_{CO_2} + c_{H_2} M_{H_2}}{28M_{CO} + 18M_{H_2O} + 32M_{O_2} + 28M_{N_2} + 44M_{CO_2} + 2M_{H_2}}, \quad (2.27)$$

где: M_i – мольное содержание отдельных составляющих смеси газов; c_i – их мольные теплоемкости.

Мольные теплоемкости составляющих продуктов сгорания:

$$\begin{aligned} c_{H_2} &= 1,6259385 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 1,0012771 \cdot T + 2,0042458 \cdot 10^4; \\ c_{CO} &= -3,745352 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 3,3573252 \cdot T + 1,9646624 \cdot 10^4; \\ c_{N_2} &= -2,5966004 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 2,8653993 \cdot T + 1,966353 \cdot 10^4; \\ c_{O_2} &= -6,806402 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 4,7281145 \cdot T + 1,9743777 \cdot 10^4; \\ c_{H_2O} &= -4,5350021 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 + 1,9170658 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 3,1123375 \cdot T + \\ &\quad + 2,4093572 \cdot 10^4; \\ c_{CO_2} &= 1,243564 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 - 9,1538597 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 25,06555 \cdot T + \\ &\quad + 2,1574946 \cdot 10^4. \end{aligned} \quad (2.28)$$

Мольное содержание компонентов продуктов сгорания при коэффициенте избытка воздуха $\alpha < 1$:

$$\begin{aligned}
M_{\text{CO}} &= \frac{0,42(1-\alpha)l_0}{1+S_k}; \\
M_{\text{CO}_2} &= C/12 - M_{\text{CO}}; \\
M_{\text{H}_2} &= S_k M_{\text{CO}}; \\
M_{\text{H}_2\text{O}} &= 0,5\text{H} - M_{\text{H}_2}; \\
M_{\text{O}_2} &= 0; \\
M_{\text{N}_2} &= 0,79\alpha l_0.
\end{aligned} \tag{2.29}$$

Мольное содержание компонентов продуктов сгорания при $\alpha \geq 1$:

$$\begin{aligned}
M_{\text{CO}} &= 0; \\
M_{\text{CO}_2} &= C/12; \\
M_{\text{H}_2} &= 0; \\
M_{\text{H}_2\text{O}} &= 0,5\text{H}; \\
M_{\text{O}_2} &= 0,21(\alpha - 1)l_0; \\
M_{\text{N}_2} &= 0,79\alpha l_0,
\end{aligned} \tag{2.30}$$

В зависимостях (2.29) и (2.30): l_0 – мольное стехиометрическое соотношение для используемого топлива ($=L_0/28,96$); С, Н – удельное содержание углерода и водорода в топливе; α – коэффициент избытка воздуха; S_k – эмпирический коэффициент (для бензина $\approx 0,5$).

Значения стехиометрического соотношения L_0 (кг возд./кг. топл.), а также относительных долей углерода и водорода в топливе приводятся в специальной литературе, например в [2].

Молярная масса продуктов сгорания определится из соотношения:

$$M_{nc} = \frac{28M_{\text{CO}} + 18M_{\text{H}_2\text{O}} + 32M_{\text{O}_2} + 28M_{\text{N}_2} + 44M_{\text{CO}_2} + 2M_{\text{H}_2}}{M_{\text{CO}} + M_{\text{H}_2\text{O}} + M_{\text{O}_2} + M_{\text{N}_2} + M_{\text{CO}_2} + M_{\text{H}_2}}, \tag{2.31}$$

где коэффициенты перед мольными содержаниями отдельных компонентов – есть молярные массы отдельных газов.

Массовая изохорная теплоемкость продуктов сгорания:

$$c_{vM}^{nc} = c_v^{nc} / M_{nc} . \quad (2.32)$$

Молярная масса рабочего тела как смеси воздуха и ОГ:

$$M_{см} = \gamma_r M_{nc} + (1 - \gamma_r)(M_{nc} x + 28,96(1 - x)). \quad (2.33)$$

Газовая постоянная смеси газов в цилиндре:

$$R_{см} = 8314,4 / M_{см} . \quad (2.34)$$

Массовое значение изобарной удельной теплоемкости и постоянной адиабаты для любого газа или смеси определяются из уже известных соотношений:

$$\begin{aligned} c_p &= R + c_v, \\ k &= c_p / c_v . \end{aligned} \quad (2.35)$$

Теплофизические характеристики газов на впуске и выпуске из цилиндра рассчитываются по этой же методике, при этом обычно считают, что во впуске ресивере находится чистый воздух, а в выпускном коллекторе – только продукты сгорания.

2.4.3. Моделирование характеристик тепловыделения

Как видно из зависимости (2.11), описание процесса тепловыделения в цилиндре сводится к заданию величины $dx/d\varphi$ – относительной скорости тепловыделения. Величины цикловой подачи топлива $g_{ц}$ и его низшей теплотворной способности Q_H в данном случае являются константами и задаются в общем списке исходных данных к расчету. Единственным нюансом является факт уменьшения Q_H при работе двигателя на богатой смеси при $\alpha < 1$. Физико-химические аспекты этого явления подробно рассмотрены в [2, 5, 6] и учитываются в настоящей методике в виде поправки к исходному значению теплотворной способности: $Q_H^{\alpha < 1} = Q_H - \Delta Q_H$. Сами значения теплотворной способности топлива для различных его видов широко представлены в [2].

Далее перейдем к рассмотрению моделей выделения теплоты, которые могут быть применены в рамках нульмерной модели цилиндра. Следует сразу оговориться, что универсальной модели тепловыделения такого порядка не существует, а основным требованием является ее относительная простота. Поскольку процессы горения топлива в различных двигателях существенно отличаются друг от друга, есть смысл разделить модели тепловыделения по областям применения. Например, в двигателях внешнего смесеобразования происходит сгорание заранее подготовленной топливно-воздушной смеси, и выделение теплоты всецело определяется скоростью распространения фронта пламени в цилиндре. В двигателях внутреннего смесеобразования скорость сгорания в основном определяется скоростью турбулентной диффузии окислителя в факел распыленного испаряющегося топлива. В целом же, можно считать доказанным [7, 8, 11], что процессы видимого сгорания как гомогенных, так и гетерогенных смесей, управляются не химическими, а физическими законами.

Физические основы построения модели выгорания **гомогенных смесей** подробно описаны в [7], поэтому здесь на этом останавливаться не будем. Сама модель, известная в теории ДВС как “формула И.И. Вибе”, применима для описания процессов тепловыделения в **бензиновых и газовых двигателях**, как с внешним, так и внутренним смесеобразованием. В интегральной форме она выглядит так:

$$x = x_{max} \left[1 - e^{-6,908 \left(\frac{\varphi - \varphi_{нс}}{\varphi_z} \right)^{m+1}} \right], \quad (2.36)$$

в дифференциальной:

$$\frac{dx}{d\varphi} = \frac{x_{max}}{\varphi_z} 6,908(m+1) \left(\frac{\varphi - \varphi_{нс}}{\varphi_z} \right)^m e^{-6,908 \left(\frac{\varphi - \varphi_{нс}}{\varphi_z} \right)^{m+1}}. \quad (2.37)$$

В этих формулах: x – текущая доля выгоревшего топлива; x_{max} – максимальная доля выгоревшего топлива; φ – текущий угол п.к.в.; $\varphi_{нс}$ – угол начала видимого сгорания топлива; φ_z – условная продолжительность сгорания; m – показатель характера сгорания.

Рассмотрим физический смысл входящих в формулу Вибе переменных, обратившись к рис. 2.4 и 2.5.

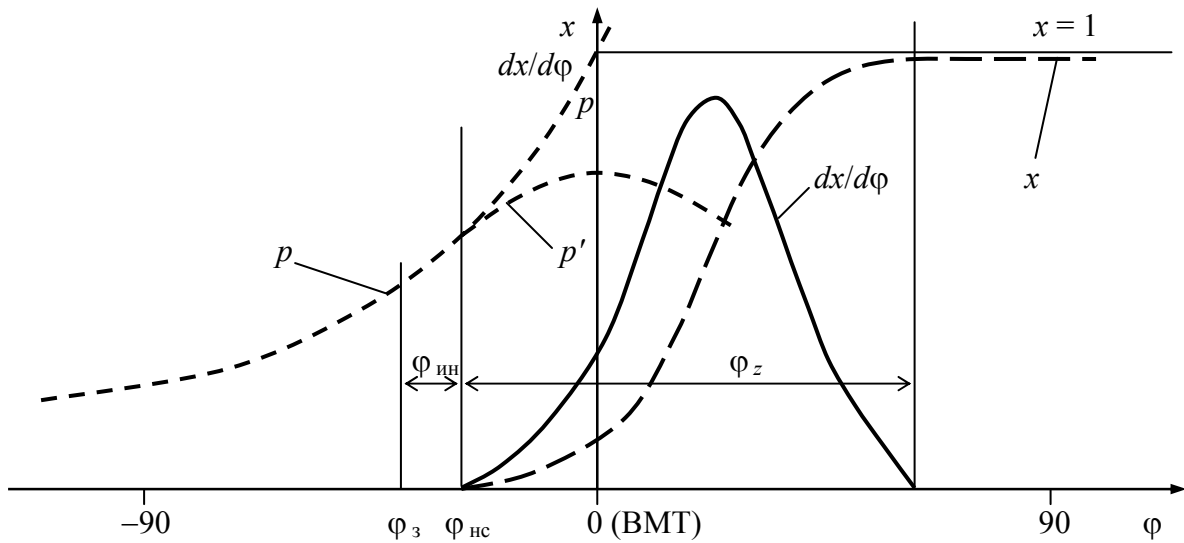


Рис. 2.4. Диаграмма давления (p), линия чистого сжатия (p'); интегральная (x) и дифференциальная ($dx/d\varphi$) характеристики тепловыделения, согласно формулам И.И. Вибе

На рис. 2.4 показано расположение участка активного тепловыделения на развертке углов п.к.в. в соотношении с диаграммами давления в цилиндре и линией чистого сжатия (без сгорания). Момент зажигания в бензиновых двигателях (φ_z) обычно приходится на углы $-40 \dots -10^\circ$ п.к.в. Начало видимого сгорания, определяемое положением $\varphi_{нс}$, также располагается левее ВМТ (т.е. до верхней мертвой точки). Таким образом, началу видимого сгорания предшествует период индукции $\varphi_{ин}$, обычно составляющий $0,5 \dots 2,0^\circ$ п.к.в. Протяженность этого участка зависит не только от термодинамических, но и от многих конструктивных факторов, поэтому моделирование его и в настоящее время весьма затруднительно. Опустим этот вопрос и далее будем оперировать только углом начала видимого сгорания, который для различных бензиновых двигателей составляет величины $-25 \dots -5^\circ$ п.к.в. в принятой системе отсчета углов (см. рис. 2.4).

Вторым важным параметром формулы Вибе является условная продолжительность сгорания φ_z , определяющая *среднюю скорость* протекания процесса сгорания. Среди факторов, определяющих величину φ_z , следует выделить термодинамические параметры рабочего тела (уровень давлений

и температур) в процессе сгорания, состав рабочей смеси, степень турбулизации заряда (определяемая формой КС и впускных органов, скоростным режимом работы двигателя) и степень компактности КС (определяется диаметром цилиндра D , отношением S/D , а также формой КС). Наиболее характерным диапазоном изменения данного параметра является промежуток $50 \dots 80$ °п.к.в. Для малофорсированных двигателей и частичных режимов работы характерны большие значения φ_z , для высокофорсированных двигателей и режимов работы, близких к ВСХ, а также высоких скоростей вращения коленчатого вала характерно уменьшение φ_z . Это объясняется не только ростом термодинамических параметров и используемым составом смеси, а в основном, ростом турбулизации заряда, определяющей увеличение турбулентной скорости распространения фронта пламени. Кстати, именно турбулентность заряда позволяет двигателям с гомогенным смесеобразованием работать в широком диапазоне оборотов, при этом с ростом оборотов продолжительность сгорания по углу п.к.в. изменяется мало (с тенденцией к сокращению), а истинное время протекания процесса сгорания $t_z = \varphi_z / 6n$ пропорционально уменьшается.

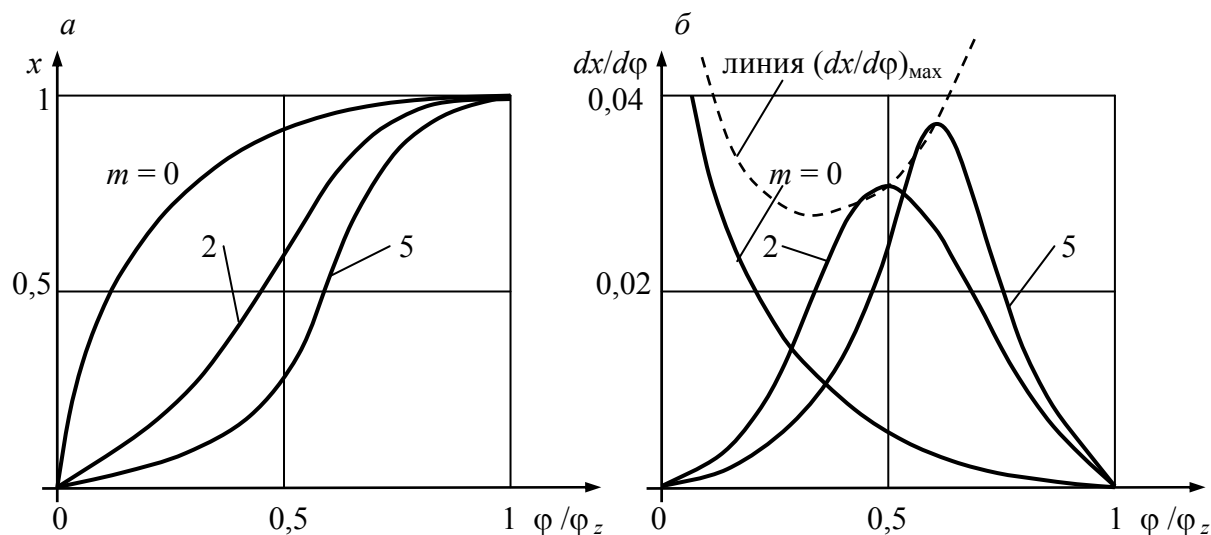


Рис. 2.5. Характеристика выгорания топлива (а) и скорость выделения теплоты (б) при сгорании гомогенных смесей в зависимости от относительного угла φ/φ_z

Третьим параметром формулы И.И. Вибе, определяющим значение *максимальной скорости сгорания*, является показатель характера сгорания m . Этот же параметр отвечает за форму кривой $dx/d\varphi$. Графики изменения

интегральной и дифференциальной характеристик тепловыделения показаны на рис. 2.5, из которого видно, что график скорости сгорания представляет собой плавную кривую с одним максимумом. Минимальное значение скорости сгорания приходится на значение $m \approx 1,5$ [7]. При уменьшении и увеличении m максимальная скорость сгорания увеличивается, а расположение точки с максимальной скоростью смещается соответственно влево или вправо по оси углов п.к.в. (см. рис. 2.5 б). Такой вид характеристик тепловыделения неоднократно подтвержден экспериментом [7].

С точки зрения функциональной зависимости, показатель характера сгорания m в целом определяется тем же набором характеристик, что и условная продолжительность сгорания φ_z . Однако каких-либо зависимостей, напрямую связывающих m и φ_z с ними, не существует до сих пор, что связано, в частности с тем, что некоторые из них даже не могут быть выражены математически (степень компактности КС, например). Поэтому m и φ_z обычно находят экспериментально, по результатам индицирования цилиндра. В литературе, в частности в [7], приводятся зависимости для пересчета m и φ_z относительно значений для известного базового режима. Однако использование подобных зависимостей также затруднительно, поскольку в них входят величины, трудно определяемые расчетом (турбулентная и нормальная скорость распространения фронта пламени) или же искомые (средние давления и температуры для рассчитываемого режима работы двигателя). Статистическая обработка многочисленных экспериментов по определению m для бензиновых двигателей позволяет говорить о том, что наиболее характерный диапазон для данного параметра – $1,5 \dots 3,5$.

Четвертый параметр – максимальная доля выгоревшего топлива x_{max} – введен в формулу Вибе для учета недогорания топлива вследствие его неполного испарения, потерь при продувке цилиндра, неполного сгорания в пристеночной зоне и прочих эффектов. Обычно величину x_{max} выбирают из диапазона $0,95 \dots 1,0$, и она также может быть определена экспериментальным путем.

Таким образом, моделирование процесса тепловыделения в бензиновом двигателе сводится к заданию четырех параметров: $\varphi_{нс}$, m , φ_z и x_{max} .

В дизельных двигателях процессы смесеобразования и сгорания носят **гетерогенный характер** [8, 11] и законом тепловыделения И.И. Вибге могут быть описаны лишь формально. В отличие от бензиновых и газовых двигателей, где сгорает заранее подготовленная смесь, в дизеле процессы смесеобразования и сгорания происходят практически одновременно и в более короткий промежуток времени.

Рассматривая **открытую камеру сгорания дизеля**, можно сказать, что подаваемое в цилиндр мелкораспыленное топливо, соприкасаясь со сжатым нагретым воздухом, интенсивно испаряется и, пройдя предпламенные реакции, самовоспламеняется. Период задержки самовоспламенения ($\varphi_{зс}$ – в угловых величинах, рис. 2.6), определяется как параметрами топлива [2], так и давлением и температурой в цилиндре в конце сжатия.

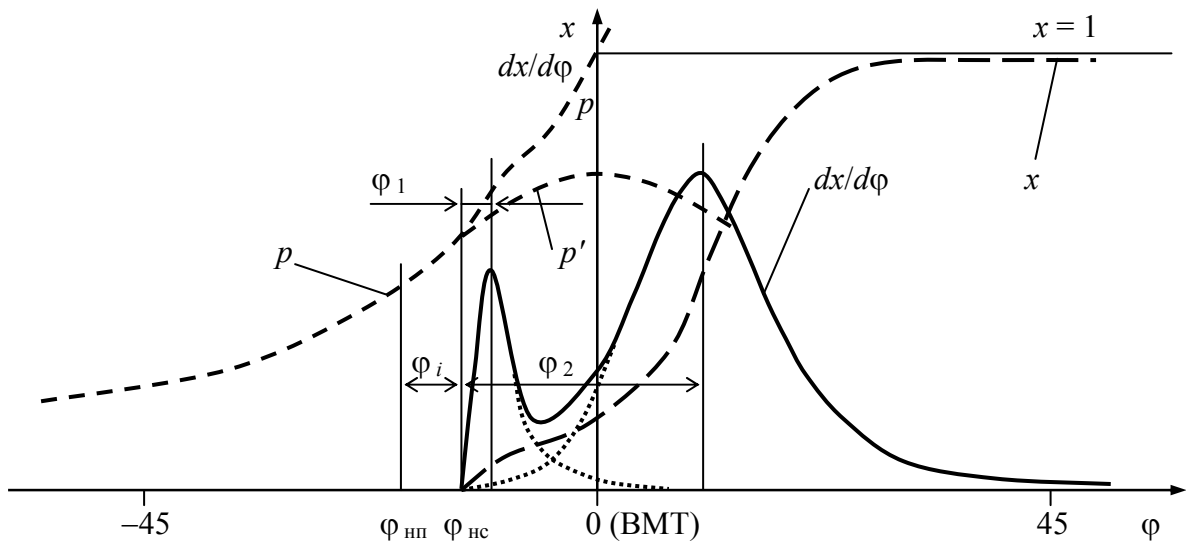


Рис. 2.6. Диаграмма давления (p), линия чистого сжатия (p'); интегральная (x) и дифференциальная ($dx/d\varphi$) характеристики тепловыделения, для открытой КС дизеля согласно формулам Б.П. Пугачева

Абстрагируемся на данный момент от продолжительности участка от начала впрыска топлива до его самовоспламенения и геометрии топливного факела. Тем не менее, за период φ_i в цилиндре дизеля накапливается некоторое количество испарившегося топлива, которое после момента самовоспламенения участвует в быстрой (кинетической) фазе сгорания. Дальнейшее выгорание топлива в основном определяется скоростью его подачи, испарения и перемешивания с окислителем (диффузионная фаза сгора-

ния), поскольку в настоящее время доказано [11], что собственно скорость сгорания паров топлива значительно выше скорости диффузии окислителя в топливный факел. Наличие двух механизмов выгорания топлива в камере сгорания дизеля отражается на характеристике тепловыделения в виде двух максимумов скорости тепловыделения (см. рис. 2.6). Очевидно, что кривая тепловыделения Вибе не может адекватно описать процесс сгорания в дизеле (лишь задавая $m \approx 0,5 \dots 1,0$, можно получить близкий по показателям интегральный результат моделирования).

Для описания процесса тепловыделения в дизеле с **объемным** способом смесеобразования на каф. ДВС ЛПИ им. Калинина (ныне СПбПУ) Б.П. Пугачевым разработана так называемая “двугорбая” динамика тепловыделения [8]. В интегральной форме она выглядит так:

$$x = x_1 \left[1 - e^{-\frac{k_1 - 1}{k_1} \left(\frac{\varphi - \varphi_{\text{нс}}}{\varphi_1} \right)^{k_1}} \right] + x_2 \left[1 - e^{-\frac{k_2 - 1}{k_2} \left(\frac{\varphi - \varphi_{\text{нс}}}{\varphi_2} \right)^{k_2}} \right], \quad (2.38)$$

в дифференциальной:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{d\varphi} = & \frac{x_1 (k_1 - 1)}{\varphi_1} \left(\frac{\varphi - \varphi_{\text{нс}}}{\varphi_1} \right)^{k_1 - 1} e^{-\frac{k_1 - 1}{k_1} \left(\frac{\varphi - \varphi_{\text{нс}}}{\varphi_1} \right)^{k_1}} + \\ & + \frac{x_2 (k_2 - 1)}{\varphi_2} \left(\frac{\varphi - \varphi_{\text{нс}}}{\varphi_2} \right)^{k_2 - 1} e^{-\frac{k_2 - 1}{k_2} \left(\frac{\varphi - \varphi_{\text{нс}}}{\varphi_2} \right)^{k_2}}. \end{aligned} \quad (2.39)$$

В этих формулах: x – текущая доля выгоревшего топлива; x_1 и x_2 – соответственно доли топлива, выгоревшего в кинетической и диффузионных фазах; φ – текущий угол п.к.в.; $\varphi_{\text{нс}}$ – угол начала видимого сгорания топлива; φ_1 и φ_2 – углы от начала видимого сгорания до момента достижения максимума скорости сгорания в соответствующих фазах (см. рис. 2.6); k_1 и k_2 – соответственно показатели характера выделения теплоты в кинетической и диффузионной фазах.

В итоге, согласно (2.39), кривая скорости тепловыделения представляет собой сумму скоростей выделения теплоты по двум рассмотренным механизмам. Для ее определения, необходимо задать семь параметров: $\varphi_{\text{нс}}$,

φ_1 , φ_2 , x_1 , x_2 , k_1 , k_2 , которые могут быть определены экспериментально. Однако в данном случае можно дать рекомендации для их расчетного определения или прямого задания. Обратимся к рис. 2.7, на котором отражена связь дифференциальной характеристики тепловыделения с дифференциальной характеристикой подачи топлива.

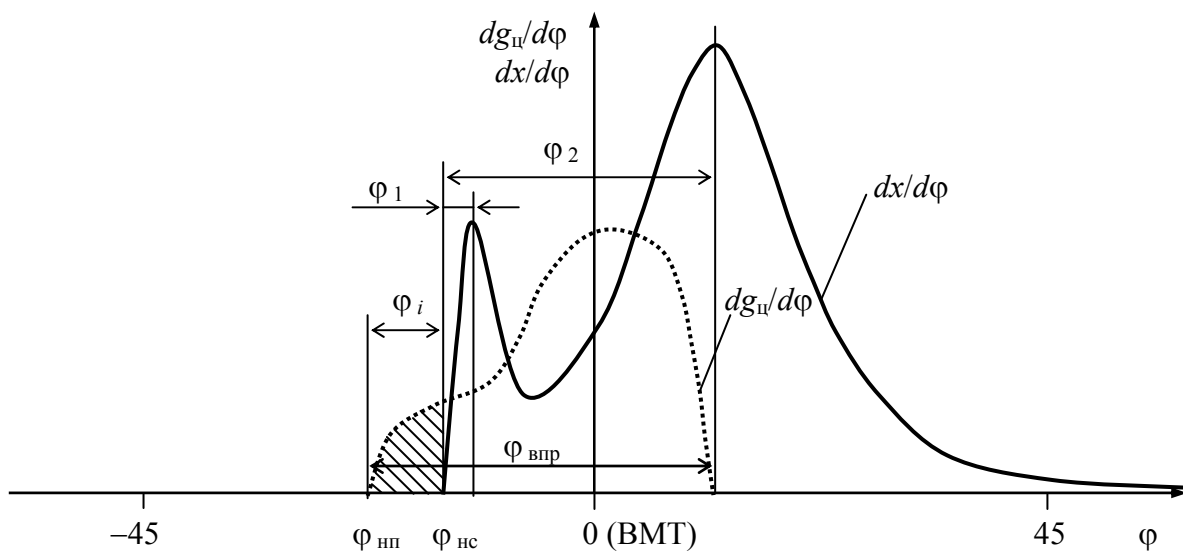


Рис. 2.7. Дифференциальная характеристика топливоподачи ($dg_{ц}/d\varphi$) и дифференциальная характеристика тепловыделения ($dx/d\varphi$), для дизеля с открытой КС и традиционным способом подачи топлива

Начнем с угла начала видимого сгорания $\varphi_{нс}$. Обычно в дизелях он составляет $-20 \dots -5$ °п.к.в. От угла начала подачи топлива его отделяет период задержки самовоспламенения φ_i , обычно составляющий $5 \dots 15$ °п.к.в.

При задании характеристик тепловыделения можно оперировать непосредственно углом $\varphi_{нс}$. Однако было бы логичным связать его непосредственно с углом начала подачи топлива $\varphi_{нп}$, что позволит, при знании формы дифференциальной характеристики впрыска, получить значение параметра x_1 . Известно [8], что в первой (кинетической) фазе выгорает топливо, испарившееся за период φ_i , что составляет $70 \dots 90$ % от поданного топлива за этот период.

Период задержки самовоспламенения φ_i для дизелей с диаметром цилиндра $170 \dots 720$ мм в первом приближении можно определить по простой эмпирической формуле [10]:

$$\varphi_i = \frac{4000 n}{\sqrt[3]{(c_m p_{\text{нв}})^2 T_{\text{нв}}}}, \quad (2.40)$$

в которой $p_{\text{нв}}$ и $T_{\text{нв}}$ – давление и температура рабочего тела в цилиндре в момент начала подачи топлива.

Помимо формулы [2.40] достаточно широко в нашей стране и за рубежом используют зависимости, базирующиеся на формуле О.М. Тодеса, описывающей механизм высокотемпературного воспламенения углеводородных топлив, следующего вида [10]:

$$\tau_i = A p^{-m} \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (2.41)$$

где: τ_i – временной период задержки самовоспламенения ($\tau_i = \varphi_i / 6n$); A и m – эмпирические коэффициенты; p и T – давление и температура газа в начале впрыска топлива; E – условная энергия активации, учитывающая физико-химические свойства топлива; R – газовая постоянная.

Основываясь на формуле О.М. Тодеса, а также работах А.И. Толстова и опубликованных экспериментальных данных по периодам задержки самовоспламенения для различных видов топлив, на кафедре ДВС СПбПУ получена формула для расчета φ_i , учитывающая режим работы двигателя и характеристики самовоспламеняемости топлива:

$$\varphi_i = 2,2768 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{T}{P}} \exp\left(\frac{2500 + 10760/CN}{T}\right), \quad (2.42)$$

где: p и T – текущие значения давления и температуры газа в начальной стадии впрыска топлива; CN – цетановое число топлива.

Расчет по формуле [2.42] встраивается в общую схему интегрирования дифференциальных уравнений скорости изменения давления и температуры в цилиндре. Мгновенное значение периода φ_i определяется согласно текущим термодинамическим параметрам на каждом шаге интегрирования до выполнения условия:

$$\int_0^{\varphi_i} \frac{d\varphi}{\varphi_i} = 1, \quad (2.43)$$

после чего фиксируется интегральное значение φ_i и определяется угол начала видимого сгорания как $\varphi_{нс} = \varphi_{нп} + \varphi_i$.

Далее определим доли выгоревшего топлива в первой и второй фазах сгорания x_1 и x_2 . Как уже было указано выше, при известной форме характеристики подачи топлива, долю x_1 можно определить как $(0,7 \dots 0,9)g_{ци}$, где $g_{ци}$ – доля цикловой подачи, поданная в цилиндр за период задержки самовоспламенения (заштрихованная площадь на рис. 2.7). Если таких данных нет, то x_1 для режимов ВСХ обычно лежит в пределах $0,15 \dots 0,35$. Для частичных режимов работы дизелей эта доля обычно несколько выше и достигает $0,5 \dots 0,6$. Доля x_2 определяется как $(x_{max} - x_1)$, где величину x_{max} выбирают из диапазона $0,97 \dots 1,0$, или часто подсчитывают по соотношению $x_{max} = \text{th } \alpha$, где α – коэффициент избытка воздуха.

Показатели характера сгорания в кинетической и диффузионной фазах k_1 и k_2 определяются следующим образом. Для высокофорсированных высокооборотных дизелей $k_1 \approx 2$ для всех режимов работы двигателя и выбор этого параметра мало влияет на вид получаемой при моделировании индикаторной диаграммы. Параметр k_2 для быстроходных дизелей находится в промежутке $1,5 \dots 2,5$ и определяет вид второго участка характеристики тепловыделения. Он имеет тенденцию к возрастанию при совершенствовании процесса смесеобразования и может быть рассчитан по формуле [8]: $k_2 = 1 + 1,5(\varphi_2/\varphi_{впр})^{1,34}$, где $\varphi_{впр}$ – продолжительность впрыска топлива, равная $\varphi_2 + \varphi_i$ (см. рис. 2.7).

Угол достижения максимума скорости тепловыделения на первом участке φ_1 обычно находится в промежутке $1 \dots 5$ °п.к.в. и может быть определен исходя из скорости распространения звуковых волн в объеме КС [8]:

$$\varphi_1 = 180 \frac{c_m}{a_{зв}} \frac{D_r}{S} = 6n \frac{D_r}{\sqrt{kRT}}, \quad (2.44)$$

где теплофизические характеристики рабочего тела и температура определены для момента начала сгорания, а D_r – характерный размер камеры сгорания – диаметр горловины камеры в поршне (или самой камеры).

Угол φ_2 достижения максимума скорости тепловыделения во второй фазе, как это видно из рис. 2.7, соответствует окончанию процесса впрыска

топлива в цилиндр. Таким образом, он обычно составляет 20...40 °п.к.в. и определяется соотношением: $\varphi_2 = \varphi_{впр} - \varphi_i$.

Следует отметить, что наибольшее влияние на показатели индикаторного процесса влияют параметры $\varphi_{нс}$, x_1 , φ_2 и k_2 .

Для дизельного двигателя с **объемно-пленочным** способом смесеобразования, характеристика тепловыделения задается с помощью модифицированной формулы Б.П. Пугачева, учитывающей пристеночную фазу сгорания – “трехгорбая” динамика тепловыделения. В интегральной форме она выглядит так:

$$x = x_1 \left[1 - e^{-\frac{k_1-1}{k_1} \left(\frac{\varphi - \varphi_{нс}}{\varphi_1} \right)^{k_1}} \right] + x_2 \left[1 - e^{-\frac{k_2-1}{k_2} \left(\frac{\varphi - \varphi_{нс}}{\varphi_2} \right)^{k_2}} \right] + x_3 \left[1 - e^{-\frac{k_3-1}{k_3} \left(\frac{\varphi - \varphi_{нсп}}{\varphi_3} \right)^{k_3}} \right], \quad (2.45)$$

в дифференциальной:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{d\varphi} = & \frac{x_1(k_1-1)}{\varphi_1} \left(\frac{\varphi - \varphi_{нс}}{\varphi_1} \right)^{k_1-1} e^{-\frac{k_1-1}{k_1} \left(\frac{\varphi - \varphi_{нс}}{\varphi_1} \right)^{k_1}} + \\ & + \frac{x_2(k_2-1)}{\varphi_2} \left(\frac{\varphi - \varphi_{нс}}{\varphi_2} \right)^{k_2-1} e^{-\frac{k_2-1}{k_2} \left(\frac{\varphi - \varphi_{нс}}{\varphi_2} \right)^{k_2}} + \\ & + \frac{x_3(k_3-1)}{\varphi_3} \left(\frac{\varphi - \varphi_{нсп}}{\varphi_3} \right)^{k_3-1} e^{-\frac{k_3-1}{k_3} \left(\frac{\varphi - \varphi_{нсп}}{\varphi_3} \right)^{k_3}}. \end{aligned} \quad (2.46)$$

В этих формулах, помимо уже известных величин: x_3 – доля топлива, выгорающая в пристеночной фазе; $\varphi_{нсп}$ – угол начала сгорания топлива в пристеночной фазе; φ_3 и k_3 – соответственно угол достижения максимума скорости тепловыделения (отсчитанный от $\varphi_{нсп}$) и показатель характера сгорания для пристеночной фазы (рис. 2.8).

При задании параметров “трехгорбой” динамики тепловыделения необходимо иметь в виду следующее. В целом подходы к заданию параметров кинетической и диффузионной фаз сгорания те же. Однако, в данном случае следует исходить из того, что $x_{max} = x_1 + x_2 + x_3$, где доля пристеночной фазы обычно находится в пределах 0,1...0,4, доли остальных фаз пропорционально уменьшаются. Угол начала сгорания в пристеночной

фазе $\varphi_{\text{нсп}}$ не совпадает с углом начала видимого сгорания, поскольку топливо, попадая на стенки КС, должно пройти все стадии процесса смесеобразования – прогрев, испарение и перемешивание с окислителем. Поэтому процесс выгорания топлива, попадающего на стенки, может начаться как до, так и после ВМТ. Показатель характера сгорания k_3 по этой же причине весьма невысок и составляет, как правило, $1,2 \dots 1,8$ с тенденцией к росту при повышении интенсивности движения заряда в цилиндре. Угол достижения максимума скорости тепловыделения φ_3 обычно лежит в пределах $10 \dots 40$ °П.К.В.

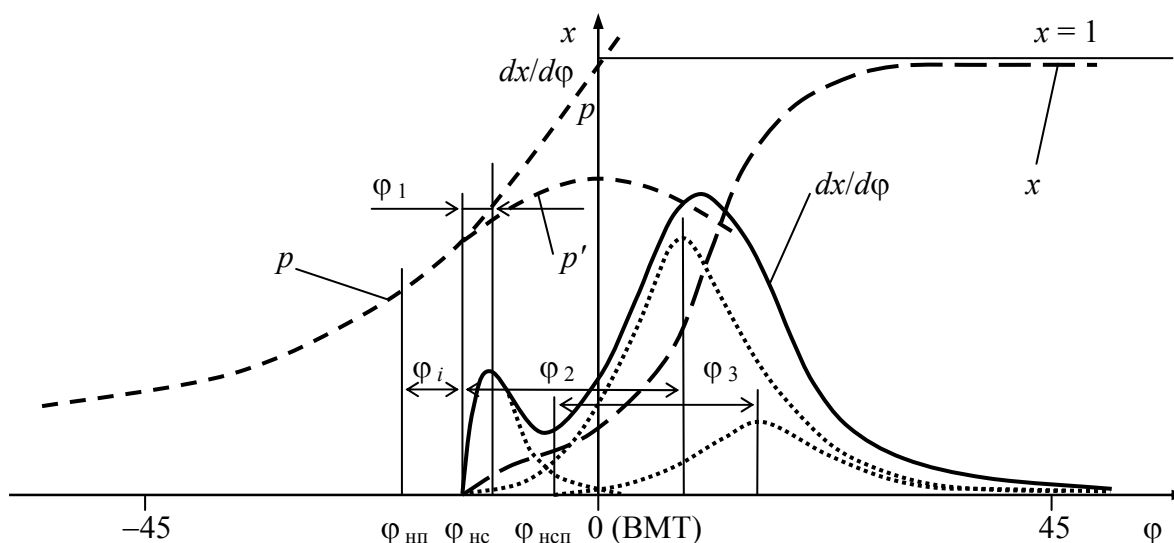


Рис. 2.8. Диаграмма давления (p), линия чистого сжатия (p'); интегральная (x) и дифференциальная ($dx/d\varphi$) характеристики тепловыделения, для полуразделенной КС дизеля согласно формулам Б.П. Пугачева

“Трехгорбая” динамика тепловыделения применима для моделирования процессов тепловыделения в полуразделенных камерах сгорания и не только. В открытых камерах сгорания дизелей при избыточной дальности факела, топливо также достигает стенок КС и испаряется с ее поверхности. Здесь также следует учитывать наличие пристеночной фазы.

Если ни одна из описанных выше методик расчета параметров тепловыделения не отвечает физической сущности происходящих процессов, в программной реализации модели рабочего процесса легко реализуема любая характеристика тепловыделения в виде табличных значений либо

интегральной, либо дифференциальной характеристик тепловыделения. В этом случае необходима только их нормировка по цикловой подаче.

Далее отдельно рассмотрим подходы к моделированию многофазных характеристик тепловыделения современных дизелей с высокими давлениями впрыска и электронным управлением подачей. С этой точки зрения, наиболее “простой” характеристикой подачи топлива является “двухфазный” впрыск (рис. 2.9).

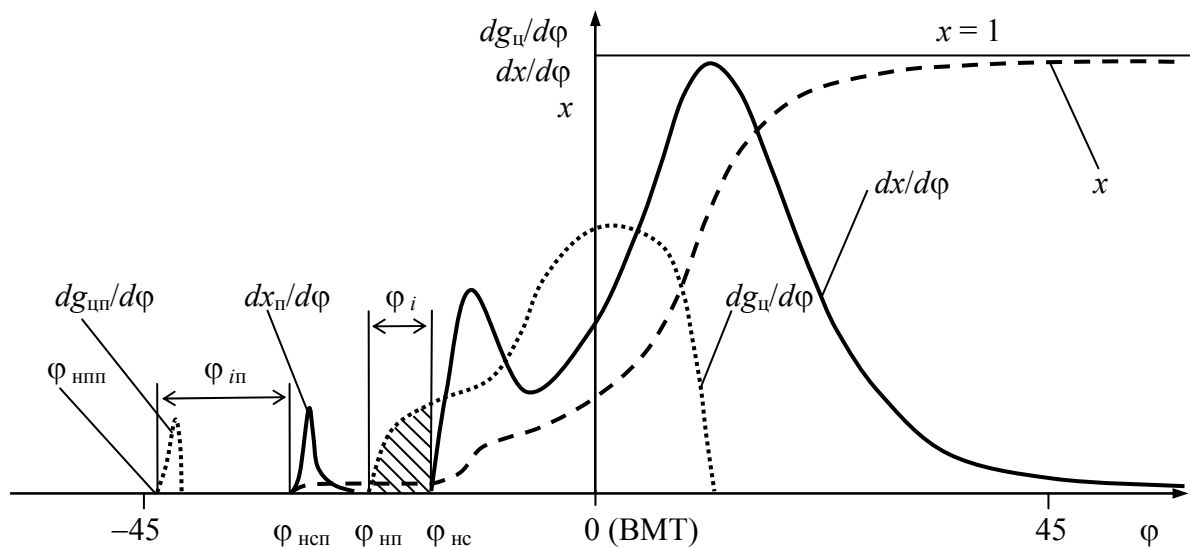


Рис. 2.9. Дифференциальная характеристика топливоподачи ($dg_{и\pi}/d\varphi$) интегральная (x) и дифференциальная характеристики тепловыделения ($dx/d\varphi$), для дизеля с двухфазной характеристикой подачи топлива, индекс “п” соответствует предварительной части впрыска

Предварительная (пилотная) фаза впрыска, подаваемая топливной аппаратурой быстроходных дизелей, находится на уровне $1...3 \text{ мм}^3$, что составляет порядок $1...2 \%$ от основной подачи. Она используется для повышения термодинамических параметров рабочего тела (в основном на частичных скоростных и нагрузочных режимах работы двигателя) перед подачей основной порции топлива для ускорения ее самовоспламенения. Это, в свою очередь, позволяет снизить шумность двигателя, динамические нагрузки в КШМ и токсические показатели ОГ.

При моделировании выгорания топлива при двухфазном впрыске можно исходить из следующих позиций:

1. Угол опережения подачи пилотной части топлива $\varphi_{\text{пп}}$ достаточно велик и составляет 25...45 °п.к.в. до ВМТ, в то же время для основной доли топлива он составляет 5...18 °п.к.в. ($\varphi_{\text{п}}$), и может быть даже отрицательным (т.е. за ВМТ).

2. Промежуток времени, за который подается пилотная часть топлива, весьма мал по отношению к промежутку времени между впрысками.

3. Угол задержки воспламенения пилотной части впрыска ($\varphi_{\text{п}}$), безусловно, больше чем для основной (φ_i), но достаточно мал для того, чтобы предварительное топливо воспламенилось и полностью сгорело до подачи основной порции топлива.

Исходя из сказанного, можно принять, что основная порция топлива будет воспламеняться и выгорать по “обычному” механизму, т.е. в кинетической и диффузионной фазах, с той только разницей, что угол задержки воспламенения для нее будет существенно меньше, чем бы он был в отсутствие пилотного впрыска. Таким образом, выгорание основной доли топлива можно моделировать по описанной выше методике.

При моделировании выгорания пилотной части впрыска можно посчитать, что эта порция топлива к моменту воспламенения полностью испарилась и перемешалась с окислителем, следовательно, она сгорит по кинетическому механизму, для чего можно использовать только первое слагаемое формул [2.38] и [2.39]. Угол задержки самовоспламенения для обеих долей подаваемого топлива адекватно описывается уравнением вида [2.41], что подтверждается сравнением расчетных значений с опубликованными в открытой печати данными (Л.В. Греховым, В.А. Марковым и другими авторами). При значительном приближении пилотной части впрыска к основной и существенном увеличении ее доли, процесс сгорания к моменту подачи основной части топлива может быть еще не завершен. В этом случае можно посчитать, что основная доля топлива воспламеняется практически без задержки и выгорает по диффузионному механизму.

Моделирование выгорания топлива при многофазной подаче аккумуляторными системами в настоящий момент до конца не разработано. Здесь следует иметь в виду, что близкий к П-образному закон подачи топлива, обеспечиваемый аккумуляторными системами, не является оптимальным для организации качественного рабочего процесса дизеля. При-

менение многофазной характеристики впрыска призвано исправить этот недостаток. Если основную фазу впрыска разбить на некоторое количество коротких П-образных подач с разной продолжительностью и промежутками между ними, можно получить вполне приемлемую характеристику подачи. В первом приближении, при моделировании процесса сгорания можно посчитать, что дифференциальная характеристика подачи представляет собой огибающую П-образных импульсов, и использовать подход, аналогичный представленному на рис. 2.9, считая, что каждая последующая микропорция топлива (исключая промежуток φ_i) мгновенно воспламеняется и выгорает по диффузионному механизму. На данный момент подтвердить или опровергнуть такой подход невозможно по причине отсутствия достоверной информации о протекании рабочих процессов дизелей с многофазными характеристиками впрыска.

2.4.4. Моделирование процессов теплообмена со стенками камеры сгорания

Рассмотрим составляющую уравнений (2.10)...(2.13) и (2.16), определяющую скорость теплоотвода в стенки КС: $\frac{1}{Mc_v T} \frac{dQ_w}{d\varphi}$, где $Mc_v T$ – текущий запас внутренней энергии рабочего тела, сосредоточенный в цилиндре двигателя; Q_w – теплота, отведенная от рабочего тела вследствие теплообмена. В общем случае [11], теплота отдается в стенки КС при помощи конвекции и лучеиспускания, т.е.

$$dQ_w = dQ_k + dQ_l, \quad (2.47)$$

причем

$$dQ_k = \alpha_k F (T - T_w) dt, \quad (2.48)$$

и

$$dQ_l = \sigma_0 \varepsilon_{\Pi} \varepsilon_w \left[\left(\frac{T_{\Pi}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] F dt. \quad (2.49)$$

В последних выражениях: dQ_k и $dQ_{\text{л}}$ – мгновенные значения конвективной и лучистой составляющих теплового потока; α_k – коэффициент конвективной теплоотдачи; F – текущая площадь поверхности теплообмена, определяемая по формуле (2.22); T – мгновенная температура рабочего тела в цилиндре; T_w – мгновенная средняя по площади КС температура окружающих ее стенок; $T_{\text{п}}$ – мгновенная среднemasсовая температура пламени; t – время; σ_0 – излучательная способность абсолютно черного тела (АЧТ), равная $5,67032 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; $\varepsilon_{\text{п}}$ и ε_w – степени черноты пламени и стенки соответственно.

Степень черноты стенок ε_w можно принимать постоянной. Для поршня и крышки она находится в пределах $0,8 \dots 0,95$, для гильз цилиндров – $0,5 \dots 0,6$, в среднем, для всей поверхности КС – $0,75 \dots 0,9$.

В камере сгорания бензинового двигателя, где не наблюдается образования сажистых частиц, лучистой составляющей теплового потока обычно пренебрегают (т.е. кладут $\varepsilon_{\text{п}} = 0$). Относительно значимую долю в теплоотдаче здесь дают только трехатомные газы CO_2 и H_2O . Если есть необходимость в ее оценке, в первом приближении можно воспользоваться данными экспериментов, проведенных Нуссельтом по исследованию теплоотдачи газов в бомбах [10], и использовать значения $\varepsilon_{\text{п}} \approx 0,07 \dots 0,08$, при этом, в (2.49) вместо температуры пламени следует использовать термодинамическую температуру газа в цилиндре.

Степень черноты сажистого пламени и среднemasсовая температура пламени в КС дизельного двигателя, входящие в зависимость (2.49), являются функциями угла поворота коленчатого вала. Для определения температуры пламени обычно пользуются формулой Л.М. Белинского [11]:

$$T_{\text{п}} = T \exp\left(0,106(2\overline{\text{Bo}}_i)^{0,24}\right), \quad (2.50)$$

где: T – мгновенная термодинамическая температура газа в цилиндре; $\overline{\text{Bo}}_i$ – приведенное для условий камеры сгорания ДВС число Больцмана:

$$\overline{\text{Bo}}_i = \frac{6 n g_{\text{ц}} Q_{\text{н}}}{F \sigma_0 \varepsilon_{\text{п}} \varepsilon_w \left(\frac{T}{100}\right)^4} \frac{dx}{d\varphi}, \quad (2.51)$$

в котором: F , T и $\varepsilon_{\text{п}}$ – текущие значения площади поверхности теплообмена, термодинамической температуры и степени черноты пламени; n – скорость вращения коленчатого вала; $g_{\text{ц}}$ – цикловая подача топлива; $Q_{\text{н}}$ – низшая теплотворная способность топлива; $dx/d\varphi$ – безразмерная скорость выгорания топлива в цилиндре. Согласно (2.51), среднемассовая температура пламени в процессе сгорания изменяется в пределах 2300...2700 К.

Степень черноты пламени $\varepsilon_{\text{п}}$ в КС дизеля для подстановки в (2.49) и (2.51) можно определить по закону Бугера-Беера:

$$\varepsilon_{\text{п}} = 1 - e^{-k_{\Sigma} C l}, \quad (2.52)$$

где: k_{Σ} – суммарный коэффициент поглощения энергии в диапазоне длин электромагнитных волн 0,4...6,0 мкм; C – текущая концентрация сажи в цилиндре; l – толщина излучающего (поглощающего) слоя или эффективная длина пути прохождения луча. Для полусферического излучения [11]:

$$l = 3,6V/F, \quad (2.53)$$

где V и F – текущие значения объема и площади поверхности КС, определяемые по формулам (2.30) и (2.32) соответственно.

Точное определение текущей концентрации сажи и суммарного коэффициента поглощения представляет большие трудности. Здесь можно воспользоваться упрощенным подходом для определения $k_{\Sigma}C$ на основе экспериментальных данных. К примеру, Г.Б. Розенблит и А.Г. Левит дают следующую зависимость для определения этого произведения:

$$k_{\Sigma}C = \frac{C_p}{H_p} \frac{p}{\alpha} [0,2(1-x) + 0,03], \quad (2.54)$$

где: C_p и H_p – содержание углерода и водорода в топливе, p – текущее давление газа в цилиндре, [бар]; α – коэффициент избытка воздуха при сгорании, x – текущая доля выгоревшего топлива.

В зависимости (2.48) и (2.49) входит мгновенная средняя по площади КС температура окружающих ее стенок T_w , требующая своего задания. Надо сказать, что распределение температур на поверхностях КС крайне неравномерно. В первом приближении можно определить средние температуры поверхностей поршня ($T_{\text{п}}$), гильзы (втулки) цилиндра ($T_{\text{в}}$) и крышки

цилиндра (T_k) исходя их среднестатистических данных. Для поршней и крышек цилиндров, выполненных из алюминиевых сплавов (на номинальных режимах работы двигателей) $T_{\Pi} \approx 500 \dots 570$ К, из чугуна – $520 \dots 600$ К. Для стальных накладок поршней – $550 \dots 650$ К и выше. При определении средней температуры поверхности втулки цилиндра следует исходить из того, что площадь ее контакта с рабочим телом постоянно изменяется от минимальной в ВМТ до максимальной в НМТ рабочего цикла. При этом максимальная температура втулки обычно наблюдается в верхнем жаровом поясе и постепенно уменьшается к нижней ее части (или с минимумом в средней части). Поэтому для задания температур поверхности втулки и расчета текущей средней температуры следует использовать линейную, а лучше – квадратичную аппроксимацию распределения температуры поверхности по высоте:

$$T_B(y) = a + b y + c y^2, \quad (2.55)$$

где: a , b и c – коэффициенты аппроксимации, y – расстояние, отсчитанное от поверхности головки цилиндра.

При определении коэффициентов аппроксимации можно принять, что для бензиновых двигателей температура верхнего жарового пояса обычно не превышает $410 \dots 430$ К, средней части – $370 \dots 390$ К. Для дизелей с жидкостным охлаждением – $440 \dots 460$ К и $390 \dots 420$ К, с воздушным – $460 \dots 490$ К и $400 \dots 440$ К. Мгновенная средняя температура втулки определяется как ее среднеинтегральное значение по открытой для контакта с рабочим телом поверхности.

Поскольку площадь поверхности КС и средняя температура втулки – переменные величины, то и T_w величина переменная. В каждый момент времени ее можно определить по зависимости:

$$T_w(\varphi) = \frac{\overline{T}_{\Pi} F_{\Pi} + \overline{T}_k F_k + \overline{T}_B F_B}{F_{\Pi} + F_k + F_B}, \quad (2.56)$$

где T_i и F_i – средние температуры и текущие площади соответственно поршня, крышки и втулки цилиндра.

Решающее значение для обеспечения относительно точного расчета доли теплоты, отдаваемой в стенку КС имеет определение конвективного коэффициента теплоотдачи α_k в формуле (2.48). Однако аддитивный подход к определению теплового потока в стенку давно и много критикуется многими авторами-исследователями теплообмена в КС ДВС. Их основные доводы строятся на том, что лучистый и конвективный тепловые потоки соизмеримы, следовательно, теплообмен в КС ДВС носит сложный радиационно-конвективный характер, т.е. сами потоки взаимозависимы. Отсюда делается вывод, что в эксперименте нет смысла выделять тепловые потоки разной физической природы, а получать коэффициент теплоотдачи как коэффициент сложного радиационно-конвективного теплообмена α_Σ . Если базироваться на этом подходе, то вместо (2.47)...(2.49) запишем:

$$dQ_w = \alpha_\Sigma F(T - T_w) dt . \quad (2.57)$$

При подстановке (2.57) в выражение для расчета потерь тепла в стенку, получим:

$$\frac{1}{Mc_p T} \frac{dQ_w}{d\phi} = \frac{\alpha_\Sigma F(T - T_w)}{Mc_p T} \frac{dt}{d\phi} = \frac{\alpha_\Sigma F(T - T_w)}{Mc_p T} \frac{1}{6n} . \quad (2.58)$$

В (2.58) α_Σ есть мгновенный средний по площади КС коэффициент теплоотдачи. В принципе, он может быть определен как с позиций сложного радиационно-конвективного теплообмена, так и аддитивно, тогда:

$$\alpha_\Sigma = \alpha_k + \alpha_r , \quad (2.59)$$

где:

$$\alpha_r = \frac{\sigma_0 \varepsilon_p \varepsilon_w \left[\left(\frac{T_p}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right]}{T - T_w} . \quad (2.60)$$

Следует отметить, что само понятие лучистого коэффициента теплоотдачи не имеет физического смысла, поскольку получается путем деления плотности лучистого теплового потока на нехарактерный для него температурный напор $T - T_w$. Однако, если считать, что доля радиационного теплообмена в целом за цикл не превышает 10...15 % в общем тепловом по-

токе в стенки, а участок с наличием радиационного теплообмена достаточно короток (совпадает с участком активного тепловыделения), то такой подход вполне допустим. Но в этом случае мы опять сталкиваемся с необходимостью расчета α_k , что в целом неудобно.

В расчетах рабочих процессов удобнее воспользоваться классом эмпирических “ α -формул” для определения суммарного коэффициента теплоотдачи. Наиболее простой из таких зависимостей является формула Г. Эйхельберга [10], применимая для дизелей большой размерности:

$$\alpha_{\Sigma} = 2,1 \sqrt{pT} \sqrt[3]{c_m} \quad \text{или} \quad \alpha_{\Sigma} = 7,8 \sqrt{pT} \sqrt[3]{c_m}, \quad (2.61)$$

где: p и T – мгновенные значения давления и температуры в цилиндре; c_m – средняя скорость поршня. Разница в указанных формулах лишь в том, что в первой давление выражается в кг/см², а во второй в МПа. В обоих случаях α_{Σ} имеет размерность Вт/м²·К.

Другой, наиболее современной и часто используемой, является формула Г. Вошни, в основе которой использована критериальная зависимость для теплообмена при турбулентном пограничном слое:

$$\alpha_{\Sigma} = 110 \frac{p^{0,8} \omega^{0,8}}{T^{0,53} D^{0,2}}, \quad (2.62)$$

где: T – термодинамическая температура газа в цилиндре, К; p – текущее давление, Бар; D – диаметр цилиндра, м, ω – скоростной фактор:

$$\omega = C_1 c_m + C_2 \frac{V_h T_a}{P_a V_a} (p - p_{пр}). \quad (2.63)$$

Здесь: $p_{пр}$ – давление газа в цилиндре при прокручивании вала двигателя (без сгорания), V_h – рабочий объем цилиндра; V_a – объем цилиндра в начале сжатия; P_a и T_a – параметры газа в начале сжатия; c_m – средняя скорость поршня; C_1 и C_2 – эмпирические константы:

$C_1 = 6,18 + 0,417 c_u / c_m$ – для процессов газообмена;

$C_1 = 2,28 + 0,308 c_u / c_m$ – для процессов сжатия-сгорания-расширения;

c_u – тангенциальная скорость закрутки заряда на впуске;

$C_2 = 0$ – для процессов газообмена и сжатия;

$C_2 = 3,24 \cdot 10^{-3}$ – для такта сгорания-расширения двигателей с открытой КС, бензиновых и дизельных;

$C_2 = 6,2 \cdot 10^{-3}$ – для двигателей с разделенными КС;

$C_2 = 4,0 \cdot 10^{-3}$ – для двигателей, работающих на спиртовых топливах;

$C_2 = 5,0 \cdot 10^{-3} + 2,3 \cdot 10^{-5}(T_w - 600)$ при $T_w \geq 600$ К – для двигателей с открытой камерой и теплоизолирующими покрытиями КС;

если слагаемое $C_2 \frac{V_h T_a}{P_a V_a} (p - p_{пр})$ оказывается меньше, чем величина

$2C_1 c_m \left(\frac{V_c}{V_i} \right)^2 C_3$, то в выражении (2.63) оно заменяется на последнее, тогда:

$C_3 = 0,8$ – для бензиновых двигателей;

$C_3 = 1,0$ – для двигателей, работающих на спиртовых топливах;

$C_3 = 1,0 - 1,2 \exp(-0,65\alpha)$ – для дизелей, α – коэффициент избытка воздуха при сгорании;

V_c и V_i – объем камеры сжатия и текущий объем цилиндра.

К преимуществам рассмотренной зависимости следует отнести ее достаточную универсальность, поскольку коэффициенты C_1 , C_2 и C_3 могут быть подобраны для широкого спектра двигателей и условий их применения. Если формула Вошни не даст удовлетворительных результатов, можно применить другие зависимости, описанные, к примеру, в [10].

2.4.5. Моделирование истечения рабочего тела через клапанные щели и неплотности кольцевого уплотнения

В процессе газообмена, см. уравнение (2.16), а также при наличии протечки рабочего тела через неплотности кольцевого уплотнения, см. уравнения (2.10) и (2.12), скорость изменения давления газа зависит от изменения массы газа в цилиндре $dM/d\phi$. При истечении сжимаемого газа, его мгновенный массовый расход составит:

$$G = \mu f \psi \sqrt{\frac{p}{v}}, \quad (2.64)$$

где: μ – коэффициент расхода; f – геометрическая площадь проходного сечения; ψ – функция истечения, p – давление газа в источнике; $v = 1/\rho$ – удельный объем газа.

Изменение массы газа:

$$\frac{dM}{d\varphi} = \frac{G}{6n} = \frac{\mu f \psi}{6n} \sqrt{\frac{p}{v}}, \quad (2.65)$$

где: n – скорость вращения коленчатого вала.

При истечении газа через непрофилированное сечение, его скорость может быть критической или подкритической. Критерием, позволяющим судить о режиме истечения, является критическое отношение давлений:

$$\beta = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (2.66)$$

где: k – показатель адиабаты.

Если соотношение давлений между стоком p_c и источником p_n будет $\frac{p_c}{p_n} \leq \beta$, то режим истечения газа будет критическим, и функция истечения не зависит от перепада давления:

$$\psi = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}}. \quad (2.67)$$

Если $\frac{p_c}{p_n} > \beta$, то режим истечения подкритический, и

$$\psi = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_c}{p_n} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_c}{p_n} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}. \quad (2.68)$$

По сути, дальнейшее определение изменения массы рабочего тела в цилиндре сводится к нахождению площадей проходных сечений органов газораспределения и площади протечки.

Площадь проходного сечения клапана с точностью до величин второго порядка малости определяется выражением:

$$f(\varphi) = \pi d_k h(\varphi) \cos \alpha, \quad (2.69)$$

где: d_k – диаметр клапана по середине притертой фаски; $h(\varphi)$ – текущая высота подъема клапана (определяется геометрически, в зависимости от профиля приводного кулачка); α – угол наклона фаски клапана, обычно составляющий 30 или 45°.

Расчет площадей проходного сечения органов газораспределения двухтактных двигателей представляет относительно сложную, но достаточно тривиальную геометрическую задачу, связанную в первую очередь, с формой продувочных окон. Подходы к решению этой задачи достаточно подробно изложены в [7].

Определенную сложность представляет задание коэффициента расхода органов газораспределения. Математически он может быть найден из выражения:

$$\mu = \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 + \xi}}, \quad (2.70)$$

где: ε – коэффициент сжатия струи истекающего газа; ξ – коэффициент местного сопротивления.

Расчетное определение ε и ξ вызывает значительные трудности. В результате единственным способом остается экспериментальный путь их определения. При проведении статических продувок [7], как правило, определяют непосредственные значения коэффициента расхода μ в зависимости от относительной площади проходного сечения органа газораспределения. В программу расчета рабочего процесса могут быть заданы как экспериментальные значения произведения μf – так называемой условной площади проходного сечения – в табличной форме, или в виде средних значений μ или его изменения при известных (расчетных) значениях геометрической площади проходных сечений. Из опыта расчетов известно, что для выпускных клапанов средние значения μ лежат в пределах 0,55...0,85, для впускных – 0,65...0,90. Следует также иметь в виду, что максимальные значения коэффициента расхода наблюдаются при малых подъемах клапанов и достигают своих минимальных значений при максимальном подъеме (благодаря значительному уменьшению ε).

При определении протечек рабочего тела через кольцевое уплотнение в расчетах рабочих процессов обычно не ставят задачу их точного определения, поскольку потери заряда для нормального (неизношенного) двигателя не превышают десятых долей процента от массы заряда. При необходимости учета протечки удобно выполнить настройку условной площади проходного сечения протечки $(\mu f)_n$ по базовому режиму. При проведении последующих расчетов $(\mu f)_n$ можно считать неизменной.

2.5. Организация процесса интегрирования

Описание процессов, происходящих в цилиндре двигателя на различных стадиях рабочего цикла, можно свести к системе уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{d\varphi} &= f_1\left(p, T, M, V, \frac{dx}{d\varphi}, \frac{dM_k}{d\varphi}, \frac{dV}{d\varphi}, \frac{dQ_w}{d\varphi} \dots\right), \\ \frac{dM}{d\varphi} &= f_2\left(\frac{dM_k}{d\varphi}\right) = \sum \frac{dM_k}{d\varphi}, \\ \frac{dx}{d\varphi} &= f_3(\varphi), \end{aligned} \quad (2.71)$$

где: f_1 – функция скорости изменения давления в цилиндре; f_2 – функция изменения массы рабочего тела, равная сумме втекающих (вытекающих) элементарных масс dM_k за промежуток $d\varphi$; f_3 – функция скорости тепловыделения.

Система (2.71) состоит из обыкновенных дифференциальных уравнений вида $y' = f(\varphi, y)$, которая в самом простом случае решается методом Эйлера, согласно которому, значение функции y в последующей точке вычисляется исходя из текущего значения самой функции и ее производной:

$$y_{i+1} = y_i + \frac{dy_i}{d\varphi} \Delta\varphi = y_i + y'_i \Delta\varphi = y_i + f(\varphi_i, y_i) \Delta\varphi, \quad (2.72)$$

где: $\Delta\varphi$ – шаг интегрирования по углу п.к.в.; индекс i соответствует текущему значению функции, $i+1$ – последующему.

Прямой метод Эйлера является относительно неточным даже при очень малых шагах интегрирования $\Delta\varphi$, в особенности при значительных

приращениях интегрируемой величины. Для повышения точности можно использовать усложненную схему Эйлера, согласно которой, определяется средняя производная функции на шаге, как

$$\frac{d\bar{y}}{d\varphi} = \frac{1}{2} \left(\frac{dy_i}{d\varphi} + \frac{dy_{i+1}}{d\varphi} \right), \quad (2.73)$$

для чего необходимо сначала воспользоваться (2.72) для расчета y_{i+1} . После вычисления производной в точке $i+1$, определяется средняя производная на шаге, согласно (2.73). Окончательное значение функции в точке $i+1$ определяется как

$$y_{i+1} = y_i + \frac{d\bar{y}}{d\varphi} \Delta\varphi. \quad (2.74)$$

Тем не менее, на практике вместо метода Эйлера, лучше использовать метод Рунге-Кутты 4-го порядка, обеспечивающий более высокую точность и сходимость решения, согласно которому вычисление функции в последующей точке проходит в четыре стадии:

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \Delta\varphi, \text{ где:}$$

$$\begin{aligned} k_1 &= f(\varphi_i, y_i), \\ k_2 &= f(\varphi_i + \Delta\varphi/2, y_i + k_1/2), \\ k_3 &= f(\varphi_i + \Delta\varphi/2, y_i + k_2/2), \\ k_4 &= f(\varphi_i + \Delta\varphi, y_i + k_3). \end{aligned} \quad (2.75)$$

При выборе шага интегрирования $\Delta\varphi$ следует иметь в виду, что его значения менее $0,1$ °п.к.в. уже не приводят к повышению точности интегрирования. Меньшие значения шага могут потребоваться только в случае моделирования процессов газообмена двухтактных двигателей с большими значениями площадей проходного сечения органов газораспределения для повышения устойчивости расчета.

Для реализации любого метода интегрирования необходимо задание начальных условий. В качестве момента начала интегрирования удобно принимать точку "а" рабочего цикла, соответствующую закрытию впускных органов газораспределения и фактическому началу сжатия. Для этого

момента термодинамические параметры газа легко рассчитываются по соотношениям, приведенным в параграфе 1.2, тогда:

$$p = p_a, T = T_a, M = M_a = p_a V_a / RT_a, \quad (2.76)$$

где: p_a – давление в камере сгорания в момент начала сжатия; V_a – объем цилиндра на момент "а"; T_a – температура заряда в точке "а"; M_a – масса заряда в этой же точке.

После прохождения всего цикла расчета по углу п.к.в., производится сравнение конечных значений величин давления и массы рабочего тела в цилиндре с первоначально заданными, т.е. расчет индикаторной диаграммы носит итерационный характер до достижения требуемой точности сходимости параметров в точке "а" рабочего цикла.

В процессе интегрирования системы (2.71) получают текущие значения давления и массы рабочего тела в цилиндре. Температура рабочего тела в каждый момент времени определяется по уравнению состояния:

$$T = pV / MR, \quad (2.77)$$

где: R – газовая постоянная смеси газов в цилиндре.

По окончании процесса интегрирования производят расчет индикаторных и эффективных показателей рабочего цикла и определяют составляющие теплового баланса.

2.6. Расчет индикаторных и эффективных показателей цикла

Среднее индикаторное давление в цилиндре:

$$p_i = \frac{1}{2\pi m} \int_0^{2\pi m} p(\varphi) dV = \frac{1}{2\pi m} \int_0^{2\pi m} p(\varphi) \psi(\varphi) d\varphi, \quad (2.78)$$

где: m – коэффициент тактности; $p(\varphi)$ – текущее давление в цилиндре; $\psi(\varphi)$ – функция угла поворота коленчатого вала:

$$\psi(\varphi) = \frac{V_h}{2} \left(\sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right), \quad (2.79)$$

где: λ – постоянная КШМ.

Индикаторная цилиндровая мощность:

$$N_{i1} = \frac{p_i V_h n}{60 m}. \quad (2.80)$$

Индикаторный момент от одного цилиндра:

$$M_{i1} = \frac{30 N_{i1}}{\pi n}. \quad (2.81)$$

Удельный индикаторный расход топлива:

$$g_i = \frac{G_{т1}}{N_{i1}}, \quad (2.82)$$

где: $G_{т1}$ – часовой расход топлива для одного цилиндра.

Индикаторный к.п.д.:

$$\eta_i = \frac{3600}{Q_H g_i}, \quad (2.83)$$

где: Q_H – низшая теплотворная способность топлива.

Коэффициент наполнения:

$$\eta_v = \frac{M_3}{M_k} = \frac{M_3 R T_k}{p_k V_h}, \quad (2.84)$$

где: M_3 – масса свежего заряда в цилиндре (подсчитывается как сумма элементарных масс поступающего в цилиндр воздуха в процессе наполнения); M_k – масса заряда, которая могла бы разместиться в цилиндре по условиям на впуске; T_k и p_k – температура и давление надувочного воздуха. Для двигателей внешнего смесеобразования коэффициент наполнения определяется по отношению к нормальным атмосферным условиям: T_0 и p_0 .

Коэффициент остаточных газов

$$\gamma_r = \frac{M_r \lambda}{M_a - M_r} \frac{\mu_3}{\mu_r}, \quad (2.85)$$

где: M_a – масса рабочего тела в точке "a" рабочего цикла; M_r – масса газа в цилиндре в конце продувки; λ – коэффициент очистки камеры сгорания; μ_3 и μ_r – молекулярные массы свежего заряда и остаточных газов.

Расход воздуха на двигатель:

$$G_B = M_B i, \quad (2.86)$$

где: M_B – масса воздуха, прошедшая через впускной клапан одного цилиндра в процессе продувки-наполнения, i – количество цилиндров в двигателе.

Средний за цикл коэффициент теплоотдачи:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{2\pi m} \int_0^{2\pi m} \alpha(\varphi) d\varphi. \quad (2.87)$$

Среднецикловая температура:

$$T_{cp} = \frac{1}{2\pi m} \int_0^{2\pi m} T(\varphi) d\varphi. \quad (2.88)$$

Результирующая температура:

$$T_{рез} = \frac{\int_0^{2\pi m} T(\varphi) \alpha(\varphi) d\varphi}{\int_0^{2\pi m} \alpha(\varphi) d\varphi}, \quad (2.89)$$

где: $T(\varphi)$ – текущая термодинамическая температура в камере сгорания; $\alpha(\varphi)$ – мгновенный средний по площади КС коэффициент теплоотдачи.

Эффективная мощность двигателя:

$$N_e = N_{il} i \eta_M, \quad (2.90)$$

где: η_M – механический к.п.д. двигателя.

Удельный эффективный расход топлива:

$$g_e = \frac{g_i}{\eta_M}. \quad (2.91)$$

Эффективный к.п.д.:

$$\eta_e = \eta_i \eta_M. \quad (2.92)$$

Среднее эффективное давление:

$$p_e = p_i \eta_M. \quad (2.93)$$

Крутящий момент на фланце отбора мощности:

$$M_e = M_{il} i \eta_M. \quad (2.94)$$

2.7. Расчетное определение составляющих теплового баланса

Знание составляющих теплового баланса позволяет оценить распределение тепловой энергии в двигателе, введенной с топливом, на полезно используемую и различные виды потерь. Исходя из этого, можно определить возможности утилизации тепла, рассчитать систему охлаждения, дать предварительную оценку теплонапряженности деталей двигателя и т.п. Располагаемая энергия сгорающего в двигателе топлива за 1 ч представляет собой произведение часового расхода топлива (для одного цилиндра) на его теплотворную способность:

$$Q_p = G_T Q_H \quad (2.95)$$

С точки зрения первого начала термодинамики, см. (2.14), полученная энергия может быть разложена на составляющие:

$$Q_p = Q_{нс} + Q_i + Q_\alpha + Q_\Gamma + Q_{пр}, \quad (2.96)$$

где: $Q_{нс}$ – потери теплоты, связанные с несовершенством процесса сгорания; Q_i – теплота, переведенная в индикаторную работу цикла; Q_α – теплота, отданная в стенки ЦПГ посредством теплопередачи; Q_Γ – теплота, уносимая из цилиндра отработавшими газами; $Q_{пр}$ – теплота, потерянная благодаря протечкам в ЦПГ.

Теплота, переведенная в работу цикла, раскладывается на теплоту, эквивалентную полезной (эффективной) работе Q_e и теплоту, израсходованную на покрытие механических потерь в двигателе $Q_{мех}$, тогда:

$$Q_p = Q_{нс} + Q_e + Q_{мех} + Q_\alpha + Q_\Gamma + Q_{пр}. \quad (2.97)$$

Далее будем исходить из того, что теплота диссипации энергии в узлах трения ДВС и передаваемая теплообменом в стенки КС выносятся из двигателя через системы жидкостного (воздушного) $Q_{охл}$ и масляного охлаждения Q_m . Кроме того, часть этой теплоты рассеивается стенками самого двигателя, ее отнесем в остаточный член теплового баланса $Q_{ост}$, туда же включим теплоту, потерянную с кинетической энергией ОГ и прочие потери (в том числе с протечками $Q_{пр}$). С учетом сказанного, приходим к “классическому” пониманию теплового баланса двигателя:

$$Q_p = Q_{nc} + Q_e + Q_\Gamma + Q_{охл} + Q_M + Q_{ост}. \quad (2.98)$$

Анализ теплового баланса можно вести как в виде (2.98), так и в виде (2.97), в зависимости от решаемых задач. В любом случае, составляющие этих уравнений удобно отнести к располагаемой энергии топлива, см. (2.95), тогда:

$$\begin{aligned} q_{nc} + q_e + q_\Gamma + q_{охл} + q_M + q_{ост} &= 1, \text{ или} \\ q_{nc} + q_e + q_{мех} + q_\alpha + q_\Gamma + q_{пр} &= 1, \end{aligned} \quad (2.99)$$

где в левой части уравнений имеем относительные доли каждой тепловой составляющей. Рассмотрим их по отдельности.

Составляющая q_{nc} для бензиновых и дизельных двигателей носит различный характер. Существенную долю потерь в бензиновом двигателе обуславливает процесс сгорания при коэффициенте избытка воздуха $\alpha < 1$ и определяется химическим недогоранием топлива: $q_{хим} = \Delta Q_n / Q_n$. При $\alpha \geq 1$ $q_{хим} = 0$. Однако остаются потери, связанные с неполным испарением топлива, его потерей при продувке, затуханием процесса сгорания в пристеночной зоне и пр. Эти потери, как правило, относят в $q_{ост}$, но если в расчете они напрямую задаются, см. (2.36) и (2.37), тогда их стоит относить непосредственно к q_{nc} , тогда:

$$q_{nc} = q_{хим} + (1 - x_{max}), \quad (2.100)$$

где: x_{max} – максимальная доля выгоревшего топлива.

В дизеле также существуют потери, связанные с недогоранием топлива, которые особенно значительны при понижении коэффициента избытка воздуха α ниже предела дымления. Для учета этих потерь часто используют эмпирическую зависимость $x_{max} = th \alpha$. Тогда $q_{nc} = 1 - x_{max}$. Однако в “классическом” анализе чаще эти потери относят к $q_{ост}$.

Вторая составляющая уравнений (2.99) q_e в точности равна эффективному к.п.д. η_e . Израсходованная на механические потери доля теплоты $q_{мех}$ определяется по известному значению механического к.п.д. η_M :

$$q_{мех} = q_i - q_e = q_i(1 - \eta_M) = \eta_i(1 - \eta_M), \quad (2.101)$$

поскольку q_i равно индикаторному к.п.д. η_i .

Составляющая Q_α может быть определена параллельно основному процессу интегрирования системы (2.71), тогда:

$$Q_\alpha = \frac{60n}{m} \times \frac{1}{6n} \int_0^{2\pi m} \alpha(\varphi) [T(\varphi) - T_w] F(\varphi) d\varphi ; \quad q_\alpha = \frac{Q_\alpha}{G_T Q_H} , \quad (2.102)$$

где: $\alpha(\varphi)$, $T(\varphi)$ и $F(\varphi)$ – мгновенные значения коэффициента теплоотдачи в камере сгорания, термодинамической температуры и площади КС; m – коэффициент тактности; $60n/m$ – количество циклов в час.

Доля потерянной энергии с протечками рабочего тела через кольцевое уплотнение $q_{пр}$ также определяется прямым интегрированием:

$$q_{пр} = \frac{\frac{60n}{m} \times \int_0^{2\pi m} c_p^{пр}(\varphi) T_{пр}(\varphi) \frac{dM_{пр}}{d\varphi} d\varphi}{G_T Q_H} , \quad (2.103)$$

где: $dM_{пр}/d\varphi$, $c_p^{пр}(\varphi)$ и $T_{пр}(\varphi)$ – мгновенные значения расхода протечки, ее удельной теплоемкости и температуры. Следует иметь в виду, что основная доля протечки приходится на такты сжатия-расширения, т. е. при интегрировании можно обойтись только этим промежутком времени цикла, тогда указанные величины принимаются по параметрам газа в цилиндре.

Доля теплоты, уносимая отработавшими газами q_Γ , относя сюда все оставшиеся потери, с точки зрения второго уравнения (2.99) может быть определена как

$$q_\Gamma = 1 - q_{нс} - q_e - q_{мех} - q_\alpha - q_{пр} . \quad (2.104)$$

Для составления баланса по первому уравнению (2.99) необходим более детальный расчет q_Γ . Эта доля может быть подсчитана как относительная разность энергий покидающего цилиндр отработавшего газа и втекающего в него свежего заряда:

$$q_\Gamma = \frac{\frac{60n}{m} \times \left[\int_0^{2\pi m} c_{p2}(\varphi) T_2(\varphi) \frac{dM_2}{d\varphi} d\varphi - \int_0^{2\pi m} c_{p1}(\varphi) T_1(\varphi) \frac{dM_1}{d\varphi} d\varphi \right]}{G_T Q_H} , \quad (2.105)$$

где: $c_{p1}(\varphi)$, $c_{p2}(\varphi)$ – мгновенные значения изобарной теплоемкости рабочего тела, перетекающего через впускные и выпускные органы соответственно;

$T_1(\varphi)$, $T_2(\varphi)$ – температуры газа, перетекающего через эти же органы; $dM_1/d\varphi$ и $dM_2/d\varphi$ – элементарные расходы свежего заряда и ОГ.

В любом случае, из q_{Γ} можно выделить долю теплоты, отдаваемую в стенки газоздушных ганалов (ГВК) головки цилиндра и охлаждаемых коллекторов, т.е.:

$$q_{ог} = q_{\Gamma} - q_{ГВК} - q_{ок}, \quad (2.106)$$

где: $q_{ог}$ – доля энергии отработавших газов с учетом теплообмена со стенками газоздушного тракта. Методики расчета теплообмена в ГВК и коллекторах рассмотрены здесь же, в параграфе 7.2, а сами доли $q_{ГВК}$ и $q_{ок}$ можно определить, по формулам, аналогичным (2.102).

Доля теплоты, отданная в систему охлаждения $q_{охл}$ может быть подсчитана, исходя из внешнего баланса:

$$q_{охл} = \frac{c_{охл} (T_{вых} - T_{вх}) G_{охл}}{i G_{\Gamma} Q_H}, \quad (2.107)$$

где: $c_{охл}$ – удельная теплоемкость охлаждающей жидкости (ОЖ); $G_{охл}$ – расход ОЖ на двигатель; i – количество цилиндров в двигателе; $T_{вых}$ и $T_{вх}$ – температуры ОЖ на выходе и входе в двигатель.

Доля теплоты, выведенная из двигателя через охладитель моторного масла q_m рассчитывается по зависимости, аналогичной (2.107). Если охладитель масла отсутствует, то q_m не подсчитывают, относя ее в $q_{ост}$.

Величины $q_{охл}$, q_m и $q_{ог}$ используют в расчетах систем охлаждения, смазки и турбонаддува.

Остаточная доля $q_{ост}$ в первом уравнении (2.99) определяется как невязка при известных остальных составляющих:

$$q_{ост} = 1 - q_{нс} - q_e - q_{\Gamma} - q_{охл} - q_m, \quad (2.108)$$

таким образом, на величину $q_{ост}$ оказывает влияние погрешность определения всех составляющих теплового баланса.

Для приближенной оценки составляющих теплового баланса существуют полуэмпирические зависимости, приведенные, к примеру, в [9]. Они, как правило, используются на предварительной стадии расчета систем ДВС.

3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И РАСЧЕТ РАБОЧИХ ЦИКЛОВ ДВС С ОТКРЫТОЙ КАМЕРОЙ СГОРАНИЯ

Описанная в предыдущей главе методика, реализована в виде программы-солвера, написанной на языке Microsoft Fortran (MS Fortran Power Station 4.0), работающей в среде DOS и Windows. К настоящему моменту программа имеет значительное количество версий и постоянно развивается. В этой главе будут рассмотрены наиболее типичные примеры расчета двигателей с открытой камерой сгорания с использованием последней версии программы по состоянию на 2018 г.¹.

Общим для всех версий программы является наличие препроцессора, предназначенного для создания и работы с файлами исходных данных, при помощи которых выполняются оптимизационные расчеты. В конце своей работы программа-солвер выгружает текстовый протокол, файлы для вывода графической информации и файл, содержащий индикаторную диаграмму для передачи ее в другие расчетные модули (динамического расчета, кольцевого уплотнения, токсичности ОГ и пр.)

3.1. Подготовка исходных данных для расчета

В таблице 3.1 приводится полный список исходных данных к расчету рабочих процессов бензиновых, дизельных и газопоршневых двигателей с учетом их конструктивных особенностей и возможностей программы.

Таблица 3.1. Номер группы параметров, обозначение вводимых данных и пояснения к выбору исходных данных к расчету рабочего процесса ДВС

№ гр.	Обозначение параметра	Пояснения к выбору данных
1	TEXT	Текстовая информация о двигателе, режиме работы и т.д. – 40 позиций.
2	VAR	Номер варианта расчета XXX (по этому номеру записывается файл протокола типа iprXXX.txt) – 3 позиции.
3	MT	Коэффициент тактности: 1 – двухтактные, 2 – четырехтактные.

¹ Полное описание текущей версии программы по состоянию на 2018 г. приведено в документе «Описание применения» ПМК RP-TOX-2018 RU.02068574.02018-02 31, см. Приложение.

Таблица 3.1. Продолжение

4	NDTV	<p>Номер желаемой динамики тепловыделения (ДТВ):</p> <p>1 – используется, как правило, для двигателей с внешним смесеобразованием (бензиновые с искровым зажиганием);</p> <p>2 – используется для дизелей с КС открытого типа;</p> <p>3 – используется для дизелей с КС полуразделенного типа;</p> <p>4 – используется для дизелей с открытыми КС – в целом аналог ДТВ_2, но в данной методике реализован расчет параметров тепловыделения в зависимости от форсировки двигателя, геометрии КС и режима работы;</p> <p>5 – используется для дизелей с открытыми КС – аналог ДТВ_4, но здесь требуется задание в табличной форме дифференциальной или интегральной характеристики подачи топлива не менее, чем по 4-м точкам. Характеристики тепловыделения по Б.П. Пугачеву рассчитываются с учетом формы дифференциальной характеристики топливоподачи.</p>
5	NPF	<p>Параметр наличия предварительной (пилотной) фазы впрыска: 1 – нет, 2 – да. Предварительная фаза может быть использована вкуче с любой динамикой тепловыделения, но имеет смысл только для дизеля.</p>
6	KDV	<p>Тип двигателя. В зависимости от него выбирается тот или иной способ задания режимных параметров и расхода топлива, по-разному рассчитывается теплообмен и СНх:</p> <p>1 – дизельный; 2 – бензиновый (задан коэффициент избытка воздуха и дроссель); 3 – бензиновый (задан расход топлива и дроссель); 4 – газовый (+газодизельный).</p>
7	ICIL	<p>Количество цилиндров в двигателе (в двухтактном двигателе с ПДП на один цилиндр приходится два поршня!).</p>
8	KPR	<p>Параметр записи файла протокола:</p> <p>0 – минимальный;</p> <p>1 – полный;</p> <p>2 – полный с тепловым балансом рабочего цикла;</p> <p>3 – полный с тепловым балансом рабочего цикла и составом ОГ на выпуске;</p> <p>4 – полный с тепловым балансом, составом ОГ на выпуске и таблицей параметров по углу п.к.в.</p>

Таблица 3.1. Продолжение

9	S, D	Ход поршня и диаметр цилиндра, [м], (0,010...1,500).
10	EPS	Геометрическая степень сжатия (для двигателя с ПДП определяется по ходу одного поршня и воображаемой средней линии между ВМТ выпускного и продувочного поршней) (обычный диапазон 5,00...35,00).
11	LAM	Постоянная КШМ (отношение радиуса кривошипа к длине шатуна), (0,200...0,350).
12	EXD	Дезаксаж КШМ, [мм]: если он выполнен по ходу вращения коленчатого вала, то он положительный, если нет – отрицательный, (-10,00...10,00).
13	UGOL	Угол сдвига фаз коленчатых валов в двигателе с ПДП – если он <u>не нулевой</u> , это является признаком данного типа двигателя, положительный угол показывает отставание фазы продувочного поршня относительно выпускного (обычно 10...20 °п.к.в.), задать угол не нулевым можно для любого типа двигателя.
14	N	Частота вращения коленчатого вала, [об/мин], (0...50000).
15	GT	Часовой расход топлива на режиме в расчете на один цилиндр двигателя, (0,00...1000,00).
16	ALTVS	Коэффициент избытка воздуха в подаваемой в двигатель смеси, (0,400...1,600 и более)
17	DR0S	Доля открытия дроссельной заслонки – относительная величина, показывающая долю открытой площади проходного сечения на впуске с учетом местных потерь, (0,001...1,000).
18	ETAM	Механический к.п.д. двигателя на режиме, (0,001...1,000).
19	ENMEX	Мощность механических потерь на режиме, [кВт]. Не нулевым может быть задано либо ETAM, либо ENMEX, если и тот и другой параметры нулевые, расчет эффективных показателей не производится. При расчете характеристики холостого хода рекомендуется либо не рассчитывать эффективные показатели (ICIL = 0), либо использовать известную мощность механических потерь, либо ETAM = 0,001.

Таблица 3.1. Продолжение

21	QT	Низшая теплотворная способность жидкого топлива, [МДж/кг], в первом приближении можно оценивать по формуле Менделеева и данным обработки химического состава топлива, или по табличным данным, или по другим экспериментальным данным. Если задана нулевой, то рассчитывается в программе по Менделееву [2] на основе заданного элементарного состава (см. ниже) с учетом примесей и воды, (0,00...103,00)
22	SMT	средняя молярная масса углеводородов топлива, [кмоль/кг]. Бензин – 110...120, ДТ – 160...230, метанол – 32 и т.д.
23	C, H, OT	Массовые доли углерода, водорода и кислорода в топливе по элементарному составу, см. [2], (0,000...1,000).
24	ST, ANT, H2OT	Процентные по массе содержания серы, азота и воды в топливе, (0,000 и выше), подробнее – см. [2] и НТД на топливо.
25	OCHI	Октановое число топлива по исследовательскому методу.
26	CCHM	Цетановое число топлива: не нулевым задается либо OCHI, либо CCHM, либо и то и другое, (0,0...100,0)
27	ROT	Плотность топлива, [кг/м ³], (0,0...1000,0)
28	QN_G2, C_G2, H_G2, O_G2	Параметры газового топлива: Низшая теплотворная способность газового топлива, [МДж/кг]; Массовая доля углерода в газовом топливе по элементарному составу, (0,000...1,000); Массовая доля водорода в газовом топливе по элементарному составу, (0,000...1,000); Массовая доля кислорода в газовом топливе по элементарному составу, (0,000...1,000).
29	SMUGAZ, DG_G2, T_G2, ITZ	Усредненная молярная масса газового топлива, кг/кмоль; Расход газа, кг/ч, на один цилиндр для типа задачи 1 или доля замещения жидкого топлива газом – для типа задачи 2; Температура подаваемого газа, [K]; Тип задачи: 1 - любые соотношения жидкого топлива и газа, здесь вместо DG_G2 задается напрямую расход газа; 2 – подгонка доли газа под базовую альфу (базовый режим следует предварительно рассчитать с альфой, которая планируется на газу)

Таблица 3.1. Продолжение

30	FH21, FH22, GVBAZ	<p>Угол начала подачи газа, [° п.к.в.]; Угол конца подачи газа, [° п.к.в.]. Фазы подачи газа – начало и конец подачи по углу п.к.в. находятся в пределах угла закрытия выпуска и угла начала видимого сгорания (при расположении фаз подачи на стадии наполнения – впрыск в коллектор, на такте сжатия – впрыск в цилиндр, если фазы подачи накрывают угол закрытия выпуска, то туда и сюда). Базовый расход воздуха на двигатель, имеет значение при настройке расхода воздуха при подаче газа в коллектор (хотя бы и частично). Тогда программа выдает рекомендацию для изменения DROS – дросселя, расположенного на входе в цилиндр, для корректировки расхода воздуха на величину, определяемую вытеснением воздуха газом. При подаче газа только в цилиндр данный параметр не используется и значения не имеет.</p>
31	FIPF, VPF	<p>Параметры предварительной части впрыска (если NPF = 2): Угол опережения впрыска для предварительной фазы, (обычно –15,00...–40,00 °п.к.в.); Объем подаваемого топлива в предварительной фазе, [мм³], (обычно 1,00...5,00).</p>
32	TRP, ТКК, PKP, PKK	<p>Средние за цикл и площади поверхности температуры стенок КС – поршня и крышки, [K], (< 999,9); Поправки для расчета площадей поршня и крышки (1.000 и более).</p>
33	TGG, TG1, TG2, STZ, CUKCM	<p>Температуры гильзы цилиндра в верхнем, среднем и нижнем поясах, [K], (< 999,9); Зазор между поршнем и головкой в ВМТ, [м]; Относительная скорость закрутки потока на впуске.</p>
34	FIZ, M, FHC, XMAX	<p>Параметры тепловыделения по И.И. Вибе (NDTV = 1): Условная продолжительность сгорания, (50,0...90,0 °п.к.в.); Показатель характера сгорания, (обычно 1,5...3,5); Угол начала видимого сгорания, (обычно –10...–25 °п.к.в.); Максимальная доля выгорания топлива – учитывает недогорание в пристеночной зоне и неиспарившееся топливо. Недогорание, связанное с коэффициентом избытка воздуха меньшим единицы, учитывается изменением низшей теплотворной способности в самой программе.</p>

Таблица 3.1. Продолжение

35	<p>X1, X2</p> <p>FI1, FI2</p> <p>K1, K2</p> <p>FHC</p>	<p>Параметры тепловыделения по Б.П. Пугачеву (NDTV= 2):</p> <p>Доли выгорания топлива в кинетической и диффузионной фазах сгорания, ($X1 = 0,100 \dots 0,400$, $X2 = 1,000 - X1$);</p> <p>Углы достижения максимума скорости тепловыделения, ($FI1 = 3,0 \dots 6,0$ °п.к.в., $FI2 = 20,0 \dots 40,0$ °п.к.в.);</p> <p>Параметры жесткости сгорания: ($K1$ обычно около 2,0, $K2 = 1,5 \dots 2,5$);</p> <p>Угол начала видимого сгорания, (обычно $-5 \dots -15$ °п.к.в.).</p>
36	<p>XP1, XP2, XP3</p> <p>FP1, FP2, FP3</p> <p>KP1, KP2, KP3</p> <p>FHC</p> <p>FHC2</p>	<p>Параметры пристеночного тепловыделения по Б.П. Пугачеву (NDTV = 3):</p> <p>Доли выгорания топлива в кинетической, диффузионной и пристеночной фазах сгорания, ($XP1 = 0,100 \dots 0,200$, $XP2 = 0,200 \dots 0,600$, $XP3 = 1 - XP1 - XP2$);</p> <p>Углы достижения максимума скорости тепловыделения, ($FP1 = 3,0 \dots 5,0$, $FP2 = 20,0 \dots 40,0$, $FP3 = 15,0 \dots 30,0$ °п.к.в.);</p> <p>Параметры жесткости сгорания, ($KP1$ обычно около 2,0, $KP2 = 1,5 \dots 2,5$, $KP3 = 1,5 \dots 2,0$);</p> <p>Угол начала видимого сгорания, (обычно $-5 \dots -15$ °п.к.в.);</p> <p>Угол начала сгорания пристеночной фазы, ($-5 \dots 10$ °п.к.в.).</p>
37	<p>FHC</p> <p>FVG</p> <p>DIKAM</p> <p>ZX1</p> <p>ZFI2</p>	<p>Параметры тепловыделения по Б.П. Пугачеву (NDTV = 4):</p> <p>Угол начала подачи топлива, (обычно $-15 \dots -25$ °п.к.в.);</p> <p>Продолжительность впрыска топлива, ($15 \dots 40$ °п.к.в.);</p> <p>Эквивалентный диаметр камеры, [м] – т. е. диаметр профилированной части поверхности поршня, ($\approx 0,7 \dots 0,8 D$).</p> <p>Настроечный коэффициент уменьшения доли топлива, выгорающей в кинетической фазе за счет попадания топлива на стенку КС, (величина = 1,0 и менее);</p> <p>Настроечный параметр (выражаемый в углах п.к.в.) для оттяжки максимума скорости тепловыделения в кинетической фазе при наличии испарения пленки топлива, (от 0 и выше).</p>

Таблица 3.1. Продолжение

38	<p>KTTV</p> <p>IGC</p> <p>DGC(I), I = 1, KTTV</p>	<p>Параметры тепловыделения по NDTV = 5 (в дополнение к параметрам по NDTV = 4):</p> <p>Количество точек таблицы характеристики топливоподачи, (4...51 шт.);</p> <p>Признак вида задаваемой характеристики: 1 – дифференциальная, 2 – интегральная;</p> <p>Таблица дифференциальной или интегральной характеристики подачи, единицы задания безразличны, поскольку производится нормировка характеристики по заданной цикловой подаче.</p>
39	<p>FOVP, FZVP, FOVIP, FZVIP</p>	<p>Фазы газораспределения:</p> <p>Угол открытия впуска, (4-тактные, обычно 300,0...350,0),</p> <p>Угол закрытия впуска, (560,0...600,0 °п.к.в.),</p> <p>Угол открытия выпуска, (90,0...150,0 °п.к.в.),</p> <p>Угол закрытия выпуска, (370,0...420,0 °п.к.в.),</p> <p>отсчет углов привязан к ВМТ рабочего хода.</p>
40	<p>PK, PP</p> <p>TK, TP</p>	<p>Параметры газа на впуске и выпуске:</p> <p>Давления, [бар], перед впускным и за выпускным клапанами, задаются с учетом потерь давления при прохождении газов по впускному и выпускному трактам соответственно, являются средними величинами за период фазы газообмена.</p> <p>Температуры, [K], перед впускным и за выпускным клапанами – средние величины за период фазы газообмена.</p>
41	<p>NVR</p>	<p>Способ задания проходных сечений клапанов (1, 2, 3, 4):</p> <p>1-й способ самый простой, но весьма приближенный, представляет собой аппроксимацию реальных диаграмм площадей косинусоидальными трапециями;</p> <p>2-й способ требует знания диаграммы подъема клапанов – $h(Fi)$, т.е. необходим предварительный расчет кинематики кулачкового механизма;</p> <p>3-й способ требует наличия статических продувок каналов головки цилиндров на расчетных режимах;</p> <p>4-й способ (комбинированный геометрический) требует задания геометрических параметров продувочных окон или клапанов (введено в основном для 2-х тактных ДВС, но подходит и для 4-х тактных).</p>

Таблица 3.1. Продолжение

42	<p>FM2, FM1</p> <p>FIM2, FIM1</p> <p>KL2, KL1</p>	<p>Параметры задания диаграммы проходных сечений клапанов по способу $NVR = 1$:</p> <p>Условные суммарные максимальные площади проходных сечений органов впуска и выпуска с учетом коэффициента расхода клапана на данном режиме работы двигателя;</p> <p>Углы от начала открытия клапана до достижения условной максимальной площади проходного сечения, (50...120 °п.к.в.);</p> <p>Количество впускных и выпускных клапанов.</p>
43	<p>DK2</p> <p>MU2</p> <p>AL2</p> <p>KL2</p> <p>DK1, MU1, AL1, KL1</p>	<p>Параметры задания диаграммы проходных сечений клапанов по способу $NVR = 2$:</p> <p>Диаметр впускного клапана, определенный по середине притирочного пояса фаски седла, [мм];</p> <p>Минимальное значение коэффициента расхода за всю фазу впуска, которое наблюдается, как правило, при полном открытии клапана, (обычно для высокооборотных бензиновых двигателей – 0,4...0,8; для дизелей – 0,7...0,9);</p> <p>Угол скоса тарелки клапана, обычно 30 или 45°;</p> <p>Количество впускных клапанов, (1...3 шт.);</p> <p>Те же параметры, для выпускного клапана (коэффициенты расхода и диаметры впускных клапанов, как правило, несколько больше, чем выпускных);</p>
44	<p>NPK2,</p> <p>HVP(I),</p> <p>I = 1, NPK2</p> <p>NPK1,</p> <p>HVIP(I),</p> <p>I = 1, NPK1</p>	<p>Количество точек таблицы подъема впускного клапана, (необходимо иметь минимум 12...15 точек);</p> <p>Таблица подъема впускного клапана, [мм];</p> <p>Те же параметры для выпускного клапана.</p> <p><i>Предупреждение:</i> неправильное задание конструктивных параметров органов продувки цилиндра приводит к весьма распространенным ошибкам, которые выражаются в виде больших отрицательных мощностей как тактов продувки, так и за цикл в целом, а также неверных значений параметров газообмена – коэффициента остаточных газов, коэффициента наполнения, коэффициента продувки.</p>

Таблица 3.1. Продолжение

45	<p>NPK2</p> <p>MF2(I), I = 1, NPK2</p> <p>NPK1, MF1(I), I = 1, NPK1</p>	<p>Параметры задания диаграммы проходных сечений клапанов по способу $NVR = 3$: Количество точек таблицы диаграммы условных проходных сечений для выпускных органов, (необходимо иметь минимум 12...15 точек); Таблица диаграммы условных проходных сечений μF для впускных органов (задаются суммарные величины), $[см^2]$; То же для выпускных органов газораспределения.</p>
46	KF2, KF1	<p>Параметры задания площадей органов газораспределения по способу $NVR = 4$: Параметры типа органа газораспределения для впуска и выпуска: 1 – клапанный механизм; 2 – продувочные окна. Заглушка: окна можно задавать только для 2Т двигателей.</p>
47	<p>DK2, HK2, AL2, MU2, KL2, FIM2</p>	<p>Параметры впускных клапанов ($KF2=1$): Базовый диаметр клапана, $[мм]$; Максимальная высота подъёма клапана, $[мм]$; Угол скоса тарелки клапана, $[°]$; Коэффициент расхода клапана; Количество впускных клапанов; Угол от начала открытия впускного клапана до достижения условной максимальной площади проходного сечения, $50...120 [° \text{ п.к.в.}]$</p>
48	<p>DK2, HK2,</p> <p>KO2, MU2, KL2, FIM2</p>	<p>Параметры впускных окон ($KF2=2$): Ширина окна, $[мм]$; Высота окна, $[мм]$; Тип окон: (1 – трапециевидные, 2 – эллипсоидные); Коэффициент расхода; Количество впускных окон; Угол полного открытия золотника на впуске: 0 – золотника нет, а фаза впуска симметрична относительно ВМТ; не 0 – золотник есть, фаза впуска несимметрична в начале процесса впуска, золотник открывается от начала</p>

Таблица 3.1. Продолжение

48		<p>фазы выпуска до угла FIM2, большего, чем угол открытия выпуска FOVP, площадь сечения изменяется линейно от нуля до текущей площади окна.</p> <p>В оболочке должна быть проверка: $FOVP < FIM2 < 180^\circ$ с запросом корректировки.</p>
49	<p>DK1, HK1, AL1, MU1, KL1, FIM1</p>	<p>Параметры выпускных клапанов (KF1=1):</p> <p>Базовый диаметр клапана, [мм];</p> <p>Максимальная высота подъёма клапана, [мм];</p> <p>Угол скоса тарелки клапана, [°];</p> <p>Коэффициент расхода клапана;</p> <p>Количество выпускных клапанов;</p> <p>Угол от начала открытия выпускного клапана до достижения условной максимальной площади проходного сечения, 50...120 [° п.к.в.]</p>
50	<p>DK1, HK1, KO1, MU1, KL1, FIM1</p>	<p>Параметры впускных окон (KF1=2):</p> <p>Ширина окна, [мм];</p> <p>Высота окна, [мм];</p> <p>Тип окон: (1 – трапециевидные, 2 – эллипсоидные);</p> <p>Коэффициент расхода;</p> <p>Количество впускных окон;</p> <p>Угол начала закрытия золотника на выпуске: 0 – золотника нет, а фаза выпуска симметрична относительно ВМТ; не 0 – золотник есть, фаза выпуска несимметрична в конце выпуска, золотник закрывается от угла FIM1, меньшего, чем угол закрытия выпуска FZVIP, площадь сечения изменяется линейно от текущей площади окна до нуля.</p> <p>В оболочке должна быть проверка: $180^\circ < FIM1 < FZVIP$ с запросом корректировки</p>
51	<p>D11, D22</p>	<p>Условные продолжительности выпуска чистых ОГ и частичного перемешивания от продолжительности всей фазы продувки, (обычно D11 = 0,10...0,40, D22 = 0,20...0,50, остальное считается фазой полного перемешивания свежего заряда и ОГ).</p>

Таблица 3.1. Продолжение

51		<p><i>Предупреждение:</i> неправильная настройка этих параметров может привести к ошибкам в определении параметров газообмена – коэффициентов остаточных газов, наполнения и продувки, в также расхода воздуха через двигатель и, как следствие, суммарного коэффициента избытка воздуха.</p>
52	<p>FEKV</p> <p>DPZ</p> <p>PKG</p> <p>TKG</p>	<p>Параметры для расчета протечек в ЦПГ: Условная площадь проходного сечения, открытого для протечек рабочего тела из камеры сгорания в подпоршневое пространство $\mu F_{пр}$, [мм²], является фиксированной величиной когда DPZ = 0 и подлежит расчетному уточнению, если задана фиксированная доля потери заряда, не равная нулю. При фиксации доли потери заряда рекомендуется задавать значения начального приближения эквивалентной площади протечек близкие к реальным и проводить уточнения до нулевых дисбалансов – для повышения точности расчета эквивалентной площади.</p> <p>Доля потери заряда через неплотности кольцевого уплотнения за цикл в процентах к массе исходного заряда. Для фиксации уловной площади FEKV, задается равной нулю. Если задано FEKV = 0 и DPZ = 0, то протечек рабочего тела нет;</p> <p>Давление картерных газов, [бар], (0,97...1,05); Температура картерных газов, [K], (340,0...370,0)</p>
53	<p>DO2,</p> <p>EGR</p>	<p>Параметры состава воздуха и системы EGR: объемная доля кислорода в воздухе; объемная доля рециркуляции ОГ (от 0 и более).</p>
54	<p>IREZ,</p> <p>CH0,</p>	<p>Параметры базового режима (для расчетного определения СН по эмпирическим зависимостям): Способ задания базового режима: 1 – размерный; 2 – относительный. Измеренное значение остаточных (несгоревших) углеводородов на базовом режиме (топливные+масляные), ppm. Если текущий режим задается как «базовый», то данная величина напрямую воспринимается как измеренное значение на режиме и не корректируется. Если текущий режим отличается от базового по оборотам/нагрузке как в большую, так и в меньшую сторону, заданная величина СН0 подвергается корректировке по эмпирическим зависимостям.</p>

Таблица 3.1. Окончание

54	<p>SMUCH, UGAR, SMUMC</p>	<p>Если задается $CH_0=0$, осуществляется его приближенный расчет в зависимости от типа двигателя (бензин/газ/дизель), тактности и коэффициента избытка воздуха по эмпирическим зависимостям с учетом угара смазки. Средняя (измеренная) молярная масса несгоревших углеводородов, [кг/кмоль]. Если задается $SMUCH=0$, осуществляется приближенный расчет в зависимости от молярной массы топлива и типа двигателя (бензин/газ/дизель) по эмпирическим зависимостям с учетом угара смазки. Расход масла на угар, % к расходу топлива на номинальном режиме. Если задается $UGAR=0$, то масляная составляющая СН не учитывается. Средняя молярная масса компонентов моторного масла, [кг/кмоль]. Если задается $SMUMC=0$, молярная масса масла выбирается автоматически.</p>
55	<p>Notn, Motn</p>	<p>IREZ=1 – размерный способ задания базового режима (за базовый рекомендуется принимать номинальный режим работы двигателя): скорость вращения коленчатого вала двигателя на базовом режиме, об/мин; эффективный момент на базовом режиме, н·м.</p>
56	<p>Notn, Motn</p>	<p>IREZ=2 – относительный способ задания текущего (рассчитываемого) режима: Относительная скорость вращения коленчатого вала двигателя на текущем режиме, %. Для номинального режима принимается 100%. Если известно измеренное значение СН для любого другого скоростного режима, за 100% может быть принят именно он. Относительная нагрузка (M_e или P_e) на текущем режиме, %. Для номинального режима принимается 100%. Если известно измеренное значение СН для любого другого нагрузочного режима, за 100% может быть принят именно он.</p>

Далее, в примерах расчета, будут приведены исходные данные в обозначениях, использованных в таблице 3.1.

3.2. Примеры расчета рабочего процесса ДВС различных типов

В данном параграфе рассмотрим примеры расчета наиболее типичных вариантов ДВС, такие как четырехтактные бензиновый и дизельный двигатели с различными способами смесеобразования, а также двухтактные и газовые двигатели.

3.2.1. Быстроходный четырехтактный бензиновый двигатель

Для примера расчета используем данные по широко распространенному в России впрысковому бензиновому двигателю ВАЗ-2111. Полный список исходных данных к расчету приведен в таблице 3.2 (построчно, в соответствии с файлом исходных данных и обозначениями по таблице 3.1).

Таблица 3.2. Исходные данные к моделированию рабочего процесса быстроходного четырехтактного бензинового двигателя

№ строки	Параметры	Обозначения в соответствии с таблицей 3.1
1	VAZ - 2111. Nominal. N=5600	TEXT
2	*** Variant 001 ***	VAR
3	2 1 1 2 4 3	MT, NDTV, NPF, KDV, ICIL, KPR
4	.071 .082 10.5 .284 -2.00 .0	S, D, EPS, LAM, EXD, UGOL
5	5600 .920 1.00 .000 20.5	N, ALFA, DROS, ETAM, ENMEX
6	43.00 105.0 .845 .135 .020	QT, SMT, C, H, OT,
7	.001 .000 .000	ST, ANT, H2OT
8	95.0 .0 720.0	OCHI, CCHM, ROT
9	540.0 520.0 1.050 1.200	TPP, TKK, PKP, PKK
10	420.0 400.0 390.0 0.0010 0.000	TGG, TG1, TG2, STZ, CUKCM
11	56.0 1.90 -15.0 0.990	FIZ, M, FHC, XMAX
12	347.0 595.0 125.0 373.0	FOVP, FZVP, FOVIP, FZVIP
13	.990 1.100 320.0 1100.0	PK, PP, TK, TP
14	2	NVR
15	34.00 0.75 45.0 1	DK2, MU2, AL2, KL2
16	28.00 0.75 45.0 1	DK1, MU1, AL1, KL1
17	32	NPK2
18	0.00 0.40 0.80 1.35 2.08 2.95	HVP (I), I=1, NPK2
19	3.82 4.73 5.62 6.44 7.15 7.76	
20	8.26 8.62 8.87 9.00 9.00 8.87	
21	8.62 8.26 7.76 7.15 6.44 5.62	
22	4.73 3.82 2.95 2.08 1.35 0.80	
22	0.40 0.00	
23	32	NPK1

24	0.00	0.28	0.57	1.01	1.72	2.59	HVIP (I) , I=1, NPK1
25	3.49	4.37	5.40	6.12	6.90	7.57	
26	8.13	8.57	8.85	9.00	9.00	8.85	
27	8.57	8.13	7.57	6.90	6.12	5.40	
28	4.37	3.49	2.59	1.72	1.01	0.57	
29	0.28	0.00					
30	0.200	0.200	1.000	370.0			
31	0.210	0.000					DO2, EGR
32	2	0.0	0.0	0.200	0.0		IREZ, CH0, SMUCH, UGAR, SMUMC
	100.00		100.00				Notn, Motn

В качестве пояснений к выбору исходных данных необходимо привести следующее:

1. Для описания процесса тепловыделения используем методику И.И. Вибе для послойного выгорания гомогенной смеси ($NDTV = 1$).

2. Коэффициент избытка воздуха на режиме и мощность механических потерь приняты в соответствии с имеющимися экспериментальными данными.

3. Температуры стенок КС приняты в соответствии со среднестатистическими данными.

4. Используемое топливо – бензин АИ-95 с добавками оксигенатов, массовое содержание кислорода в топливе – 2,0 %.

5. Параметры тепловыделения настроены по мощностным параметрам двигателя на режиме.

6. Двигатель имеет систему воздухообмена, реализующую акустический наддув с настройкой на средние частоты вращения коленчатого вала. На номинальных оборотах акустический эффект отсутствует.

7. В расчете использованы реальные фазы газораспределения, геометрия и диаграммы подъема клапанов двигателя ВАЗ-2111.

Графики изменения давления в цилиндре (p), термодинамической температуры рабочего тела (T), доли выгоревшего топлива (x), скорости тепловыделения ($dx/d\phi$) и среднего по поверхности камеры сгорания коэффициента теплоотдачи α на тактах сжатия-сгорания-расширения приведены на рис. 3.1. На рис. 3.2. приведены графики изменения p , T и α , а также массы рабочего тела (M) и условных площадей проходного сечения органов газораспределения (μF) на тактах газообмена. На рис. 3.3. приведена «свернутая» индикаторная диаграмма в $p-V$ координатах. Протокол расчета приведен ниже.

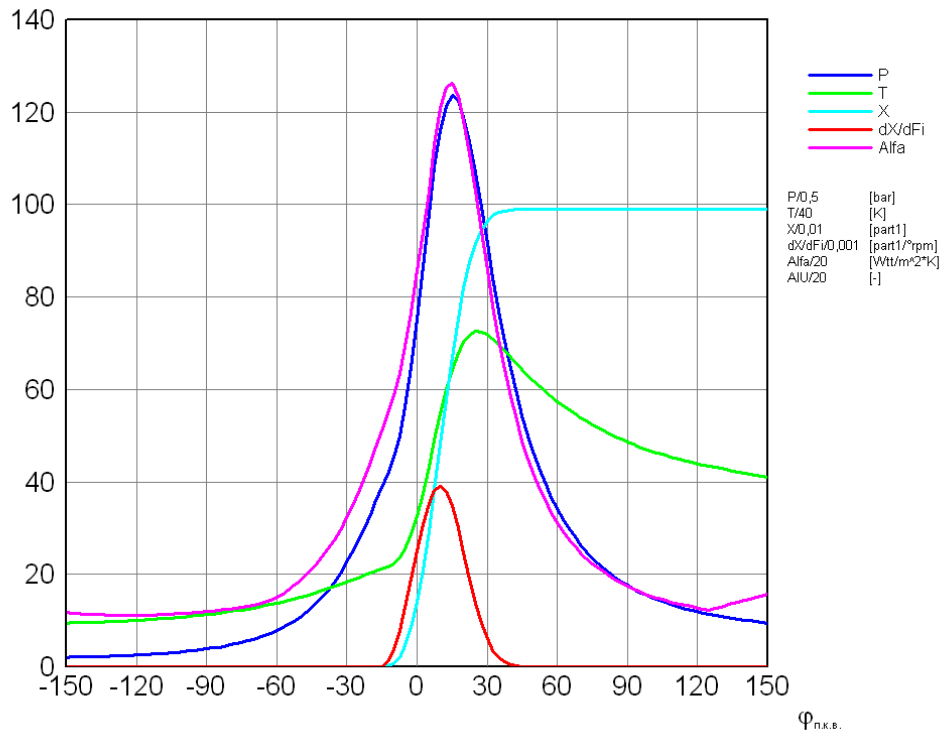


Рис. 3.1. Графики изменения параметров в цилиндре бензинового двигателя на тактах сжатия-сгорания-расширения

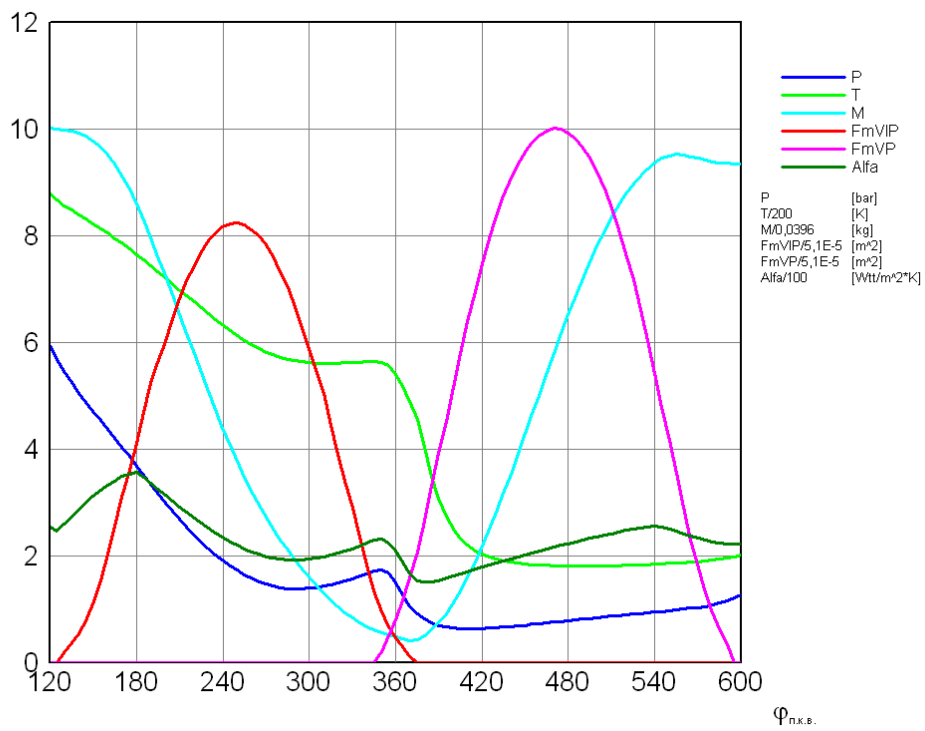


Рис. 3.2. Графики изменения параметров в цилиндре бензинового двигателя на тактах газообмена

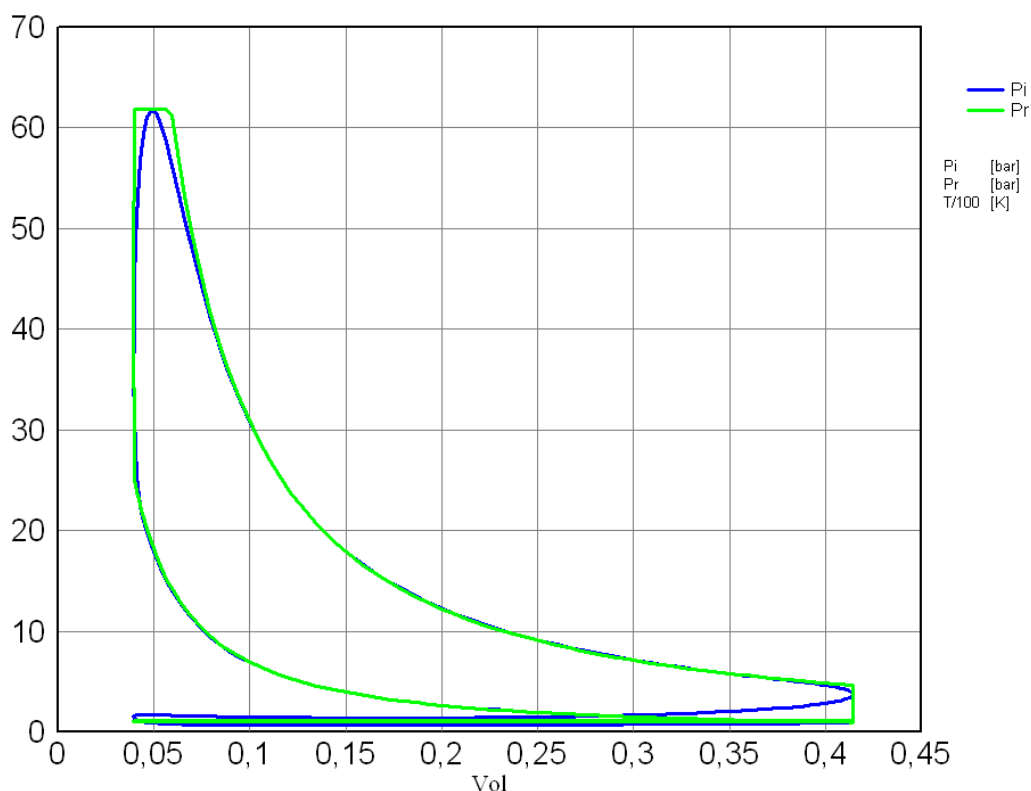


Рис. 3.3. Индикаторная диаграмма (P_i), вписанная в «идеальный» рабочий цикл Сабатэ-Тринклера (P_r)

**Протокол расчета рабочего цикла
быстроходного четырехтактного бензинового двигателя:**

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ДВС НА БАЗЕ
"РАЗОМКНУТОЙ" СХЕМЫ СИСТЕМЫ РЕСИВЕР - ЦИЛИНДР - КОЛЛЕКТОР

VAZ - 2111. Nominal. N=5600 *** Variant 001 ***

S = 71.0 D = 82.0 [мм]; $E_{psr} = 10.5$; Lam = .284; $E_x = -.056$
 $E_{psd} = 8.9$ Режим:

$P_k = .99$ [бар] $T_k = 320.0$ [K] N = 5600 [1/мин]
 $P_r = 1.10$ [бар] $T_r = 1100.0$ [K] $G_t = 4.48$ [кг/ч]
 $V_h = .375$ [дм³] $D_{ros} = 1.000$ $C_m = 13.25$ [м/с]
 $dT_k = 12.51$ [K]

Температуры стенок камеры, [K]: $C_u/C_m = .000$
поршня $T_p = 540.0$; гильзы $T_g = 401.9$; крышки $T_k = 520.0$

Параметры тепловыделения по И.И.Вибе:
 $F_{iz} = 56.0$ M = 1.90 $F_{nc} = -15.0$ $X_{max} = .990$
Продолжительность сгорания $F_{sg} = 59.5$ град. пкв
Доля выг. топлива к моменту C = .140
Доля выг. топлива к моменту Z = .881 (22.8 пкв)
Макс. доля выгоревшего топлива = .990
Цикловая подача топлива = .2666E-04 кг/цикл

Фазы газораспределения: выпуск 125.0 - 373.0
впуск 347.0 - 595.0

Максимальные условные площади проходных сечений
 органов газораспределения: выпуск 4.21 [см**2]
 впуск 5.11 [см**2]

Условное давление конца сжатия Pс 25.1 [бар]
 Давление в цилиндре к концу расширения Pв 5.69 [бар]
 Усредненный показатель политропы сжатия 1.391
 Усредненный показатель политропы расширения 1.332
 Степень повышения давления 2.465
 Степень предварительного расширения 1.499
 Степень последующего расширения 7.006
 Коэффициент полноты идеальной диаграммы .902
 Средняя температура газов за период выпуска 1309.2 [K]
 Температура ОГ в выпускном патрубке 1171.5 [K]

Эквивалентная условная площадь перетечек .06413 [мм**2]
 Массовая доля потери рабочего тела из КС .200 %
 Давление картерных газов 1.000 [бар], темп-ра 370.0 [K]

Элементарный состав топлива С/Н/О (доли от 1): .845/.135/.020
 Примеси к топливу Сера/Азот/Вода, % : .001/.000/ .00
 Стехиометрическое соотношение L0: 14.279 [кг возд./кг топл.]
 Октановое число ОЧИ: 95.0; Цетановое число ЦЧ: 12.5
 Плотность топлива: 720.0; Воздуха на впуске: 1.078 [кг/м^3]
 EGR: .0 % Воздух O2/N2: .210/.790; SMUвоз = 28.960
 LOR: 14.279 Заряд O2/N2: .210/.790; SMUзрд = 28.960

Qн топлива при Alfa=1: 43.00 ; истинная: 38.38 [МДж/кг]
 Qн смеси при Alfa=1: 2814.4 ; истинная: 2714.8 [КДж/кг]

*** ИНДИКАТОРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЦИКЛА ***

Мощность 20.80 [кВт] 28.25 [л.с.]
 Расход топлива 215.42 [г/кВт*ч] 158.55 [г/л.с.*ч]
 Действительный коэффициент избытка воздуха .920
 Действительный расход воздуха на цилиндр 58.85 [кг/ч]
 Инд. КПД .389 Индикаторное давление 11.88 [бар]
 Инд. момент цилиндра 35.46 [Н*м] 3.61 [кг*м]

Максимальные значения по циклу:
 Макс. давление сгорания 61.81 [бар] при Fi= 15.4
 Макс. температура цикла 2903.4 [K] при Fi= 26.1
 Макс. жесткость процесса 2.332 [бар/град] при Fi= 2.6

Среднецикловая температура 1067.92 [K]
 Результирующая температура 1500.16 [K]
 Средний коэфф-т теплоотдачи 404.69 [Вт/м^2*K]
 Лучистая составляющая 1.53 [Вт/м^2*K] (.38 %)

Газовоздушные каналы:
 ВЫПУСК: Средний к-т ТО 385.98 [Вт/м^2*K]
 Результирующая температура 1145.00 [K]
 ВПУСК: Средний к-т ТО 177.57 [Вт/м^2*K]
 Результирующая температура 311.32 [K]

Коэффициент остаточных газов .050 Заброс 1.06 %
 Коэффициент наполнения .707
 Коэффициент продувки 1.000
 Мощность насосных ходов -.242 [кВт] (-.33 [л.с.])

*** ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ ***

Количество цилиндров	4 Мех. КПД	.754
Мощность цилиндровая	15.67 [кВт]	21.29 [л.с.]
Мощность двигателя	62.68 [кВт]	85.17 [л.с.]
Мощность мех. потерь	20.50 [кВт]	27.85 [л.с.]
Удельный расход топлива	285.87 [г/кВт*ч]	210.40 [г/л.с.*ч]
Суммарный коэффициент избытка воздуха		.920
Расход воздуха	235.39 [кг/ч]	201.32 [м ³ /ч]
Расход топлива	17.92 [кг/ч]	24.89 [л/ч]
Из него: жидкое	17.92 [кг/ч], газ	.00 [кг/ч]
Эфф. КПД	.293 Эффективное давление	8.96 [бар]
Крутящий момент	106.89 [Н*м]	10.90 [кг*м]

*** ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС РАБОЧЕГО ЦИКЛА ***

Параметр	величина, Дж	% от Qr	% от Qп
Располагаемая энергия Qr	1146.6	100.00	-
Потери энергии при Alfa<1	123.3	10.75	-
Потери от недогорания	10.2	.89	-
Подведенная энергия Qп	1013.1	88.36	100.00
Механическая работа	445.6	38.86	43.99
Потери тепла в стенки КС	145.9	12.73	14.40
Потери тепла в стенки ГВК	51.8	4.52	5.11
Потери от неплотности КС	1.7	.15	.16
Вынос отработавшими газами	368.1	32.10	36.33
Полезная работа цикла	335.8	29.29	33.15
Потери трения в двигателе	109.8	9.58	10.84

*** ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОГ И ВРЕДНЫЕ ВЫБРОСЫ ***

Чистые продукты сгорания:

Компоненты ОГ	Объем ПС кмоль/кг топл.	Объемная доля %	Массовая доля %
Азот N2	.3583503	72.08712	71.51395
Кислород O2	.0008400	.16898	.19158
Вода H2O	.0608377	12.23834	7.80495
ДиоксидС CO2	.0556115	11.18701	17.43982
Водород H2	.0066623	1.34022	.09497
Угарн.газ CO	.0148052	2.97827	2.95459
ДиоксидS SO2	.0000003	.00006	.00014
Всего по ЧПС	.4971073	100.00000	100.00000

В ОГ на выхлопе состав газа тот же.

Выход токсичных компонентов ОГ на режиме:

Массовый расход ОГ	253.31 [кг/ч]
Объемный расход ОГ	216.65 [м ³ /ч] (при н.у.)

Компоненты ОГ	Объем м ³ /ч	Масса кг/ч	Уд. выбросы кг/кВт*ч
Вода H2O	.26514E+02	.19771E+02	.31541E+00
ДиоксидС CO2	.24236E+02	.44177E+02	.70477E+00
Угарн.газ CO	.64523E+01	.74843E+01	.11940E+00
ДиоксидS SO2	.13619E-03	.36108E-03	.57605E-05
Углеводороды	.23882E-01	.45898E-01	.73224E-03

Показания газоанализатора (осушенные ОГ) :

Кислород	O2	.19 % об.
Диоксид углерода	CO2	12.75 % об.
Угарный газ	CO	3.39 % об.
Диоксид серы	SO2	1. ppm
Углеводороды	C _n H _x	126. ppm
Ср. молярная масса	C _n H _x	54. кг/кмоль

END OF DATA

При анализе результатов расчета следует обратить внимание на коэффициент избытка воздуха (0,92), соответствующий мощностному режиму работы двигателя при полном дросселе, величины p_z и T_z (6,18 МПа и 2903 К), индикаторный к.п.д. (0,389), параметры газообмена, в частности, коэффициент наполнения (0,707) и коэффициент остаточных газов (0,050). Важными выходными параметрами двигателя являются его эффективная мощность и крутящий момент.

Полученные в расчете параметры в целом показывают средний уровень форсирования и технического совершенства двигателя.

При проведении расчета, по запросу программы создается файл типа ind***.dat для передачи расчетных данных индикаторной диаграммы в последующие расчетные модули. Структура передаточного файла на примере рассматриваемого здесь двигателя приведена в таблице 3.3, в которой все данные разделены на группы. Смысловое содержание групп параметров расшифровано ниже в соответствии с обозначениями таблицы 3.1.

Таблица 3.3. Структура файла ind001.dat, созданного по запросу программы в расчете бензинового двигателя

№ группы	Параметры								
1	VAZ - 2111. Nominal. N=5600								
2	*** Variant 001 ***								
3	.071	.082	10.500	.284	-2.000		4		
4	5600	4.480	.920	2	2		2		
5	43.00	105.00	.845	.135	.020	.001	.000	.000	.000
6	360	595.0	125	-15.00	20.80	1.0000	.0497	.754	
7	1.208	1.231	1.255	1.281	1.309	1.338	1.370	1.403	
	1.439	1.477	1.518	1.561	1.608	1.658	1.711	1.768	
	1.829	1.894	1.965	2.040	2.121	2.209	2.303	2.405	
	2.514	2.633	2.761	2.901	3.052	3.216	3.394	3.588	
	3.800	4.031	4.284	4.560	4.862	5.193	5.556	5.954	

	6.391	6.870	7.396	7.972	8.603	9.292	10.044	10.860
	11.743	12.693	13.707	14.780	15.902	17.060	18.233	19.397
	20.556	21.849	23.444	25.501	28.147	31.446	35.365	39.759
	44.393	48.970	53.170	56.715	59.399	61.101	61.791	61.517
	60.388	58.551	56.173	53.420	50.444	47.375	44.319	41.352
	----- // -----							
	.970	.975	.980	.986	.991	.995	1.000	1.004
	1.010	1.015	1.022	1.029	1.037	1.046	1.055	1.065
	1.077	1.089	1.102	1.116	1.132	1.149	1.167	1.187
8	395.93	398.06	400.29	402.63	405.08	407.65	410.34	413.15
	416.09	419.16	422.38	425.75	429.26	432.94	436.78	440.79
	444.99	449.37	453.96	458.74	463.75	468.97	474.44	480.15
	486.11	492.35	498.87	505.68	512.80	520.25	528.03	536.16
	544.66	553.55	562.83	572.53	582.65	593.22	604.24	615.73
	627.69	640.14	653.07	666.48	680.36	694.69	709.44	724.57
	740.01	755.69	771.51	787.34	803.04	818.41	833.26	847.35
	----- // -----							
	363.42	363.55	363.69	363.85	364.03	364.22	364.43	364.66
	364.90	365.16	365.44	365.73	366.03	366.35	366.69	367.04
	367.42	367.80	368.21	368.63	369.08	369.54	370.03	370.54
	371.06	371.62	372.19	372.79	373.40	373.97	374.53	375.12
	375.74	376.42	377.15	377.95	378.81	379.75	380.76	381.86
	383.04	384.30	385.66	387.10	388.65	390.30	392.06	393.93
9	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000
	----- // -----							
	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000
	----- // -----							
	.000434	.003237	.010454	.023916	.045183	.075445	.115413	.165212
	.224307	.291484	.364896	.442184	.520666	.597571	.670301	.736662
	.795052	.844561	.884979	.916717	.940665	.958009	.970050	.978054
	.983143	.986232	.988021	.989008	.989526	.989784	.989906	.989961
	.989984	.989993	.989997	.989998	.989998	.989998	.989998	.989998
	----- // -----							
	.989998	.989998	.989998	.989998	.989998			
10	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
	----- // -----							
	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000007
	.0006596	.0023993	.0051060	.0086637	.0129141	.0176434	.0225816	.0274132
	.0317982	.0354031	.0379370	.0391882	.0390542	.0375589	.0348527	.0311930
	.0269090	.0223570	.0178731	.0137346	.0101339	.0071709	.0048606	.0031518
	.0019527	.0011543	.0006502	.0003485	.0001775	.0000858	.0000393	.0000170
	.0000070	.0000027	.0000010	.0000003	.0000001	.0000000	.0000000	.0000000
	----- // -----							
	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000			
11	222.55	222.67	222.84	223.10	223.45	223.90	224.44	225.08
	225.82	226.66	227.61	228.68	229.86	231.16	232.58	234.14
	235.83	237.67	239.65	241.79	244.08	246.55	249.20	252.03
	----- // -----							
	239.11	237.45	235.86	234.34	232.89	231.52	230.22	229.01
	227.88	226.84	225.88	225.01	224.22	223.53	222.94	222.58
12	1.000							

В таблице 3.3 записанные параметры разделены по группам:

- 1 – TEXT (текстовая информация о двигателе);
- 2 – VAR (вариант расчета);
- 3 – S, D, EPS, LAM, EXD, ICIL (геометрические характеристики двигателя);
- 4 – N, GT, ALFA (коэффициент избытка воздуха при сгорании), MT, KLU, KDV;
- 5 – QT, SMT, C, H, OT, ST, ANT, H2OT (параметры топлива);
- 6 – K (количество точек в таблицах давлений и температур), FZV (угол закрытия впуска), KX (количество точек в таблице тепловыделения), FHC (угол начала видимого сгорания), SMI (индикаторная цилиндровая мощность двигателя), ETAP (коэффициент продувки), GAMR (коэффициент остаточных газов), ETAM (механический к.п.д. двигателя на режиме);
- 7 – PV(I), I=1,K (таблица давлений газа в цилиндре по углу п.к.в., первая точка таблицы соответствует углу FZV);
- 8 – TV(I), I=1,K (таблица температур газа в цилиндре по углу п.к.в.);
- 9 – XV(I), I=1,KX (таблица интегральной характеристики тепловыделения);
- 10 – DXV(I), I=1,KX (таблица дифференциальной характеристики тепловыделения);
- 11 – ALFKN(I), I=1,K (таблица среднего по площади КС коэффициента конвективной теплоотдачи, $[Вт/м^2 \cdot К]$);
- 12 – PKG (давление картерных газов).

3.2.2. Быстроходный четырехтактный дизельный двигатель

Здесь рассмотрим пример расчета рабочего цикла среднефорсированного дизеля с наддувом и открытой камерой сгорания типа Гесельман. В качестве прототипа использован дизель размерностью 18/20 производства ПАО “Звезда”, тепловозный, с остовом, выполненным из алюминиевого сплава. Исходные данные к расчету сведены в таблицу 3.4.

Таблица 3.4. Исходные данные к моделированию рабочего процесса быстроходного четырехтактного дизельного двигателя

№ строки	Параметры	Обозначения в соответствии с таблицей 3.1
1	4T Diesel 18/20	TEXT
2	*** Variant 002 ***	VAR
3	2 4 1 1 12 3	MT, NDTV, NPF, KDV, ICIL, KPR
4	0.200 0.180 13.50 0.289 0.00 0.0	S, D, EPS, LAM, EXD, UGOL
5	1500 13.00 1.000 0.880 0.000	N, GT, DROS, ETAM, ENMEX

6	42.50	190.0	0.870	0.126	0.004	QT, SMT, C, H, OT
7	0.200	0.015	0.005			ST, ANT, H2OT
	0.0	47.0	840.0			OCHI, CCHM, ROT
8	550.0	540.0	1.320	1.000		TPP, TKK, PKP, PKK
9	420.0	400.0	390.0	0.0025	0.000	TGG, TG1, TG2, STZ, CUKCM
10	-22.0	33.0	0.14	1.00	0.0	FHC, FVG, DIKAM, ZX1, ZFI2
11	314.0	585.0	135.0	396.0		FOVP, FZVP, FOVIP, FZVIP
12	1.600	1.450	356.0	800.0		PK, PP, TK, TP
13	1					NVR
14	34.0	32.0	92.0	92.0	2 2	FM2, FM1, FIM2, FIM1, KL2, KL1
15	0.300	0.100	1.050	350.0		FEKV, DPZ, PKG, TKG
16	0.210	0.000				DO2, EGR
17	2	0.0	0.0	0.500	0.0	IREZ, CH0, SMUCH, UGAR, SMUMC
18		100.00		100.00		Notn, Motn

Пояснения к выбору исходных данных:

1. Для описания процесса тепловыделения используем модифицированную методику Б.П. Пугачева для открытых камер сгорания (NDTV = 4).
2. Топливо – стандартное дизельное (ГОСТ 305-2013).
3. Проходные сечения органов газораспределения заданы по способу 1 (в виде косинусоидальных трапеций, см. рис. 3.5).

Результаты расчета приведены ниже в листинге файла протокола и на графиках, рис. 3.4-3.6.

***Протокол расчета рабочего цикла
быстроходного четырехтактного дизельного двигателя:***

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ДВС НА БАЗЕ
"РАЗОМКНУТОЙ" СХЕМЫ СИСТЕМЫ РЕСИВЕР - ЦИЛИНДР - КОЛЛЕКТОР

4T Diesel 18/20

*** Variant 002 ***

S = 200.0 D = 180.0 [мм]; Epsr = 13.5; Lam = .289; Eх = .000
Epsd = 12.1 Режим:

Pk = 1.60 [бар] Tk = 356.0 [K] N = 1500 [1/мин]

Pr = 1.45 [бар] Tr = 800.0 [K] Gt = 13.00 [кг/ч]

Vh 5.089 [дм³] Dros = 1.000 Cm = 10.00 [м/с]

dTk = 22.07 [K]

Температуры стенок камеры, [K]: Cu/Cm = .000

поршня Tr = 550.0; гильзы Tg = 401.9; крышки Tk = 540.0

Параметры тепловыделения по Б.П.Пугачеву:

Fнвпр = -22.0 Fвпр = 33.0 DIKAM = .140 [м]

X1 = .189 X2 = .790 FI1 = 5.17 FI2 = 22.0

K1 = 2.00 K2 = 1.87 угол начала сгорания Fнс = -11.00

Угол задержки самовоспламенения = 11.00 (1.222 мс)

Продолжительность сгорания Fсг = 93.6 град. пкв

Доля выг. топлива к моменту С = .263
 Доля выг. топлива к моменту Z = .610 (17.6 пкв)
 Макс. доля выгоревшего топлива = .979
 Цикловая подача топлива = .2889E-03 кг/цикл

Фазы газораспределения: выпуск 135.0 - 396.0
 впуск 314.0 - 585.0

Максимальные условные площади проходных сечений
 органов газораспределения: выпуск 32.00 [см**2]
 впуск 34.00 [см**2]

Условное давление конца сжатия Pс 58.6 [бар]
 Давление в цилиндре к концу расширения Pв 5.44 [бар]
 Усредненный показатель политропы сжатия 1.391
 Усредненный показатель политропы расширения 1.293
 Степень повышения давления 1.552
 Степень предварительного расширения 1.373
 Степень последующего расширения 9.834
 Коэффициент полноты идеальной диаграммы .973
 Средняя температура газов за период выпуска 769.3 [K]
 Температура ОГ в выпускном патрубке 788.9 [K]

Эквивалентная условная площадь перетечек .10937 [мм**2]
 Массовая доля потери рабочего тела из КС .100 %
 Давление картерных газов 1.050 [бар], темп-ра 350.0 [K]

Элементарный состав топлива С/Н/О (доли от 1): .870/.126/.004
 Примеси к топливу Сера/Азот/Вода, % : .200/.015/ .00
 Стехиометрическое соотношение L0: 14.302 [кг возд./кг топл.]
 Октановое число ОЧИ: 26.0; Цетановое число ЦЧ: 47.0
 Плотность топлива: 840.0; Воздуха на впуске: 1.566 [кг/м^3]
 EGR: .0 % Воздух O2/N2: .210/.790; SMUвоз = 28.960
 L0R: 14.302 Заряд O2/N2: .210/.790; SMUзрд = 28.960

Qн топлива при Alfa=1: 42.50 ; истинная: 42.50 [МДж/кг]
 Qн смеси при Alfa=1: 2777.4 ; истинная: 1482.0 [КДж/кг]

*** ИНДИКАТОРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЦИКЛА ***

Мощность 72.44 [кВт] 98.43 [л.с.]
 Расход топлива 179.45 [г/кВт*ч] 132.07 [г/л.с.*ч]
 Действительный коэффициент избытка воздуха 1.935
 Действительный расход воздуха на цилиндр 375.56 [кг/ч]
 Инд. КПД .472 Индикаторное давление 11.39 [бар]
 Инд. момент цилиндра 461.20 [Н*м] 47.01 [кг*м]

Максимальные значения по циклу:
 Макс. давление сгорания 90.93 [бар] при Fi= 5.7
 Макс. температура цикла 1820.0 [K] при Fi= 25.9
 Макс. жесткость процесса 4.410 [бар/град] при Fi= -5.7

Среднецикловая температура 766.89 [K]
 Результирующая температура 1147.94 [K]
 Средний коэфф-т теплоотдачи 476.01 [Вт/м^2*K]
 Лучистая составляющая 81.53 [Вт/м^2*K] (17.13 %)

Газовоздушные каналы:
 ВЫПУСК: Средний к-т ТО 400.63 [Вт/м^2*K]
 Результирующая температура 806.12 [K]
 ВПУСК: Средний к-т ТО 180.46 [Вт/м^2*K]
 Результирующая температура 354.14 [K]

Коэффициент остаточных газов	.011	Заброс	.00 %
Коэффициент наполнения	.929		
Коэффициент продувки	1.044		
Мощность насосных ходов	3.384 [кВт]	(4.60 [л.с.])

*** ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ ***

Количество цилиндров	12 Мех. КПД	.880	
Мощность цилиндровая	63.75 [кВт]	86.62 [л.с.]	
Мощность двигателя	765.02 [кВт]	1039.42 [л.с.]	
Мощность мех. потерь	104.32 [кВт]	141.74 [л.с.]	
Удельный расход топлива	203.92 [г/кВт*ч]	150.08 [г/л.с.*ч]	
Суммарный коэффициент избытка воздуха		2.020	
Расход воздуха	4506.76 [кг/ч]	3854.45 [м ³ /ч]	
Расход топлива	156.00 [кг/ч]	185.71 [л/ч]	
Из него: жидкое	156.00 [кг/ч], газ	.00 [кг/ч]	
Эфф. КПД	.415	Эффективное давление	10.02 [бар]
Крутящий момент	4870.24 [Н*м]	496.46 [кг*м]	

*** ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС РАБОЧЕГО ЦИКЛА ***

Параметр	величина, Дж	% от Q _г	% от Q _п
Располагаемая энергия Q _г	12277.8	100.00	-
Потери энергии при Alfa<1	.0	.00	-
Потери от недогорания	250.8	2.04	-
Подведенная энергия Q _п	12027.0	97.96	100.00
Механическая работа	5795.6	47.20	48.19
Потери тепла в стенки КС	1886.4	15.36	15.68
Потери тепла в стенки ГВК	881.8	7.18	7.33
Потери от неплотности КС	12.1	.10	.10
Вынос отработавшими газами	3451.2	28.11	28.70
Полезная работа цикла	5100.1	41.54	42.41
Потери трения в двигателе	695.5	5.66	5.78

*** ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОГ И ВРЕДНЫЕ ВЫБРОСЫ ***

Чистые продукты сгорания:

Компоненты ОГ	Объем ПС кмоль/кг топл.	Объемная доля %	Массовая доля %
Азот N ₂	.7550036	76.45189	73.99044
Кислород O ₂	.0969878	9.82101	10.86265
Вода H ₂ O	.0630000	6.37940	3.96900
ДиоксидС CO ₂	.0724803	7.33937	11.16198
Водород H ₂	.0000000	.00000	.00000
Угарн.газ СО	.0000197	.00200	.00193
ДиоксидS SO ₂	.0000625	.00633	.01400
Всего по ЧПС	.9875539	100.00000	100.00000

В ОГ на выхлопе с учетом продувки (1.044):

Компоненты ОГ	Объем ПС кмоль/кг топл.	Объемная доля %	Массовая доля %
Азот N ₂	.7879831	76.55524	74.09996
Кислород O ₂	.1057545	10.27441	11.36559
Вода H ₂ O	.0630000	6.12066	3.80852
ДиоксидС CO ₂	.0724803	7.04171	10.71064

Водород	H2	.0000000	.00000	.00000
Угарн.газ	CO	.0000197	.00192	.00185
ДиоксидS	SO2	.0000625	.00607	.01343
Всего в ОГ		1.0293000	100.00000	100.00000

Выход токсичных компонентов ОГ на режиме:

Массовый расход ОГ 4662.76 [кг/ч]
 Объемный расход ОГ 3987.87 [м³/ч] (при н.у.)

Компоненты ОГ	Объем м ³ /ч	Масса кг/ч	Уд. выбросы кг/кВт*ч
Вода H2O	.24408E+03	.17758E+03	.23213E+00
ДиоксидC CO2	.28081E+03	.49941E+03	.65281E+00
Угарн.газ CO	.76408E-01	.86474E-01	.11304E-03
ДиоксидS SO2	.24215E+00	.62639E+00	.81880E-03
Углеводороды	.50367E-01	.14053E+00	.18370E-03

Показания газоанализатора (осушенные ОГ):

Кислород	O2	10.94 % об.
Диоксид углерода	CO2	7.50 % об.
Угарный газ	CO	20. ppm
Диоксид серы	SO2	65. ppm
Углеводороды	CHx	13. ppm
Ср. молярная масса	CHx	81. кг/кмоль

END OF DATA

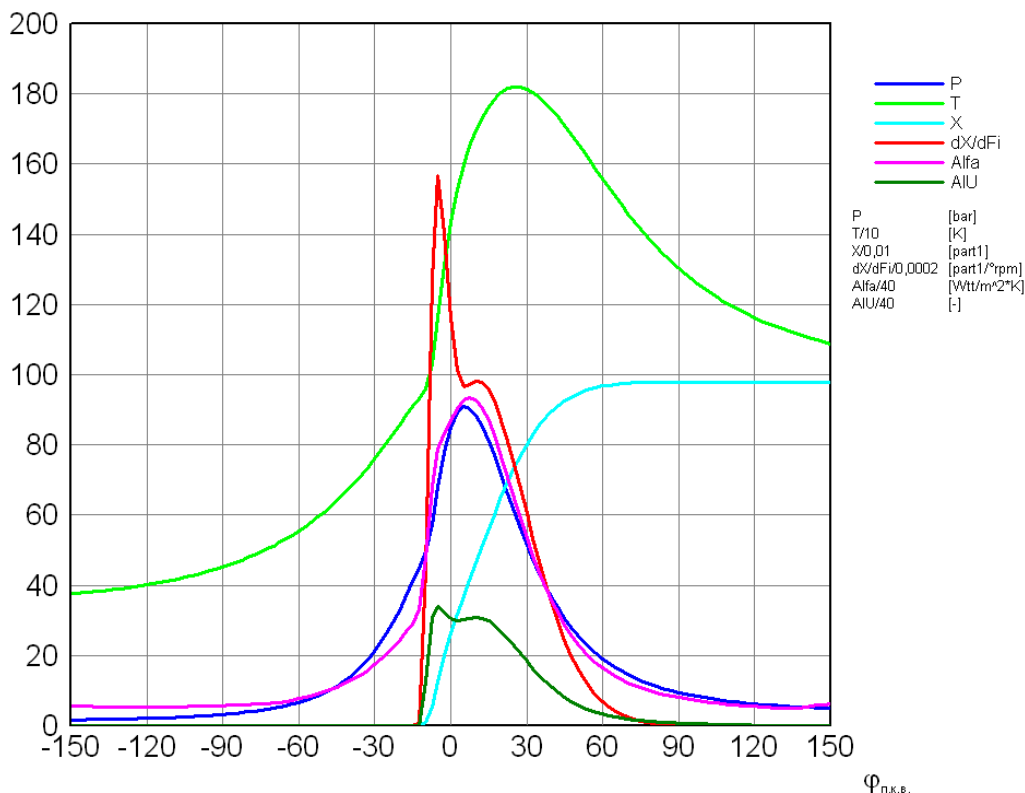


Рис. 3.4. Графики изменения параметров в цилиндре дизеля с открытой КС типа Гессельман на тактах сжатия-сгорания-расширения

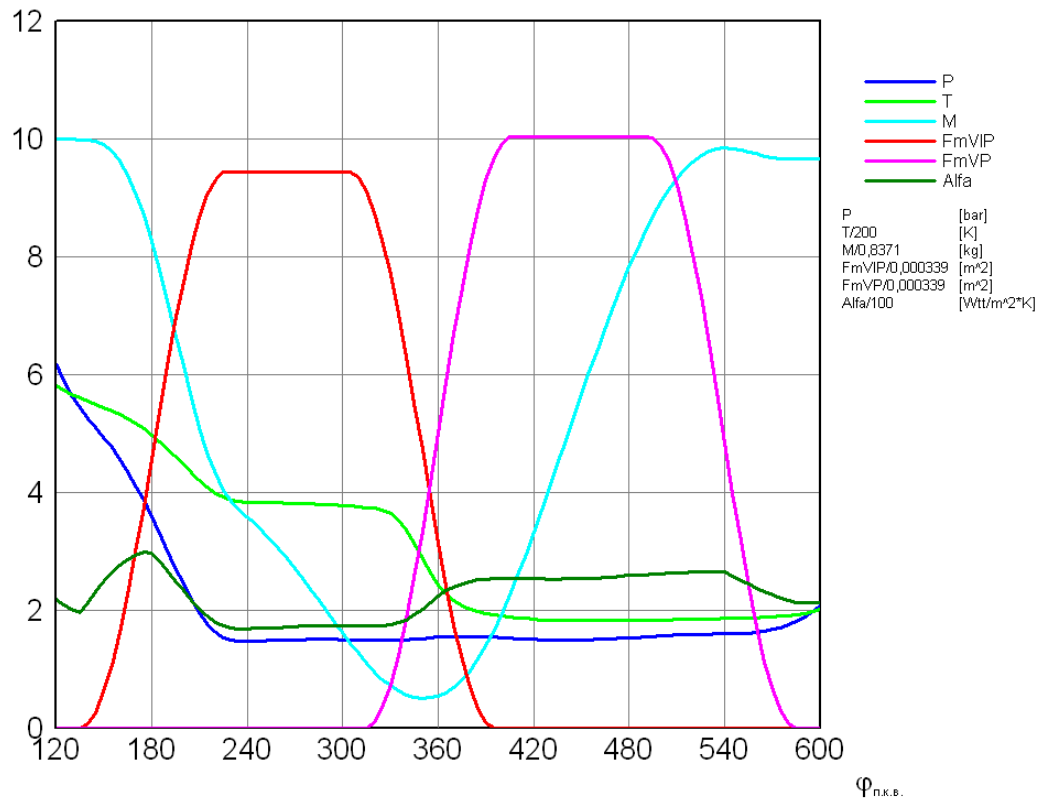


Рис. 3.5. Графики изменения параметров в цилиндре дизеля на тактах газообмена

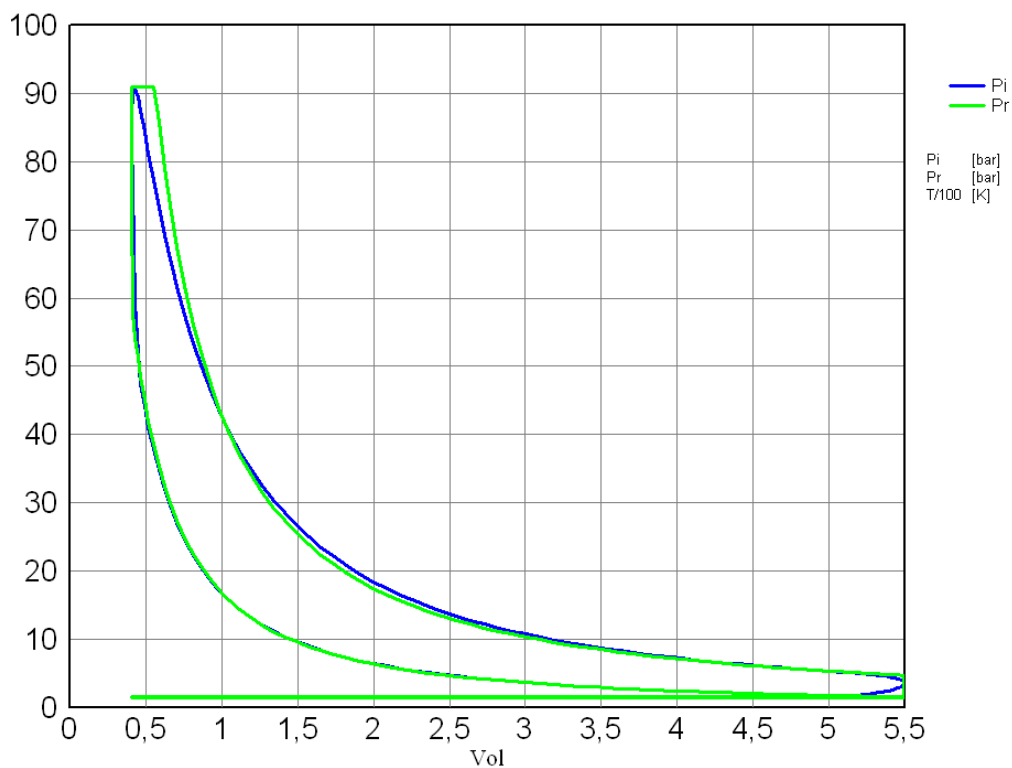


Рис. 3.6. Индикаторная диаграмма дизеля с открытой КС (P_i), вписанная в «идеальный» рабочий цикл Сабатэ-Тринклера (P_r)

Анализируя результаты расчета, в первую очередь обращаем внимание на значения коэффициента избытка воздуха (1,935 при сгорании и 2,020 – суммарный), величины p_z , T_z (9,09 МПа и 1820 К) и максимальную скорость нарастания давления (0,441 МПа/°п.к.в.), индикаторный к.п.д. (0,472), параметры газообмена (коэффициент наполнения – 0,929 и коэффициент остаточных газов 0,011), а также на выходные параметры двигателя – эффективную мощность и крутящий момент.

Полученные в данном расчете параметры двигателя относительно не высоки, однако конструкция остова двигателя ограничивает возможную форсировку двигателя.

3.2.3. Быстроходный четырехтактный дизель с объемно-пленочным смесеобразованием

Объемно-пленочное смесеобразование представляет собой традиционный (и даже несколько устаревший) способ смесеобразования и реализуется в “полуразделенных” камерах сгорания типа КамАЗ, ЯМЗ, ЦНИДИ и пр. при относительно невысоких давлениях впрыска топлива. В качестве примера расчета такого двигателя рассмотрим среднефорсированный дизель с наддувом и камерой в поршне типа КамАЗ, размерностью 12/12. Сам двигатель, для грузового автотранспорта, имеет чугунный блок цилиндров V-образной конструкции и индивидуальные головки. Подача топлива осуществляется ТНВД плунжерного типа с золотниковым управлением, расположенным в развале блоков. Давление впрыска не превышает 60 МПа и ограничивается конструкцией ТНВД, корпус которого отлит из алюминиевого сплава. Исходные данные к расчету дизеля с полуразделенной КС сведены в таблицу 3.5.

Основной особенностью данного примера является использование методики Б.П. Пугачева ($NDTV = 3$) для описания процесса тепловыделения с учетом доли топлива, испаряющейся с поверхности камеры сгорания (см. строку 11 в табл. 3.5). Выбор остальных исходных данных в целом аналогичен предыдущему примеру расчета.

Результаты расчета приведены ниже в листинге файла протокола и на графиках, рис. 3.7, 3.8.

**Таблица 3.5. Исходные данные к моделированию рабочего процесса
быстроходного дизеля с объемно-пленочным смесеобразованием**

№ строки	Параметры	Обозначения в соответствии с таблицей 3.1
1	4T Diezel 12/12	TEXT
2	*** Variant 003 ***	VAR
3	2 3 1 1 8 3	MT, NDTV, NPF, KDV, ICIL, KPR
4	0.120 0.120 16.00 0.267 0.00 0.0	S, D, EPS, LAM, EXD, UGOL
5	2200 6.50 1.000 0.825 0.000	N, GT, DROS, ETAM, ENMEX
6	42.50 190.0 0.870 0.126 0.004	QT, SMT, C, H, OT
7	0.200 0.015 0.005	ST, ANT, H2OT
8	0.0 50.0 820.0	OCHI, CCHM, ROT
9	553.0 523.0 1.349 1.000	TPP, TKK, PKP, PKK
10	420.0 400.0 390.0 0.0020 0.000	TGG, TG1, TG2, STZ, CUKCM
11	0.150 0.650 0.200 4.0 25.0 20.0	X1, X2, X3, FI1, FI2, FI3,
	2.0 2.0 1.8 -8.0 2.0	K1, K2, K3, FHC, FCH2
12	320.0 575.0 115.0 400.0	FOVP, FZVP, FOVIP, FZVIP
13	2.000 1.800 360.0 800.0	PK, PP, TK, TP
14	1	NVR
15	9.0 8.0 100.0 100.0 1 1	FM2, FM1, FIM2, FIM1, KL2, KL1
16	0.200 0.500 1.050 370.0	FEKV, DPZ, PKG, TKG
17	0.210 0.000	DO2, EGR
18	2 0.0 0.0 0.500 0.0	IREZ, CH0, SMUCH, UGAR, SMUMC
19	100.00 100.00	Notn, Motn

***Протокол расчета рабочего цикла быстроходного четырех-
тактного дизеля с объемно-пленочным смесеобразованием:***

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ДВС НА БАЗЕ
"РАЗОМКНУТОЙ" СХЕМЫ СИСТЕМЫ РЕСИВЕР - ЦИЛИНДР - КОЛЛЕКТОР

4T Diezel 12/12

*** Variant 003 ***

S = 120.0 D = 120.0 [мм]; Epsr = 16.0; Lam = .267; Ex = .000
Epsd = 15.0 Режим:

Pk = 2.00 [бар] Tk = 360.0 [K] N = 2200 [1/мин]

Pr = 1.80 [бар] Tr = 800.0 [K] Gt = 6.50 [кг/ч]

Vh 1.357 [дм³] Dros = 1.000 Cm = 8.80 [м/с]

dTk = 20.69 [K]

Температуры стенок камеры, [K]: Cu/Cm = .000

поршня Tr = 553.0; гильзы Tg = 402.0; крышки Tk = 523.0

Параметры пристеночного выгорания топлива:

X1 = .150 X2 = .650 X3 = .200

FI1 = 4.0 FI2 = 25.0 FI3 = 20.0

K1 = 2.00 K2 = 2.00 K3 = 1.80

угол начала сгорания -8.0 для пристеночной фазы 2.0

Продолжительность сгорания Fsr = 92.4 град. пкв

Доля выг. топлива к моменту C = .160

Доля выг. топлива к моменту Z = .455 (17.5 пкв)

Макс. доля выгоревшего топлива = .977
Цикловая подача топлива = .9848E-04 кг/цикл

Фазы газораспределения: выпуск 115.0 - 400.0
впуск 320.0 - 575.0

Максимальные условные площади проходных сечений
органов газораспределения: выпуск 8.00 [см**2]
впуск 9.00 [см**2]

Условное давление конца сжатия Pс 92.3 [бар]
Давление в цилиндре к концу расширения Pв 8.46 [бар]
Усредненный показатель политропы сжатия 1.387
Усредненный показатель политропы расширения 1.225
Степень повышения давления 1.296
Степень предварительного расширения 1.437
Степень последующего расширения 11.133
Коэффициент полноты идеальной диаграммы .965
Средняя температура газов за период выпуска 830.6 [K]
Температура ОГ в выпускном патрубке 812.1 [K]

Эквивалентная условная площадь перетечек .19565 [мм**2]
Массовая доля потери рабочего тела из КС .500 %
Давление картерных газов 1.050 [бар], темп-ра 370.0 [K]

Элементарный состав топлива С/Н/О (доли от 1): .870/.126/.004
Примеси к топливу Сера/Азот/Вода, % : .200/.015/ .00
Стехиометрическое соотношение L0: 14.302 [кг возд./кг топл.]
Октановое число ОЧИ: 20.0; Цетановое число ЦЧ: 50.0
Плотность топлива: 820.0; Воздуха на впуске: 1.936 [кг/м^3]
EGR: .0 % Воздух O2/N2: .210/.790; SMUвоз = 28.960
L0R: 14.302 Заряд O2/N2: .210/.790; SMUзрд = 28.960

Qн топлива при Alfa=1: 42.50 ; истинная: 42.50 [МДж/кг]
Qн смеси при Alfa=1: 2777.4 ; истинная: 1570.0 [КДж/кг]

*** ИНДИКАТОРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЦИКЛА ***

Мощность 34.45 [кВт] 46.80 [л.с.]
Расход топлива 188.70 [г/кВт*ч] 138.88 [г/л.с.*ч]
Действительный коэффициент избытка воздуха 1.823
Действительный расход воздуха на цилиндр 171.98 [кг/ч]
Инд. КПД .449 Индикаторное давление 13.84 [бар]
Инд. момент цилиндра 149.52 [Н*м] 15.24 [кг*м]

Максимальные значения по циклу:

Макс. давление сгорания 119.63 [бар] при Fi= 3.8
Макс. температура цикла 1767.0 [K] при Fi= 36.4
Макс. жесткость процесса 5.757 [бар/град] при Fi= -4.2

Среднецикловая температура 790.35 [K]
Результирующая температура 1137.22 [K]
Средний коэфф-т теплоотдачи 546.39 [Вт/м^2*K]
Лучистая составляющая 75.35 [Вт/м^2*K] (13.79 %)

Газовоздушные каналы:

ВЫПУСК: Средний к-т ТО 554.97 [Вт/м^2*K]
Результирующая температура 814.41 [K]
ВПУСК: Средний к-т ТО 241.62 [Вт/м^2*K]
Результирующая температура 356.00 [K]

Коэффициент остаточных газов .014 Заброс .00 %

Коэффициент наполнения	.917	
Коэффициент продувки	1.015	
Мощность насосных ходов	3.670 [кВт]	(4.99 [л.с.])

*** ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ ***

Количество цилиндров	8 Мех. КПД	.825
Мощность цилиндровая	28.42 [кВт]	38.61 [л.с.]
Мощность двигателя	227.34 [кВт]	308.89 [л.с.]
Мощность мех. потерь	48.22 [кВт]	65.52 [л.с.]
Удельный расход топлива	228.73 [г/кВт*ч]	168.34 [г/л.с.*ч]
Суммарный коэффициент избытка воздуха		1.850
Расход воздуха	1375.84 [кг/ч]	1176.70 [м ³ /ч]
Расход топлива	52.00 [кг/ч]	63.41 [л/ч]
Из него: жидкое	52.00 [кг/ч], газ	.00 [кг/ч]
Эфф. КПД	.370	Эффективное давление 11.42 [бар]
Крутящий момент	986.81 [Н*м]	100.59 [кг*м]

*** ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС РАБОЧЕГО ЦИКЛА ***

Параметр	величина, Дж	% от Qr	% от Qп
Располагаемая энергия Qr	4185.6	100.00	-
Потери энергии при Alfa<1	.0	.00	-
Потери от недогорания	95.3	2.28	-
Подведенная энергия Qп	4090.3	97.72	100.00
Механическая работа	1878.9	44.89	45.94
Потери тепла в стенки КС	659.8	15.76	16.13
Потери тепла в стенки ГВК	216.5	5.17	5.29
Потери от неплотности КС	18.8	.45	.46
Вынос отработавшими газами	1316.3	31.45	32.18
Полезная работа цикла	1550.1	37.03	37.90
Потери трения в двигателе	328.8	7.86	8.04

*** ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОГ И ВРЕДНЫЕ ВЫБРОСЫ ***

Чистые продукты сгорания:

Компоненты ОГ	Объем ПС кмоль/кг топл.	Объемная доля %	Массовая доля %
Азот N2	.7111487	76.30012	73.83040
Кислород O2	.0853302	9.15519	10.12440
Вода H2O	.0630000	6.75936	4.20465
ДиоксидС CO2	.0724634	7.77470	11.82193
Водород H2	.0000000	.00000	.00000
Угарн.газ CO	.0000366	.00392	.00380
ДиоксидS SO2	.0000625	.00671	.01483
Всего по ЧПС	.9320414	99.99998	100.00000

В ОГ на выхлопе с учетом продувки (1.015):

Компоненты ОГ	Объем ПС кмоль/кг топл.	Объемная доля %	Массовая доля %
Азот N2	.7216822	76.33820	73.87072
Кислород O2	.0881302	9.32225	10.30963
Вода H2O	.0630000	6.66402	4.14554
ДиоксидС CO2	.0724634	7.66504	11.65574
Водород H2	.0000000	.00000	.00000

Угарн.газ CO	.0000366	.00387	.00374
ДиоксидS SO2	.0000625	.00661	.01462
Всего в ОГ	.9453750	100.00000	100.00000

Выход токсичных компонентов ОГ на режиме:

Массовый расход ОГ	1427.84 [кг/ч]
Объемный расход ОГ	1221.17 [м ³ /ч] (при н.у.)

Компоненты ОГ	Объем м ³ /ч	Масса кг/ч	Уд. выбросы кг/кВт*ч
Вода H2O	.81379E+02	.59192E+02	.26036E+00
ДиоксидC CO2	.93603E+02	.16642E+03	.73204E+00
Угарн.газ CO	.47255E-01	.53466E-01	.23518E-03
ДиоксидS SO2	.80733E-01	.20879E+00	.91838E-03
Углеводороды	.20544E-01	.57308E-01	.25208E-03

Показания газоанализатора (осушенные ОГ):

Кислород O2	9.99 % об.
Диоксид углерода CO2	8.21 % об.
Угарный газ CO	41. ppm
Диоксид серы SO2	71. ppm
Углеводороды CHx	18. ppm
Ср. молярная масса CHx	81. кг/кмоль

END OF DATA

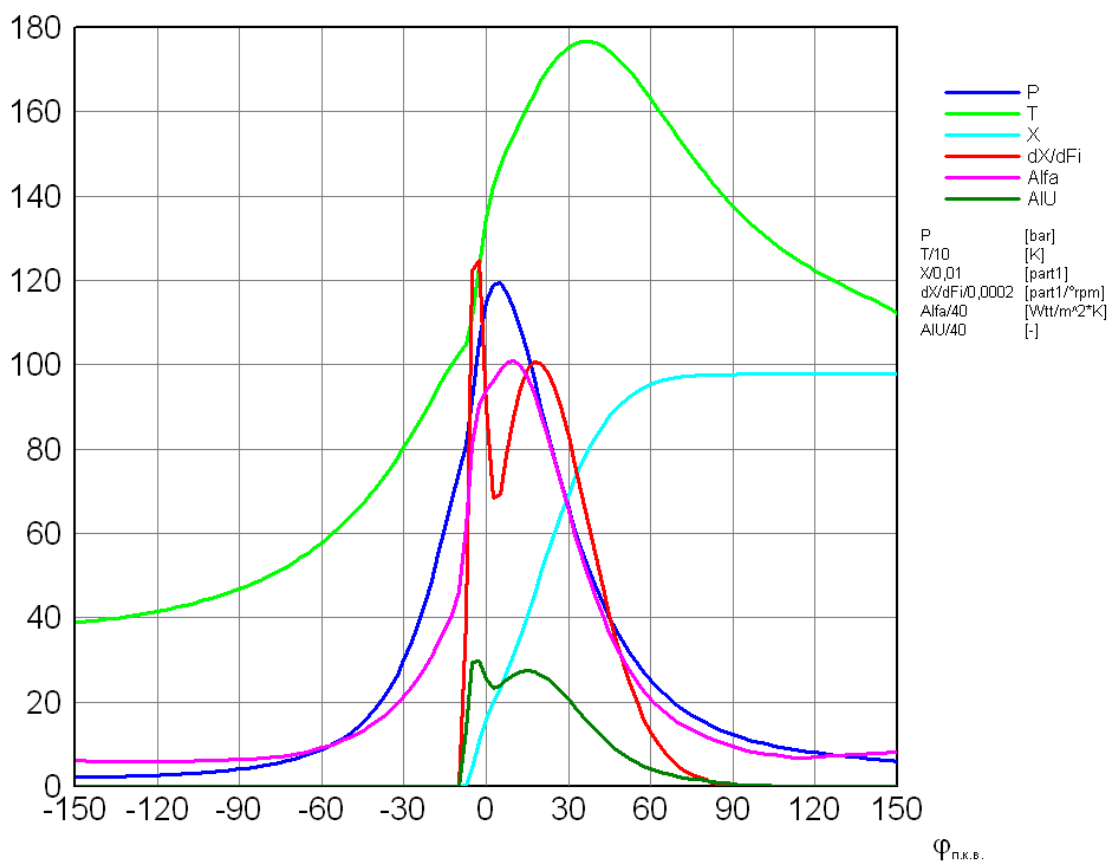


Рис. 3.7. Графики изменения параметров в цилиндре дизеля с полуразделенной КС на тактах сжатия-сгорания-расширения

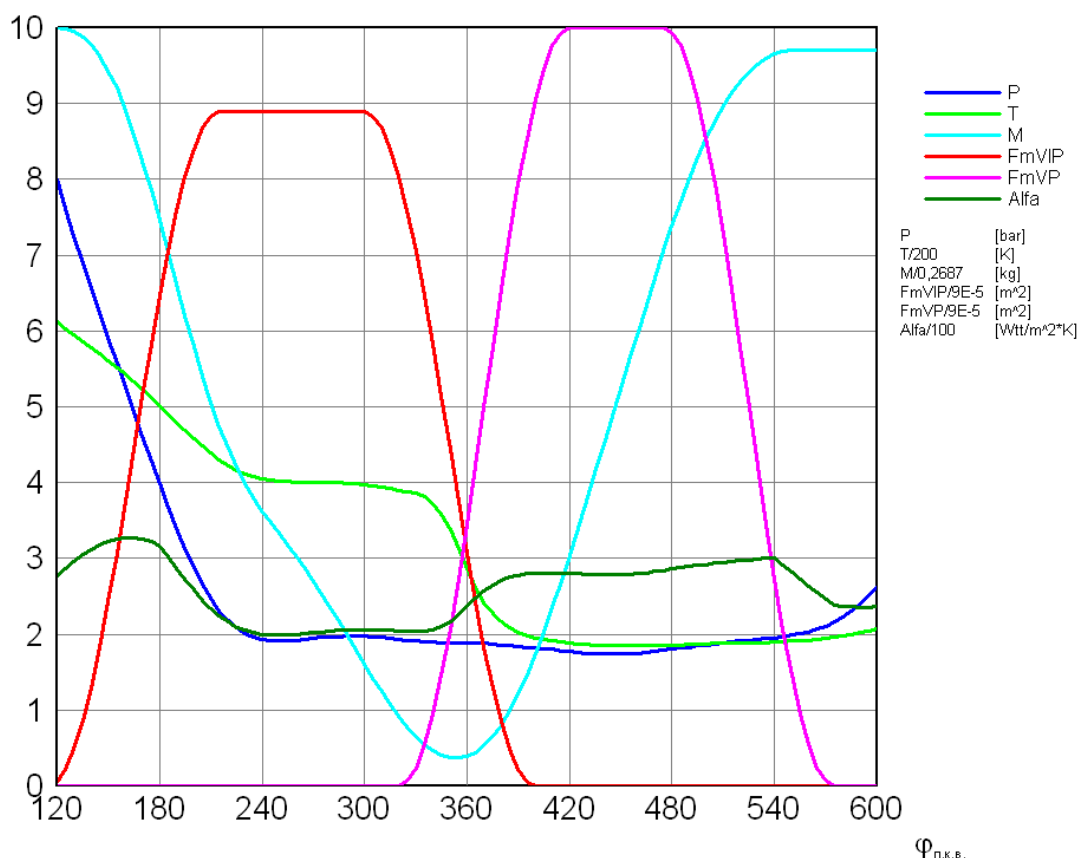


Рис. 3.8. Графики изменения параметров в цилиндре дизеля с полуразделенной КС на тактах газообмена

При анализе результатов расчета, необходимо обратить внимание на значения коэффициента избытка воздуха при сгорании (1,82 – процессы сгорания в полуразделенных КС допускают и меньшие его значения), величины p_z , T_z (11,96 МПа и 1767 К), максимальную скорость нарастания давления (0,576 МПа/°п.к.в.), индикаторный к.п.д. (0,449 – ниже, чем в предыдущем примере). Параметры газообмена (коэффициент наполнения – 0,917 и коэффициент остаточных газов 0,014) достаточно высоки. Выходные параметры двигателя (эффективные мощность и момент) соответствуют наиболее форсированным версиям двигателей КамАЗ.

В целом, полученные параметры двигателя также не высоки, однако применение полуразделенной КС не дает возможностей к более высокому форсированию рабочего цикла двигателя.

3.2.4. Быстроходный четырехтактный дизель с открытой КС и двухфазной характеристикой подачи топлива

Двухфазная характеристика подачи топлива в дизельном двигателе обычно реализуется в рамках современных систем топливоподачи с электронным управлением (типа насос-форсунок, Common Rail и некоторых других). Двухфазная подача предполагает наличие небольшой “пилотной” дозы топлива, которая подается раньше основной, на линии сжатия. При сгорании пилотной порции топлива давление и температура заряда к концу сжатия в цилиндре возрастают, а основная порция топлива при этом воспламеняется несколько раньше. Рабочий процесс становится более “мягким”, снижаются максимальные давления цикла и скорости его нарастания, снижается эмиссия оксидов азота.

В качестве примера для выполнения расчета рассмотрим двигатель размерностью 12/12 с открытой КС. Большинство исходных данных примем как в предыдущем примере (таблица 3.6). Основные отличия в исходных данных составят:

1. В расчет вводится доля пилотного впрыска топлива, объемом 3 мм^3 (см. строку 9, табл. 3.6).

2. Подача основной порции топлива осуществляется в соответствии с заданной интегральной характеристикой подачи (строки 13...19).

3. Поскольку предполагается, что у рассматриваемого двигателя камера сгорания открытого типа, для моделирования тепловыделения используем модифицированную методику Б.П. Пугачева для открытых камер сгорания ($\text{NDTV} = 5$), считая, что основная порция топлива подается за период FVG, равны 25°п.к.в. , согласно заданной характеристике подачи.

4. Для учета более позднего выгорания доли топлива, достигшей стенок КС, введем в расчет коэффициенты ZX1, ZFI2 (строка 12).

5. Для приблизительного сохранения мощности механических потерь, в соответствии с предыдущим примером, задается не механический к.п.д., а мощность механических потерь в двигателе (см. строку 5).

Результаты расчета приведены ниже в листинге файла протокола и на графиках, рис. 3.9, 3.10.

**Таблица 3.6. Исходные данные к моделированию рабочего процесса
быстроходного четырехтактного дизельного двигателя
с двухфазной характеристикой подачи топлива**

№ строки	Параметры	Обозначения в соответствии с таблицей 3.1
1	KamAZ-7403. Nominal Power. 5DTV2	TEXT
2	*** Variant 004 ***	VAR
3	2 5 2 1 8 3	MT, NDTV, NPF, KDV, ICIL, KPR
4	0.120 0.120 16.00 0.267 0.00 0.0	S, D, EPS, LAM, EXD, UGOL
5	2200 6.50 1.000 0.000 47.040	N, GT, DROS, ETAM, ENMEX
6	42.50 190.0 0.870 0.126 0.004	QT, SMT, C, H, OT
7	0.200 0.015 0.005	ST, ANT, H2OT
8	0.0 50.0 820.0	OCHI, CCHM, ROT
9	-30.0 3.000	FIPF, VPF
10	526.3 507.4 1.349 1.000	TPP, TKK, PKP, PKK
11	440.0 420.0 400.0 0.0020 0.000	TGG, TG1, TG2, STZ, CUKCM
12	-12.0 25.0 0.08 0.60 5.0	FHC, FVG, DIKAM, ZX1, ZFI2
13	26 2	KTTV, IGC
14	0.000000 0.000098 0.001942 0.005118 0.008458	DGC (I), I=1, KTTV
15	0.012613 0.017065 0.022054 0.027143 0.032835	
16	0.038985 0.044744 0.048994 0.054352 0.059843	
17	0.065301 0.070785 0.076209 0.080959 0.086437	
18	0.092281 0.096891 0.099575 0.100054 0.100101	
19	0.100429	
20	320.0 575.0 115.0 400.0	FOVP, FZVP, FOVIP, FZVIP
21	2.000 1.800 360.0 800.0	PK, PP, TK, TP
22	1	NVR
23	9.0 8.0 100.0 100.0 1 1	FM2, FM1, FIM2, FIM1, KL2, KL1
24	0.200 0.500 1.050 370.0	FEKV, DPZ, PKG, TKG
25	0.210 0.000	DO2, EGR
26	1 0.0 0.0 0.500 400.0	IREZ, CH0, SMUCH, UGAR, SMUMC
27	2200.00 960.00	Notn, Motn

***Протокол расчета рабочего цикла быстроходного
четырёхтактного дизельного двигателя с открытой КС
и двухфазной характеристикой подачи топлива:***

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ДВС НА БАЗЕ
"РАЗОМКНУТОЙ" СХЕМЫ СИСТЕМЫ РЕСИВЕР - ЦИЛИНДР - КОЛЛЕКТОР

KamAZ-7403. Nominal Power. 5DTV2 *** Variant 004 ***

S = 120.0 D = 120.0 [мм]; Epsr = 16.0; Lam = .267; Ex = .000
Epsd = 15.0 Режим:

Pk = 2.00 [бар] Tk = 360.0 [K] N = 2200 [1/мин]
Pr = 1.80 [бар] Tr = 800.0 [K] Gt = 6.50 [кг/ч]
Vh 1.357 [дм³] Dros = 1.000 Cm = 8.80 [м/с]
dTk = 19.06 [K]

Температуры стенок камеры, [K]: Cu/Cm = .000
поршня Tr = 526.3; гильзы Tg = 420.3; крышки Tk = 507.4

Параметры тепловыделения по В.П.Пугачеву:

Fнвпр = -12.0 Fвпр = 25.0 DIKAM = .080 [м]
X1 = .113 X2 = .861 FI1 = 4.00 FI2 = 23.0
K1 = 2.00 K2 = 2.05 угол начала сгорания Fнс = -4.95
Угол задержки самовоспламенения = 7.05 (.534 мс)
Продолжительность сгорания Fсг = 84.3 град. пкв
Доля выг. топлива к моменту C = .091
Доля выг. топлива к моменту Z = .524 (21.3 пкв)
Макс. доля выгоревшего топлива = .974
Цикловая подача топлива = .9848E-04 кг/цикл

Параметры предварительной фазы впрыска:

угол начала подачи -30.0, угол начала сгорания -15.0
угол задержки самовоспламенения пилотной фазы 15.00
угол достижения максимума скорости сгорания 1.71
объем пред. подачи 3.00 мм³, доля от Gt цикла 2.50 %

Фазы газораспределения: выпуск 115.0 - 400.0
впуск 320.0 - 575.0

Максимальные условные площади проходных сечений

органов газораспределения: выпуск 8.00 [см²]
впуск 9.00 [см²]

Условное давление конца сжатия Pс 92.2 [бар]
Давление в цилиндре к концу расширения Pв 8.43 [бар]
Усредненный показатель политропы сжатия 1.386
Усредненный показатель политропы расширения 1.270
Степень повышения давления 1.202
Степень предварительного расширения 1.643
Степень последующего расширения 9.737
Коэффициент полноты идеальной диаграммы .931
Средняя температура газов за период выпуска 827.4 [K]
Температура ОГ в выпускном патрубке 810.8 [K]

Эквивалентная условная площадь перетечек .19691 [мм²]
Массовая доля потери рабочего тела из КС .500 %
Давление картерных газов 1.050 [бар], темп-ра 370.0 [K]

Элементарный состав топлива С/Н/О (доли от 1): .870/.126/.004
Примеси к топливу Сера/Азот/Вода, % : .200/.015/ .00
Стехиометрическое соотношение L0: 14.302 [кг возд./кг топл.]
Октановое число ОЧИ: 20.0; Цетановое число ЦЧ: 50.0
Плотность топлива: 820.0; Воздуха на впуске: 1.936 [кг/м³]
EGR: .0 % Воздух O2/N2: .210/.790; SMUвоз = 28.960
L0R: 14.302 Заряд O2/N2: .210/.790; SMUзрд = 28.960

Qн топлива при Alfa=1: 42.50 ; истинная: 42.50 [МДж/кг]
Qн смеси при Alfa=1: 2777.4 ; истинная: 1572.9 [КДж/кг]

*** ИНДИКАТОРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЦИКЛА ***

Мощность	34.60 [кВт]	47.02 [л.с.]
Расход топлива	187.84 [г/кВт*ч]	138.25 [г/л.с.*ч]
Действительный коэффициент избытка воздуха	1.819	
Действительный расход воздуха на цилиндр	172.01 [кг/ч]	
Инд. КПД .451	Индикаторное давление	13.91 [бар]
Инд. момент цилиндра	150.20 [Н*м]	15.31 [кг*м]
Максимальные значения по циклу:		
Макс. давление сгорания	110.83 [бар]	при Fi= 4.8
Макс. температура цикла	1816.8 [К]	при Fi= 36.8
Макс. жесткость процесса	3.937 [бар/град]	при Fi= -13.3
Среднецикловая температура	788.20 [К]	
Результирующая температура	1123.32 [К]	
Средний коэфф-т теплоотдачи	536.28 [Вт/м ² *К]	
Лучистая составляющая	70.73 [Вт/м ² *К]	(13.19 %)
Газовоздушные каналы:		
ВЫПУСК: Средний к-т ТО	554.87 [Вт/м ² *К]	
Результирующая температура	813.92 [К]	
ВПУСК: Средний к-т ТО	241.56 [Вт/м ² *К]	
Результирующая температура	355.99 [К]	
Коэффициент остаточных газов	.017	Заброс .00 %
Коэффициент наполнения	.915	
Коэффициент продувки	1.017	
Мощность насосных ходов	3.656 [кВт]	(4.97 [л.с.])

*** ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ ***

Количество цилиндров	8 Мех. КПД	.830
Мощность цилиндровая	28.72 [кВт]	39.03 [л.с.]
Мощность двигателя	229.79 [кВт]	312.21 [л.с.]
Мощность мех. потеря	47.04 [кВт]	63.91 [л.с.]
Удельный расход топлива	226.29 [г/кВт*ч]	166.55 [г/л.с.*ч]
Суммарный коэффициент избытка воздуха	1.850	
Расход воздуха	1376.06 [кг/ч]	1176.89 [м ³ /ч]
Расход топлива	52.00 [кг/ч]	63.41 [л/ч]
Из него: жидкое	52.00 [кг/ч], газ	.00 [кг/ч]
Эфф. КПД .374	Эффективное давление	11.54 [бар]
Крутящий момент	997.42 [Н*м]	101.67 [кг*м]

*** ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС РАБОЧЕГО ЦИКЛА ***

Параметр	величина, Дж	% от Q _г	% от Q _п
Располагаемая энергия Q _г	4185.6	100.00	-
Потери энергии при Alfa<1	.0	.00	-
Потери от недогорания	107.2	2.56	-
Подведенная энергия Q _п	4078.4	97.44	100.00
Механическая работа	1887.5	45.09	46.28
Потери тепла в стенки КС	648.9	15.50	15.91
Потери тепла в стенки ГВК	218.5	5.22	5.36
Потери от неплотности КС	18.6	.44	.46
Вынос отработавшими газами	1304.9	31.18	32.00
Полезная работа цикла	1566.7	37.43	38.42
Потери трения в двигателе	320.7	7.66	7.86

*** ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОГ И ВРЕДНЫЕ ВЫБРОСЫ ***

Чистые продукты сгорания:

Компоненты ОГ	Объем ПС кмоль/кг топл.	Объемная доля %	Массовая доля %
Азот N2	.7097847	76.29510	73.82511
Кислород O2	.0849676	9.13321	10.10003
Вода H2O	.0630000	6.77190	4.21243
ДиоксидС CO2	.0724629	7.78907	11.84371
Водород H2	.0000000	.00000	.00000
Угарн.газ CO	.0000371	.00399	.00386
ДиоксидS SO2	.0000625	.00672	.01486
Всего по ЧПС	.9303149	100.00000	100.00000

В ОГ на выхлопе с учетом продувки (1.017):

Компоненты ОГ	Объем ПС кмоль/кг топл.	Объемная доля %	Массовая доля %
Азот N2	.7218059	76.33864	73.87122
Кислород O2	.0881631	9.32418	10.31178
Вода H2O	.0630000	6.66292	4.14486
ДиоксидС CO2	.0724629	7.66372	11.65373
Водород H2	.0000000	.00000	.00000
Угарн.газ CO	.0000371	.00392	.00380
ДиоксидS SO2	.0000625	.00661	.01462
Всего в ОГ	.9455315	99.99999	100.00000

Выход токсичных компонентов ОГ на режиме:

Массовый расход ОГ 1428.06 [кг/ч]
 Объемный расход ОГ 1221.37 [м³/ч] (при н.у.)

Компоненты ОГ	Объем м ³ /ч	Масса кг/ч	Уд. выбросы кг/кВт*ч
Вода H2O	.81379E+02	.59191E+02	.25759E+00
ДиоксидС CO2	.93602E+02	.16642E+03	.72424E+00
Угарн.газ CO	.47932E-01	.54232E-01	.23601E-03
ДиоксидS SO2	.80733E-01	.20879E+00	.90860E-03
Углеводороды	.16989E-01	.46371E-01	.20180E-03

Показания газоанализатора (осушенные ОГ):

Кислород	O2	9.99 % об.
Диоксид углерода	CO2	8.21 % об.
Угарный газ	CO	42. ppm
Диоксид серы	SO2	71. ppm
Углеводороды	CNx	15. ppm
Ср. молярная масса	CNx	79. кг/кмоль

END OF DATA

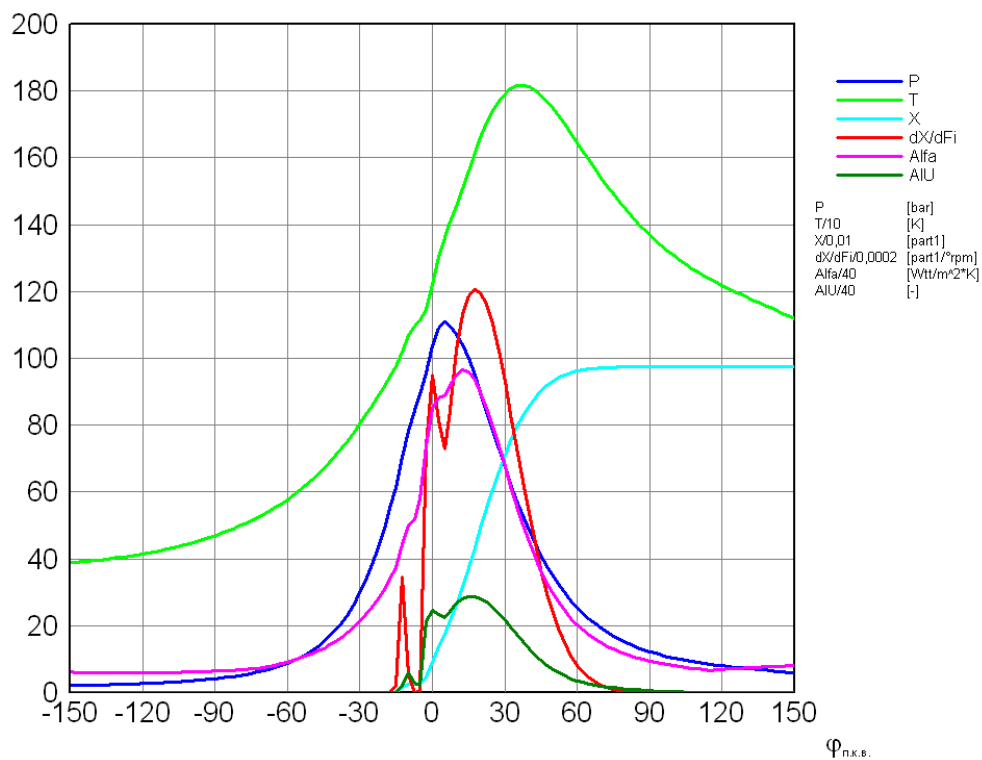


Рис. 3.9. Графики изменения параметров в цилиндре дизеля с двухфазным впрыском топлива на тактах сжатия-сгорания-расширения

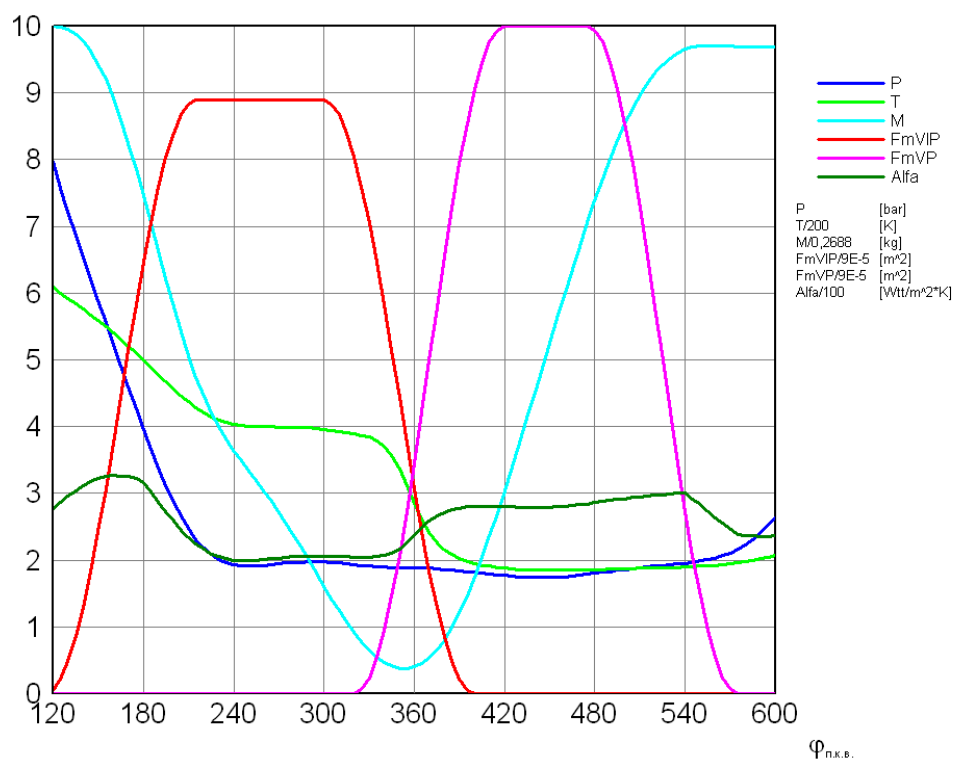


Рис. 3.10. Графики изменения параметров в цилиндре дизеля с двухфазным впрыском топлива на тактах газообмена

Анализ результатов расчета показывает, что при практически одном и том же коэффициенте избытка воздуха (1,819), несмотря на некоторый рост T_z (до 1817 К) величины максимальной скорости нарастания давления и p_z снизились соответственно до 0,394 МПа/°п.к.в. и 11,08 МПа, а среднецикловая температура снизилась на 2 К. Индикаторный к.п.д. при этом возрос до 0,451. Результат был бы еще более значимым, если бы сравнение проводилось по отношению к двигателю с открытой КС.

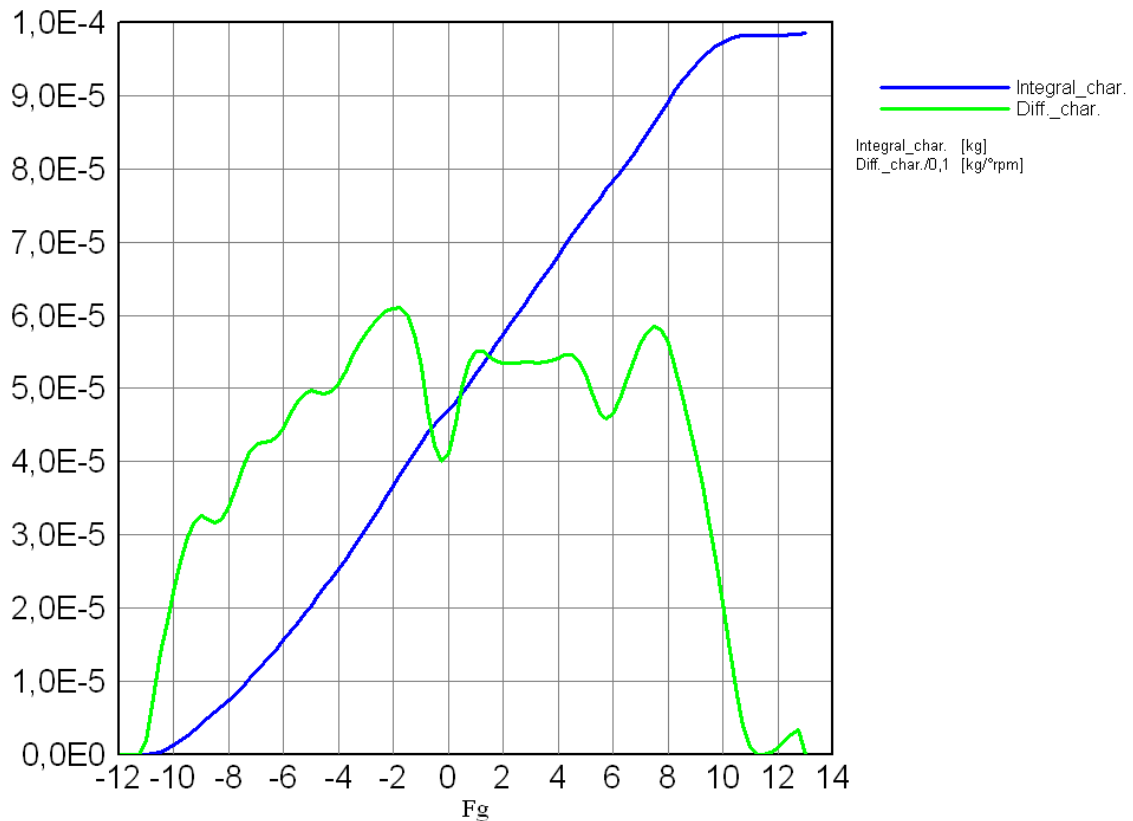


Рис. 3.11. Интегральная ($g_{ц}$) и дифференциальная ($dg_{ц}/d\varphi$) характеристики подачи топлива в основной фазе впрыска

В рассматриваемом примере весьма важным моментом является применение реальной характеристики впрыска топлива представленной на рис. 3.11. В качестве исходных данных задана интегральная характеристика $g_{ц}$, а дифференциальная получена дифференцированием первой. В принципе, программа допускает применение характеристик обоих видов и отвечает на ее форму через параметры тепловыделения (см. рис. 3.9 и протокол расчета, в котором выведены числовые значения параметров на участке активного тепловыделения).

3.2.5. Малоразмерный двухтактный бензиновый двигатель

Для примера расчета используем данные по мотоциклетному двигателю Д-6 производства ОАО “Красный Октябрь”, г. Санкт-Петербург, для легких мопедов. Двигатель высокооборотный (до 5000 об/мин), одноцилиндровый, карбюраторный с воздушным охлаждением от набегающего потока воздуха. Картер двигателя и рубашка охлаждения – из алюминиевого сплава. Смазка узлов трения осуществляется за счет масла, размешанного в топливе (в соотношении 1:20). Продувка цилиндра осуществляется через окна в гильзе цилиндра под давлением, развиваемым поршнем в кривошипной камере.

Исходные данные к расчету сведены в таблицу 3.7.

Таблица 3.7. Исходные данные к моделированию рабочего процесса малоразмерного двухтактного бензинового двигателя

№ строки	Параметры	Обозначения в соответствии с таблицей 3.1
1	2T Otto Engine D6	TEXT
2	*** Variant 005 ***	VAR
3	1 1 1 2 1 3	MT, NDTV, NPF, KDV, ICIL, KPR
4	0.040 0.038 7.90 0.230 0.00 0.0	S, D, EPS, LAM, EXD, UGOL
5	4500 0.800 1.000 0.450 0.000	N, ALFA, DROS, ETAM, ENMEX
6	44.00 115.0 0.855 0.145 0.000	QT, SMT, C, H, OT
7	0.050 0.000 0.000	ST, ANT, H2OT
8	92.0 0.0 730.0	OCHI, CCHM, ROT
9	500.0 500.0 1.005 1.100	TPP, TKK, PKP, PKK
10	440.0 410.0 390.0 0.0010 0.000	TGG, TG1, TG2, STZ, CUKCM
11	60.0 2.50 -15.0 0.900	FIZ, M, FHC, XMAX
12	120.0 240.0 110.0 250.0	FOVP, FZVP, FOVIP, FZVIP
13	1.100 1.050 370.0 900.0	PK, PP, TK, TP
14	4	NVR
15	2 2	KF2, KF1
16	15.0 8.0 1 0.80 2 0.0	DK2, HK2, KO2, MU2, KL2, FIM2
17	20.0 11.0 1 0.75 1 0.0	DK1, HK1, KO1, MU1, KL1, FIM1
18	0.15 0.35	D11, D22
19	0.100 0.600 1.100 370.0	FEKV, DPZ, PKG, TKG
20	0.210 0.000	DO2, EGR
21	2 0.0 0.0 2.000 0.0	IREZ, CH0, SMUCH, UGAR, SMUMC
22	100.00 100.00	Notn, Motn

В данном случае пояснений требуют только данные, определяемые тактностью двигателя и видом применяемого топлива:

1. Для описания процесса тепловыделения используем методику И.И. Вибе ($NDTV = 1$).

2. Вместо расхода топлива на режиме задается коэффициент избытка воздуха в подаваемой карбюратором смеси. (0,80) Расход топлива рассчитывается исходя из наполнения цилиндра горючей смесью.

3. Весьма малое значение механического к.п.д. (0,45) определяется тем, что у двигателя всего один цилиндр и высокая эксплуатационная скорость вращения коленчатого вала.

4. Используемое топливо – бензин АИ-92, по составу близкий к прямомгонному (без кислородсодержащих добавок). Наличие моторного масла в топливе в расчетах не учитывается.

5. Параметры тепловыделения настроены по экспериментальным мощностным параметрам двигателя на режиме.

6. Поскольку двигатель имеет кривошипно-камерный тип продувки через окна в гильзе цилиндра, фазы газораспределения симметричны относительно НМТ, причем выпускные окна открываются раньше, а закрываются позже впускных.

7. В качестве давления продувки используется среднее давление в кривошипной камере за период газообмена.

8. Параметры D11 и D22 подобраны для получения параметров газообмена, отвечающих качеству кривошипно-камерной продувки.

Результаты расчета приведены ниже в виде протокола и графиков на рис. 3.12 и 3.13.

Протокол расчета рабочего цикла малоразмерного двухтактного бензинового двигателя:

```
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ДВС НА БАЗЕ
"РАЗОМКНУТОЙ" СХЕМЫ СИСТЕМЫ РЕСИВЕР - ЦИЛИНДР - КОЛЛЕКТОР

2T Otto Engine D6 *** Variant 005 ***

S = 40.0 D = 38.0 [мм]; Epsr = 7.9; Lam = .230; Ex = .000
Epsd = 6.0 Режим:
Pk = 1.10 [бар] Tk = 370.0 [K] N = 4500 [1/мин]
Pr = 1.05 [бар] Tr = 900.0 [K] Gt = .80 [кг/ч]
Vh .045 [дм^3] Dros = 1.000 Cm = 6.00 [м/с]
dTk = .00 [K]
```

Температуры стенок камеры, [K]: $C_u/C_m = .000$
поршня $T_p = 500.0$; гильзы $T_g = 412.4$; крышки $T_k = 500.0$

Параметры тепловыделения по И.И.Виббе:
 $F_{iz} = 60.0$ $M = 2.50$ $F_{nc} = -15.0$ $X_{max} = .900$
Продолжительность сгорания $F_{sp} = 63.2$ град. пкв
Доля выг. топлива к моменту $C = .047$
Доля выг. топлива к моменту $Z = .818$ (29.4 пкв)
Макс. доля выгоревшего топлива $= .900$
Цикловая подача топлива $= .2966E-05$ кг/цикл

Фазы газораспределения: выпуск 110.0 - 250.0
впуск 120.0 - 240.0

Максимальные условные площади проходных сечений
органов газораспределения: выпуск 1.65 [см**2]
впуск 1.92 [см**2]

Условное давление конца сжатия P_c 13.6 [бар]
Давление в цилиндре к концу расширения P_b 4.67 [бар]
Усредненный показатель политропы сжатия 1.365
Усредненный показатель политропы расширения 1.374
Степень повышения давления 2.219
Степень предварительного расширения 1.539
Степень последующего расширения 5.133
Коэффициент полноты идеальной диаграммы .913
Средняя температура газов за период выпуска 853.7 [K]
Температура ОГ в выпускном патрубке 882.3 [K]

Эквивалентная условная площадь перетечек .02280 [мм**2]
Массовая доля потери рабочего тела из КС .600 %
Давление картерных газов 1.100 [бар], темп-ра 370.0 [K]

Элементарный состав топлива С/Н/О (доли от 1): .855/.145/.000
Примеси к топливу Сера/Азот/Вода, % : .050/.000/ .00
Стехиометрическое соотношение L_0 : 14.820 [кг возд./кг топл.]
Октановое число ОЧИ: 92.0; Цетановое число ЦЧ: 14.0
Плотность топлива: 730.0; Воздуха на впуске: 1.036 [кг/м^3]
EGR: .0 % Воздух O2/N2: .210/.790; $SMU_{воз} = 28.960$
 L_0R : 14.820 Заряд O2/N2: .210/.790; $SMU_{зрд} = 28.960$

Qн топлива при $\alpha=1$: 44.00 ; истинная: 32.44 [МДж/кг]
Qн смеси при $\alpha=1$: 2781.4 ; истинная: 2523.7 [КДж/кг]

*** ИНДИКАТОРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЦИКЛА ***

Мощность 2.40 [кВт] 3.26 [л.с.]
Расход топлива 333.61 [г/кВт*ч] 245.54 [г/л.с.*ч]
Действительный коэффициент избытка воздуха .800
Действительный расход воздуха на цилиндр 9.50 [кг/ч]
Инд. КПД .245 Индикаторное давление 7.06 [бар]
Инд. момент цилиндра 5.09 [Н*м] .52 [кг*м]

Максимальные значения по циклу:
Макс. давление сгорания 30.15 [бар] при $F_i = 22.4$
Макс. температура цикла 2904.2 [K] при $F_i = 32.0$
Макс. жесткость процесса .906 [бар/град] при $F_i = 9.1$

Среднецикловая температура 1248.50 [K]
Результирующая температура 1737.40 [K]
Средний коэфф-т теплоотдачи 267.27 [Вт/м^2*K]
Лучистая составляющая 2.78 [Вт/м^2*K] (1.04 %)

Газовоздушные каналы:

ВЫПУСК: Средний к-т ТО 276.15 [Вт/м²*К]
 Результирующая температура 938.91 [К]
 ВПУСК: Средний к-т ТО 151.35 [Вт/м²*К]
 Результирующая температура 379.11 [К]

Коэффициент остаточных газов .278 Заброс 20.02 %
 Коэффициент наполнения .438
 Коэффициент продувки 1.616
 Мощность насосных ходов .163 [кВт] (.22 [л.с.])

*** ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ ***

Количество цилиндров 1 Мех. КПД .450
 Мощность цилиндровая 1.08 [кВт] 1.47 [л.с.]
 Мощность двигателя 1.08 [кВт] 1.47 [л.с.]
 Мощность мех. потерь 1.32 [кВт] 1.79 [л.с.]
 Удельный расход топлива 741.35 [г/кВт*ч] 545.63 [г/л.с.*ч]
 Суммарный коэффициент избытка воздуха .800
 Расход воздуха 9.50 [кг/ч] 8.12 [м³/ч]
 Расход топлива .80 [кг/ч] 1.10 [л/ч]
 Из него: жидкое .80 [кг/ч], газ .00 [кг/ч]
 Эфф. КПД .110 Эффективное давление 3.18 [бар]
 Крутящий момент 2.29 [Н*м] .23 [кг*м]

*** ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС РАБОЧЕГО ЦИКЛА ***

Параметр	величина, Дж	% от Qr	% от Qп
Располагаемая энергия Qr	130.5	100.00	-
Потери энергии при Alfa<1	34.3	26.26	-
Потери от недогорания	9.6	7.37	-
Подведенная энергия Qп	86.6	66.36	100.00
Механическая работа	32.0	24.53	36.96
Потери тепла в стенки КС	15.4	11.82	17.81
Потери тепла в стенки ГВК	3.7	2.85	4.29
Потери от неплотности КС	.4	.31	.47
Вынос отработавшими газами	35.1	26.86	40.48
Полезная работа цикла	14.4	11.04	16.63
Потери трения в двигателе	17.6	13.49	20.33

*** ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОГ И ВРЕДНЫЕ ВЫБРОСЫ ***

Чистые продукты сгорания:

Компоненты ОГ	Объем ПС кмоль/кг топл.	Объемная доля %	Массовая доля %
Азот N2	.3234092	69.13779	71.03123
Кислород O2	.0006000	.12827	.15061
Вода H2O	.0576209	12.31809	8.13564
Диоксид С CO2	.0381853	8.16319	13.17918
Водород H2	.0148791	3.18082	.23342
Угарн.газ СО	.0330647	7.06850	7.26208
ДиоксидS SO2	.0000156	.00334	.00784
Всего по ЧПС	.4677748	99.99999	99.99998

В ОГ на выхлопе с учетом продувки (1.616) :

Компоненты ОГ	Объем ПС кмоль/кг топл.	Объемная доля %	Массовая доля %
Азот N2	.5227731	72.59384	73.09101
Кислород O2	.0535955	7.44243	8.56389
Вода H2O	.0576209	8.00141	5.17899
ДиоксидС CO2	.0381853	5.30253	8.38962
Водород H2	.0148791	2.06616	.14859
Угарн.газ CO	.0330647	4.59146	4.62290
ДиоксидS SO2	.0000156	.00217	.00499
Всего в ОГ	.7201343	99.99998	99.99999

Выход токсичных компонентов ОГ на режиме:

Массовый расход ОГ	10.30 [кг/ч]
Объемный расход ОГ	8.81 [м ³ /ч] (при н.у.)

Компоненты ОГ	Объем м ³ /ч	Масса кг/ч	Уд. выбросы кг/кВт*ч
Вода H2O	.70463E+00	.53327E+00	.49361E+00
ДиоксидС CO2	.46696E+00	.86386E+00	.79961E+00
Угарн.газ CO	.40434E+00	.47601E+00	.44061E+00
ДиоксидS SO2	.19107E-03	.51415E-03	.47591E-03
Углеводороды	.14678E-02	.37704E-02	.34900E-02

Показания газоанализатора (осушенные ОГ) :

Кислород O2	8.09 % об.
Диоксид углерода CO2	5.76 % об.
Угарный газ CO	4.99 % об.
Диоксид серы SO2	24. ppm
Углеводороды CHx	181. ppm
Ср. молярная масса CHx	71. кг/кмоль

END OF DATA

Анализ результатов расчета показывает, что величины p_z (3,02 МПа) и индикаторного к.п.д. (0,245) весьма низки, при этом T_z составляет 2904 К. Это объясняется, в первую очередь, низким коэффициентом наполнения (0,438) и высоким коэффициентом остаточных газов (0,278). С учетом относительно высоких механических потерь в двигателе, его эффективная мощность также не высока, а эффективный к.п.д. составляет всего 0,110.

Полученные в расчете параметры в целом показывают низкий уровень форсирования (определяется кривошипно-камерным типом продувки цилиндра и воздушным типом охлаждения) и технического совершенства двигателя. Безусловным резервом в повышении мощности и эффективности рассмотренного двигателя является совершенствование его органов газораспределения.

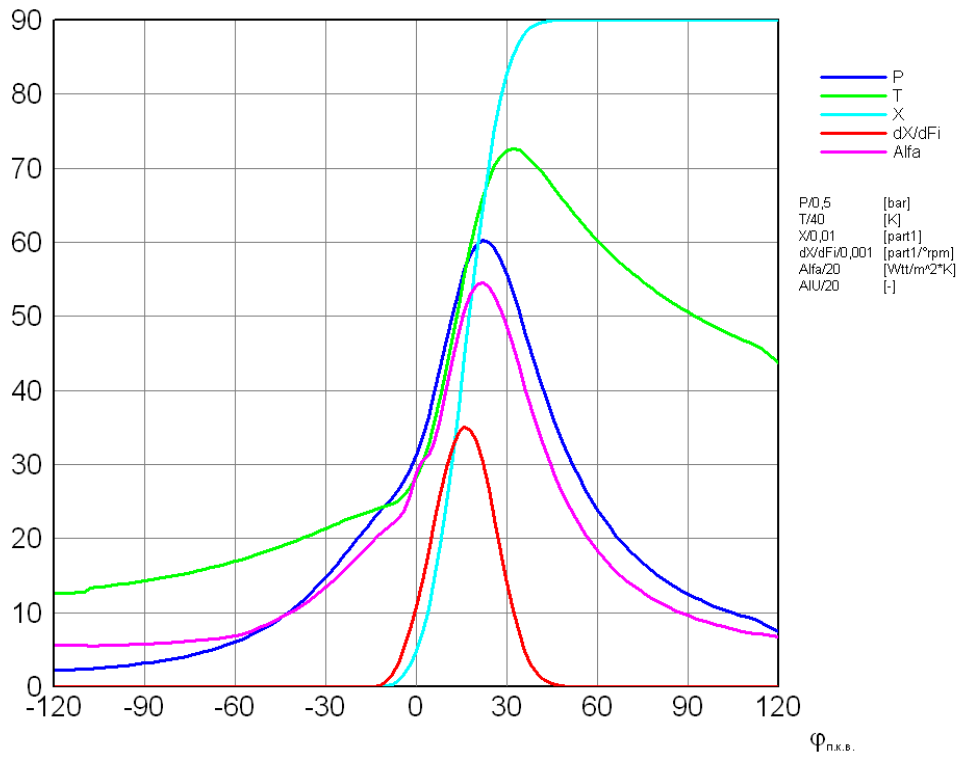


Рис. 3.12. Графики изменения параметров в цилиндре двухтактного бензинового двигателя на тактах сжатия-сгорания-расширения

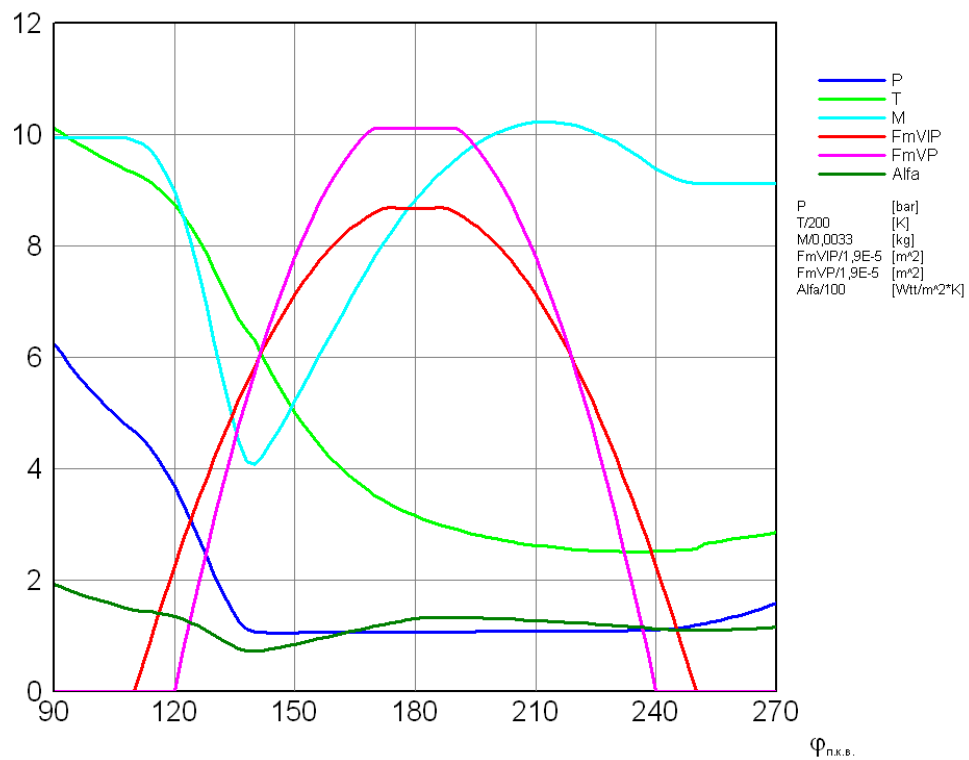


Рис. 3.13. Графики изменения параметров в цилиндре двухтактного бензинового двигателя на тактах газообмена

3.2.6. Малооборотный двухтактный дизельный двигатель

В данном примере будем опираться на данные по судовому двигателю MAN B&W марки S26MC. Двигатель крейцкопфный, малооборотный (250 об/мин) с прямоугольными продувочными окнами и золотником на впуске. Исходные данные к расчету сведены в таблицу 3.8.

Таблица 3.8. Исходные данные к моделированию рабочего процесса малооборотного двухтактного дизельного двигателя

№ строки	Параметры	Обозначения в соответствии с таблицей 3.1
1	MAN B&W S26MC	TEXT
2	*** Variant 006 ***	VAR
3	1 4 1 1 6 3	MT, NDTV, NPF, KDV, ICIL, KPR
4	0.980 0.260 18.00 0.250 0.00 0.0	S, D, EPS, LAM, EXD, UGOL
5	250 55.00 1.000 0.920 0.000	N, GT, DROS, ETAM, ENMEX
6	44.51 190.0 0.880 0.120 0.000	QT, SMT, C, H, OT
7	0.500 0.015 0.000	ST, ANT, H2OT
8	10.0 51.0 890.0	OCHI, CCHM, ROT
9	580.0 540.0 1.200 1.000	TPP, TKK, PKP, PKK
10	410.0 390.0 380.0 0.0080 0.000	TGG, TG1, TG2, STZ, CUKCM
11	-12.0 24.0 0.21 1.00 0.0	FHC, FVG, DIKAM, ZX1, ZFI2
12	140.0 240.0 125.0 235.0	FOVP, FZVP, FOVIP, FZVIP
13	2.000 1.800 315.0 800.0	PK, PP, TK, TP
14	4	NVR
15	2 2	KF2, KF1
16	50.0 200.0 1 0.80 4 170.0	DK2, HK2, KO2, MU2, KL2, FIM2
17	50.0 170.0 1 0.75 4 .0	DK1, HK1, KO1, MU1, KL1, FIM1
18	0.30 0.40	D11, D22
19	0.200 0.500 1.000 360.0	FEKV, DPZ, PKG, TKG
20	0.210 0.000	DO2, EGR
21	2 .0 .0 1.500 .0	IREZ, CH0, SMUCH, UGAR, SMUMC
22	100.00 100.00	Notn, Motn

В качестве необходимых пояснений приведем следующее:

1. Для описания процесса тепловыделения используем методику Б.П. Пугачева для открытых камер сгорания (NDTV = 4).
2. Высокое значение механического к.п.д. (0,92) соответствует параметрам двухтактных форсированных судовых дизелей.
3. Используемое топливо – дизельный мазут с содержанием серы 0,5%. Результаты расчета приведены в протоколе и на графиках рис. 3.14-3.16.

**Протокол расчета рабочего цикла
малооборотного двухтактного дизельного двигателя:**

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ДВС НА БАЗЕ
"РАЗОМКНУТОЙ" СХЕМЫ СИСТЕМЫ РЕСИВЕР - ЦИЛИНДР - КОЛЛЕКТОР

MAN B&W S26MC *** Variant 006 ***

S = 980.0 D = 260.0 [мм]; Epsr = 18.0; Lam = .250; Eх = .000

Epsd = 14.5 Режим:

Pk = 2.00 [бар] Tk = 315.0 [K] N = 250 [1/мин]

Pr = 1.80 [бар] Tr = 800.0 [K] Gt = 55.00 [кг/ч]

Vh 52.031 [дм³] Dros = 1.000 Cm = 8.17 [м/с]

dTk = 6.67 [K]

Температуры стенок камеры, [K]: Cu/Cm = .000

поршня Tr = 580.0; гильзы Tg = 391.8; крышки Tk = 540.0

Параметры тепловыделения по Б.П.Пугачеву:

Fнвпр = -12.0 Fвпр = 24.0 ДИКАМ = .210 [м]

X1 = .007 X2 = .967 FI1 = 1.34 FI2 = 22.5

K1 = 2.00 K2 = 2.38 угол начала сгорания Fнс = -10.50

Угол задержки самовоспламенения = 1.50 (.999 мс)

Продолжительность сгорания Fсг = 67.5 град. пкв

Доля выг. топлива к моменту C = .094

Доля выг. топлива к моменту Z = .722 (21.6 пкв)

Макс. доля выгоревшего топлива = .974

Цикловая подача топлива = .3667E-02 кг/цикл

Фазы газораспределения: выпуск 125.0 - 235.0

впуск 140.0 - 240.0

Максимальные условные площади проходных сечений

органов газораспределения: выпуск 251.77 [см^{**2}]

впуск 318.50 [см^{**2}]

Условное давление конца сжатия Pс 88.9 [бар]

Давление в цилиндре к концу расширения Pв 6.33 [бар]

Усредненный показатель политропы сжатия 1.401

Усредненный показатель политропы расширения 1.377

Степень повышения давления 1.396

Степень предварительного расширения 1.739

Степень последующего расширения 10.354

Коэффициент полноты идеальной диаграммы .930

Средняя температура газов за период выпуска 489.5 [K]

Температура ОГ в выпускном патрубке 705.1 [K]

Эквивалентная условная площадь перетечек .82618 [мм^{**2}]

Массовая доля потери рабочего тела из КС .500 %

Давление картерных газов 1.000 [бар], темп-ра 360.0 [K]

Элементарный состав топлива С/Н/О (доли от 1): .880/.120/.000

Примеси к топливу Сера/Азот/Вода, % : .500/.015/ .00

Стехиометрическое соотношение L0: 14.199 [кг возд./кг топл.]

Октановое число ОЧИ: 10.0; Цетановое число ЦЧ: 51.0

Плотность топлива: 890.0; Воздуха на впуске: 2.212 [кг/м³]

EGR: .0 % Воздух O2/N2: .210/.790; SMUвоз = 28.960

L0R: 14.199 Заряд O2/N2: .210/.790; SMUзрд = 28.960

Qн топлива при Alfa=1: 44.51 ; истинная: 44.51 [МДж/кг]

Qн смеси при Alfa=1: 2928.6 ; истинная: 1663.2 [КДж/кг]

*** ИНДИКАТОРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЦИКЛА ***

Мощность	326.12 [кВт]	443.09 [л.с.]
Расход топлива	168.65 [г/кВт*ч]	124.13 [г/л.с.*ч]
Действительный коэффициент избытка воздуха	1.814	
Действительный расход воздуха на цилиндр	2235.20 [кг/ч]	
Инд. КПД .480	Индикаторное давление	15.04 [бар]
Инд. момент цилиндра	12456.71 [Н*м]	1269.80 [кг*м]
Максимальные значения по циклу:		
Макс. давление сгорания	124.14 [бар]	при Fi= 10.2
Макс. температура цикла	1912.3 [К]	при Fi= 27.4
Макс. жесткость процесса	3.548 [бар/град]	при Fi= -1.6
Среднецикловая температура	826.48 [К]	
Результирующая температура	1299.32 [К]	
Средний коэфф-т теплоотдачи	802.78 [Вт/м ² *К]	
Лучистая составляющая	196.12 [Вт/м ² *К]	(24.43 %)
Газовоздушные каналы:		
ВЫПУСК: Средний к-т ТО	214.28 [Вт/м ² *К]	
Результирующая температура	778.48 [К]	
ВПУСК: Средний к-т ТО	102.91 [Вт/м ² *К]	
Результирующая температура	312.92 [К]	
Коэффициент остаточных газов	.034	Заброс 1.37 %
Коэффициент наполнения	.776	
Коэффициент продувки	1.577	
Мощность насосных ходов	10.177 [кВт]	(13.83 [л.с.])

*** ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ ***

Количество цилиндров	6	Мех. КПД	.920
Мощность цилиндровая	300.03 [кВт]		407.64 [л.с.]
Мощность двигателя	1800.16 [кВт]		2445.87 [л.с.]
Мощность мех. потеря	156.54 [кВт]		212.68 [л.с.]
Удельный расход топлива	183.32 [г/кВт*ч]		134.92 [г/л.с.*ч]
Суммарный коэффициент избытка воздуха			2.862
Расход воздуха	13411.21 [кг/ч]		11470.08 [м ³ /ч]
Расход топлива	330.00 [кг/ч]		370.79 [л/ч]
Из него: жидкое	330.00 [кг/ч], газ		.00 [кг/ч]
Эфф. КПД .441	Эффективное давление		13.84 [бар]
Крутящий момент	68761.05 [Н*м]		7009.28 [кг*м]

*** ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС РАБОЧЕГО ЦИКЛА ***

Параметр	величина, Дж	% от Q _г	% от Q _п
Располагаемая энергия Q _г	163203.3	100.00	-
Потери энергии при Alfa<1	.0	.00	-
Потери от недогорания	4220.7	2.59	-
Подведенная энергия Q _п	158982.7	97.41	100.00
Механическая работа	78267.8	47.96	49.23
Потери тепла в стенке КС	30512.8	18.70	19.19
Потери тепла в стенки ГВК	4997.8	3.06	3.14
Потери от неплотности КС	686.2	.42	.43
Вынос отработавшими газами	44518.1	27.28	28.00
Полезная работа цикла	72006.4	44.12	45.29
Потери трения в двигателе	6261.4	3.84	3.94

*** ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОГ И ВРЕДНЫЕ ВЫБРОСЫ ***

Чистые продукты сгорания:

Компоненты ОГ	Объем ПС кмоль/кг топл.	Объемная доля %	Массовая доля %
Азот N2	.7027670	76.37870	73.76250
Кислород O2	.0838521	9.11329	10.05843
Вода H2O	.0600000	6.52097	4.04846
ДиоксидС CO2	.0732951	7.96591	12.08909
Водород H2	.0000000	.00000	.00000
Угарн.газ CO	.0000383	.00416	.00402
ДиоксидS SO2	.0001562	.01698	.03749
Всего по ЧПС	.9201086	100.00000	99.99999

В ОГ на выхлопе с учетом продувки (1.577):

Компоненты ОГ	Объем ПС кмоль/кг топл.	Объемная доля %	Массовая доля %
Азот N2	1.1083770	77.31752	74.81067
Кислород O2	.1916724	13.37058	14.78522
Вода H2O	.0600000	4.18545	2.60341
ДиоксидС CO2	.0732951	5.11288	7.77402
Водород H2	.0000000	.00000	.00000
Угарн.газ CO	.0000383	.00267	.00258
ДиоксидS SO2	.0001562	.01090	.02411
Всего в ОГ	1.4335390	100.00000	100.00000

Выход токсичных компонентов ОГ на режиме:

Массовый расход ОГ 13741.21 [кг/ч]
 Объемный расход ОГ 11752.31 [м³/ч] (при н.у.)

Компоненты ОГ	Объем м ³ /ч	Масса кг/ч	Уд. выбросы кг/кВт*ч
Вода H2O	.49199E+03	.35782E+03	.19878E+00
ДиоксидС CO2	.60101E+03	.10685E+04	.59357E+00
Угарн.газ CO	.31482E+00	.35616E+00	.19786E-03
ДиоксидS SO2	.12812E+01	.33131E+01	.18405E-02
Углеводороды	.18022E+00	.55372E+00	.30761E-03

Показания газоанализатора (осушенные ОГ):

Кислород	O2	13.95 % об.
Диоксид углерода	CO2	5.34 % об.
Угарный газ	CO	28. ppm
Диоксид серы	SO2	114. ppm
Углеводороды	СНх	16. ppm
Ср. молярная масса	СНх	89. кг/кмоль

END OF DATA

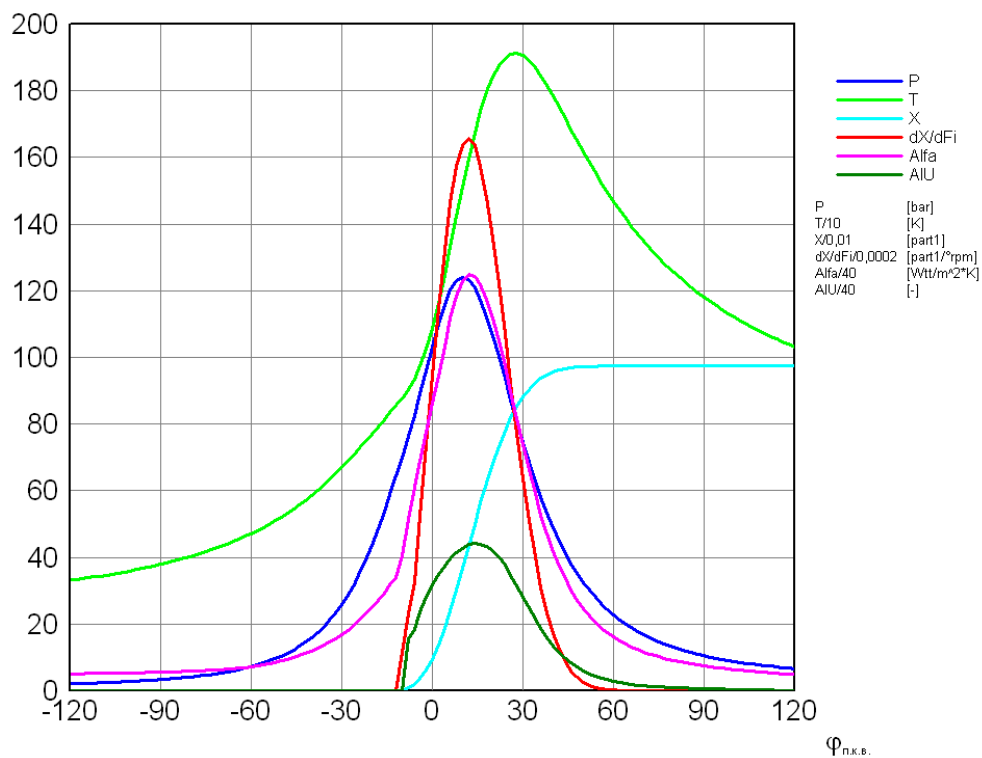


Рис. 3.14. Графики изменения параметров в цилиндре двухтактного малооборотного дизеля на тактах сжатия-сгорания-расширения

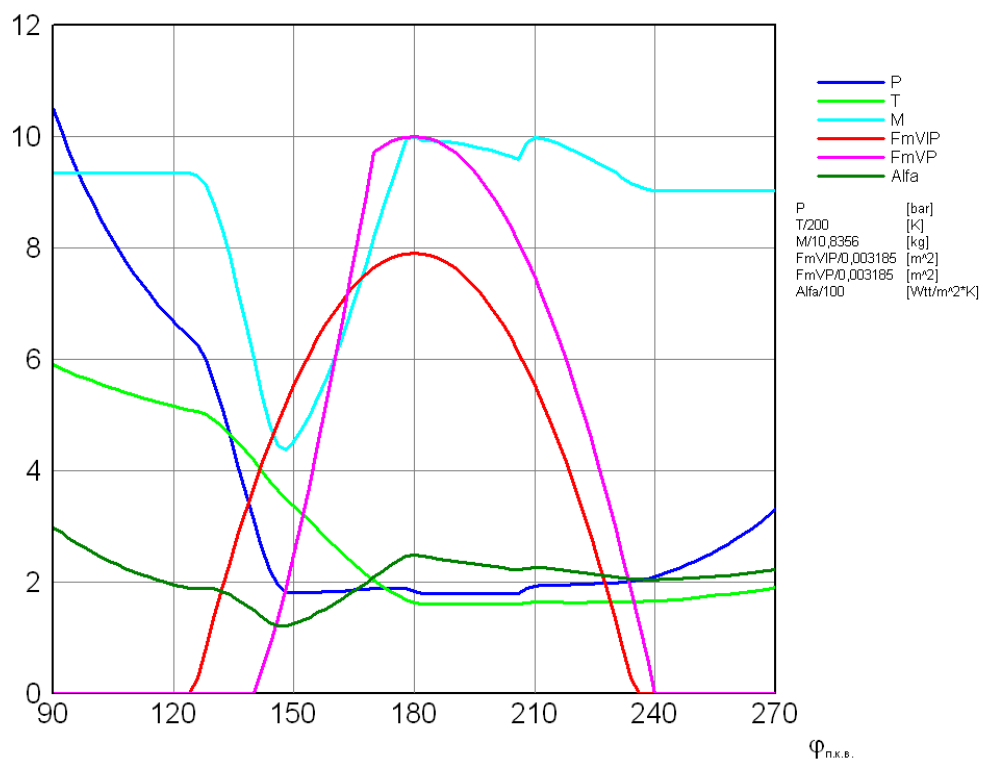


Рис. 3.15. Графики изменения параметров в цилиндре двухтактного малооборотного дизеля на тактах газообмена

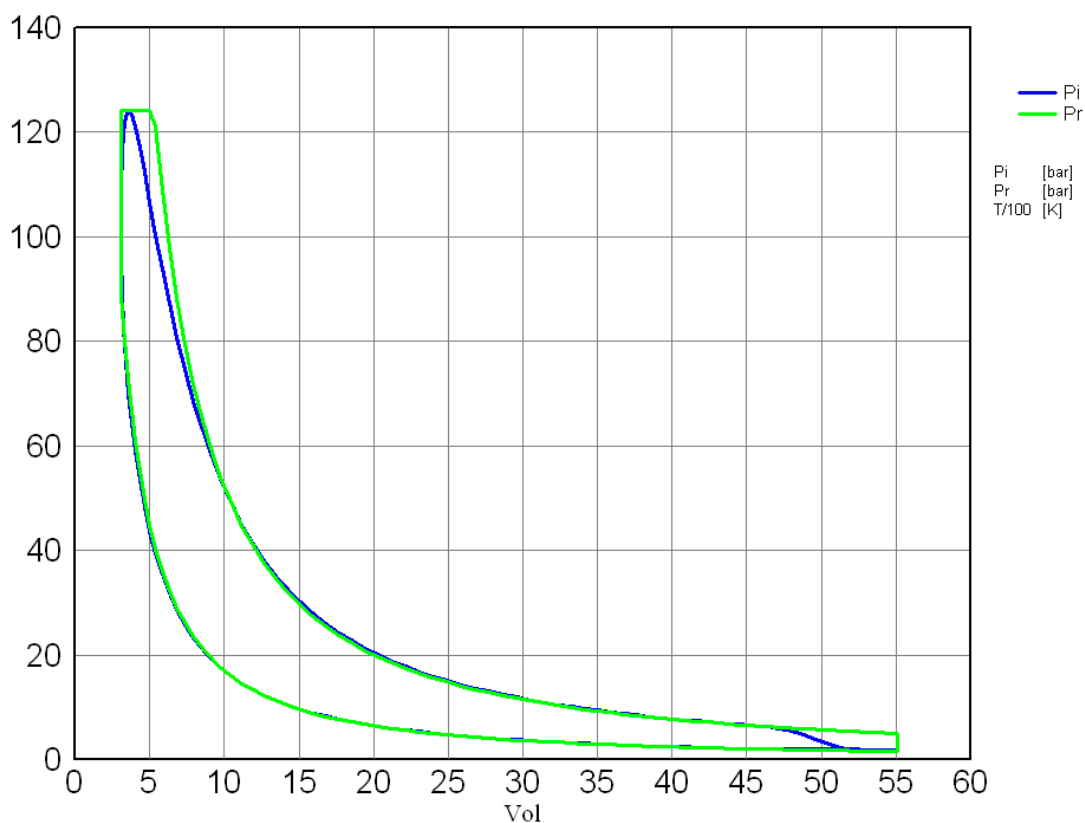


Рис. 3.16. Индикаторная диаграмма малооборотного дизеля с открытой КС (P_i), вписанная в «идеальный» рабочий цикл Сабатэ-Тринклера (P_r)

Анализ результатов расчета показывает, что величины p_z (12,41 МПа) и T_z (1912 К) достаточно высоки, в то время, что определяется высокой степенью сжатия и относительно низким коэффициентом наполнения. Индикаторный к.п.д. (0,480) также достаточно высок, тем не менее, максимальная скорость нарастания давления в цилиндре составила всего 0,355 МПа/°п.к.в., поскольку задержка воспламенения составила всего 1,5 °п.к.в. Благодаря относительно малым механическим потерям в двигателе, его эффективный к.п.д. составил 0,441.

В заключение к расчету двухтактного судового дизеля следует сказать, что расчет весьма чувствителен к задаваемым параметрам, определяющим протекание процесса газообмена, в том числе настроечным параметрам D11 и D22. Для правильной настройки процесса газообмена двухтактного двигателя крайне желательно наличие экспериментальных данных по расходу воздуха.

3.2.7. Малооборотный двухтактный газовый двигатель

В данном примере, как и в предыдущем, будем опираться на данные по судовому двигателю MAN B&W марки S26MC, посчитав, что двигатель переведен на газ. В качестве топлива используем регазифицированный СПГ марки А. Исходные данные к расчету сведены в таблицу 3.9.

Таблица 3.9. Исходные данные к моделированию рабочего процесса малооборотного двухтактного газового двигателя

№ строки	Параметры	Обозначения в соответствии с таблицей 3.1
1	MAN B&W S26MC	TEXT
2	*** Variant 007 ***	VAR
3	1 1 1 2 6 3	MT, NDTV, NPF, KDV, ICIL, KPR
4	0.980 0.260 13.00 0.250 0.00 0.0	S, D, EPS, LAM, EXD, UGOL
5	250 1.400 1.000 0.000 156.5	N, ALFA, DROS, ETAM, ENMEX
6	48.50 16.0 0.750 0.250 0.000	QT, SMT, C, H, OT
7	0.001 0.020 0.000	ST, ANT, H2OT
8	105.0 0.0 500.0	OCHI, CCHM, ROT
9	580.0 540.0 1.200 1.000	TPP, TKK, PKP, PKK
10	410.0 390.0 380.0 0.0100 0.000	TGG, TG1, TG2, STZ, CUKCM
11	80.0 2.00 -20.0 0.980	FIZ, M, FHC, XMAX
12	140.0 240.0 125.0 235.0	FOVP, FZVP, FOVIP, FZVIP
13	1.700 1.600 315.0 1000.0	PK, PP, TK, TP
14	4	NVR
15	2 2	KF2, KF1
16	50.0 200.0 1 0.80 4 170.0	DK2, HK2, KO2, MU2, KL2, FIM2
17	50.0 170.0 1 0.75 4 .0	DK1, HK1, KO1, MU1, KL1, FIM1
18	0.30 0.40	D11, D22
19	0.200 0.500 1.000 360.0	FEKV, DPZ, PKG, TKG
20	0.210 0.000	DO2, EGR
21	2 .0 .0 1.500 .0	IREZ, CH0, SMUCH, UGAR, SMUMC
22	100.00 100.00	Notn, Motn

Необходимые пояснения к расчету:

1. Двигатель рассчитывается как «бензиновый», $KDV = 2$ (двухтактный газовый двигатель может быть рассчитан только в режиме «эмуляции» как бензиновый, когда параметры газового топлива задаются вместо жидкого, плотность топлива задается для сжиженной фазы газа).

2. Динамика тепловыделения – по И.И. Вибе, $NDTV = 1$.

3. Степень сжатия понижена до 13 относительно дизельного варианта.

4. Двигатель дефорсирован по надуву до 1,7 бар для ограничения тепловой напряженности деталей ЦПГ двигателя.

5. Мощность механических потерь в двигателе соответствует дизельному варианту (взята из предыдущего расчета).

Результаты расчета приведены в протоколе и на графиках рис. 3.17.

**Протокол расчета рабочего цикла
малооборотного двухтактного газового двигателя:**

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ДВС НА БАЗЕ
"РАЗОМКНУТОЙ" СХЕМЫ СИСТЕМЫ РЕСИВЕР - ЦИЛИНДР - КОЛЛЕКТОР

MAN B&W S26MC *** Variant 007 ***

S = 980.0 D = 260.0 [мм]; Epsr = 13.0; Lam = .250; Ex = .000

Epsd = 10.6 Режим:
Pk = 1.70 [бар] Tk = 315.0 [K] N = 250 [1/мин]
Pr = 1.60 [бар] Tr = 1000.0 [K] Gt = 70.08 [кг/ч]
Vh 52.031 [дм³] Dros = 1.000 Cm = 8.17 [м/с]
dTk = 6.97 [K]

Температуры стенок камеры, [K]: Cu/Cm = .000
поршня Tr = 580.0; гильзы Tg = 391.9; крышки Tk = 540.0

Параметры тепловыделения по И.И.Вибе:

Fiz = 80.0 M = 2.00 Fnc = -20.0 Xmax = .980
Продолжительность сгорания Fsg = 83.7 град. пкв
Доля выг. топлива к моменту C = .100
Доля выг. топлива к моменту Z = .785 (29.3 пкв)
Макс. доля выгоревшего топлива = .980
Цикловая подача топлива = .4672E-02 кг/цикл

Фазы газораспределения: выпуск 125.0 - 235.0
впуск 140.0 - 240.0

Максимальные условные площади проходных сечений
органов газораспределения: выпуск 251.77 [см^{**2}]
впуск 318.50 [см^{**2}]

Условное давление конца сжатия Pc 48.7 [бар]
Давление в цилиндре к концу расширения Pb 8.56 [бар]
Усредненный показатель политропы сжатия 1.406
Усредненный показатель политропы расширения 1.373
Степень повышения давления 1.884
Степень предварительного расширения 1.944
Степень последующего расширения 6.687
Коэффициент полноты идеальной диаграммы .930
Средняя температура газов за период выпуска 616.5 [K]
Температура ОГ в выпускном патрубке 882.8 [K]

Эквивалентная условная площадь перетечек .92634 [мм^{**2}]
Массовая доля потери рабочего тела из КС .500 %
Давление картерных газов 1.000 [бар], темп-ра 360.0 [K]

Элементарный состав топлива С/Н/О (доли от 1): .750/.250/.000
Примеси к топливу Сера/Азот/Вода, % : .001/.020/.00
Стехиометрическое соотношение L0: 17.235 [кг возд./кг топл.]

Октановое число ОЧИ: 105.0; Цетановое число ЦЧ: 7.5
 Плотность топлива: 500.0; Воздуха на впуске: 1.880 [кг/м³]
 EGR: .0 % Воздух O2/N2: .210/.790; SMUвоз = 28.960
 LOR: 17.235 Заряд O2/N2: .210/.790; SMUзрд = 28.960

Qн топлива при Alfa=1: 48.50 ; истинная: 48.50 [МДж/кг]
 Qн смеси при Alfa=1: 2659.8 ; истинная: 1930.1 [КДж/кг]

*** ИНДИКАТОРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЦИКЛА ***

Мощность	423.11 [кВт]	574.88 [л.с.]
Расход топлива	165.64 [г/кВт*ч]	121.91 [г/л.с.*ч]
Действительный коэффициент избытка воздуха	1.400	
Действительный расход воздуха на цилиндр	1691.02 [кг/ч]	
Инд. КПД .448	Индикаторное давление	19.52 [бар]
Инд. момент цилиндра	16161.54 [Н*м]	1647.46 [кг*м]

Максимальные значения по циклу:

Макс. давление сгорания	91.79 [бар]	при Fi=	15.7
Макс. температура цикла	2535.0 [K]	при Fi=	36.0
Макс. жесткость процесса	2.643 [бар/град]	при Fi=	-.1

Среднецикловая температура	1059.67 [K]
Результирующая температура	1530.06 [K]
Средний коэфф-т теплоотдачи	532.33 [Вт/м ² *K]
Лучистая составляющая	1.95 [Вт/м ² *K] (.37 %)

Газовоздушные каналы:

ВЫПУСК: Средний к-т ТО	171.41 [Вт/м ² *K]
Результирующая температура	998.07 [K]
ВПУСК: Средний к-т ТО	88.25 [Вт/м ² *K]
Результирующая температура	314.54 [K]

Коэффициент остаточных газов	.041	Заброс	2.95 %
Коэффициент наполнения	.759		
Коэффициент продувки	1.404		
Мощность насосных ходов	15.719 [кВт]	(21.36 [л.с.])

*** ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ ***

Количество цилиндров	6	Мех. КПД	.938
Мощность цилиндровая	397.02 [кВт]		539.44 [л.с.]
Мощность двигателя	2382.15 [кВт]		3236.61 [л.с.]
Мощность мех. потерь	156.50 [кВт]		212.64 [л.с.]
Удельный расход топлива	176.52 [г/кВт*ч]		129.92 [г/л.с.*ч]
Суммарный коэффициент избытка воздуха	1.400		
Расход воздуха	10146.14 [кг/ч]		8677.59 [м ³ /ч]
Расход топлива	420.51 [кг/ч]		841.02 [л/ч]
Из него: жидкое	420.51 [кг/ч], газ		.00 [кг/ч]
Эфф. КПД .420	Эффективное давление		18.31 [бар]
Крутящий момент	90991.36 [Н*м]		9275.37 [кг*м]

*** ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС РАБОЧЕГО ЦИКЛА ***

Параметр	величина, Дж	% от Qr	% от Qп
Располагаемая энергия Qr	226606.9	100.00	-
Потери энергии при Alfa<1	.0	.00	-
Потери от недогорания	4532.2	2.00	-
Подведенная энергия Qп	222074.7	98.00	100.00
Механическая работа	101545.9	44.81	45.73

Потери тепла в стенки КС	33693.9	14.87	15.17
Потери тепла в стенки ГВК	7044.4	3.11	3.17
Потери от неплотности КС	787.2	.35	.35
Вынос отработавшими газами	79003.3	34.86	35.58
Полезная работа цикла	95285.9	42.05	42.91
Потери трения в двигателе	6260.0	2.76	2.82

*** ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОГ И ВРЕДНЫЕ ВЫБРОСЫ ***

Чистые продукты сгорания:

Компоненты ОГ	Объем ПС кмоль/кг топл.	Объемная доля %	Массовая доля %
Азот N2	.6581968	73.48515	73.63610
Кислород O2	.0499896	5.58115	6.39156
Вода H2O	.1250000	13.95577	8.99000
ДиоксидС CO2	.0624138	6.96826	10.97262
Водород H2	.0000000	.00000	.00000
Угарн.газ CO	.0000862	.00962	.00964
ДиоксидS SO2	.0000003	.00003	.00008
Всего по ЧПС	.8956867	100.00000	100.00000

В ОГ на выхлопе с учетом продувки (1.404):

Компоненты ОГ	Объем ПС кмоль/кг топл.	Объемная доля %	Массовая доля %
Азот N2	.9239329	74.99081	74.49169
Кислород O2	.1206283	9.79077	11.11498
Вода H2O	.1250000	10.14560	6.47876
ДиоксидС CO2	.0624138	5.06580	7.90756
Водород H2	.0000000	.00000	.00000
Угарн.газ CO	.0000862	.00700	.00695
ДиоксидS SO2	.0000003	.00003	.00006
Всего в ОГ	1.2320620	100.00000	100.00000

Выход токсичных компонентов ОГ на режиме:

Массовый расход ОГ 10566.65 [кг/ч]
 Объемный расход ОГ 9037.23 [м³/ч] (при н.у.)

Компоненты ОГ	Объем м ³ /ч	Масса кг/ч	Уд. выбросы кг/кВт*ч
Вода H2O	.91688E+03	.68459E+03	.28738E+00
ДиоксидС CO2	.45781E+03	.83556E+03	.35076E+00
Угарн.газ CO	.63232E+00	.73441E+00	.30830E-03
ДиоксидS SO2	.22922E-02	.60852E-02	.25545E-05
Углеводороды	.21694E+01	.24937E+01	.10468E-02

Показания газоанализатора (осушенные ОГ):

Кислород	O2	10.90 % об.
Диоксид углерода	CO2	5.64 % об.
Угарный газ	CO	78. ppm
Диоксид серы	SO2	0. ppm
Углеводороды	CНх	267. ppm
Ср. молярная масса	CНх	32. кг/кмоль

END OF DATA

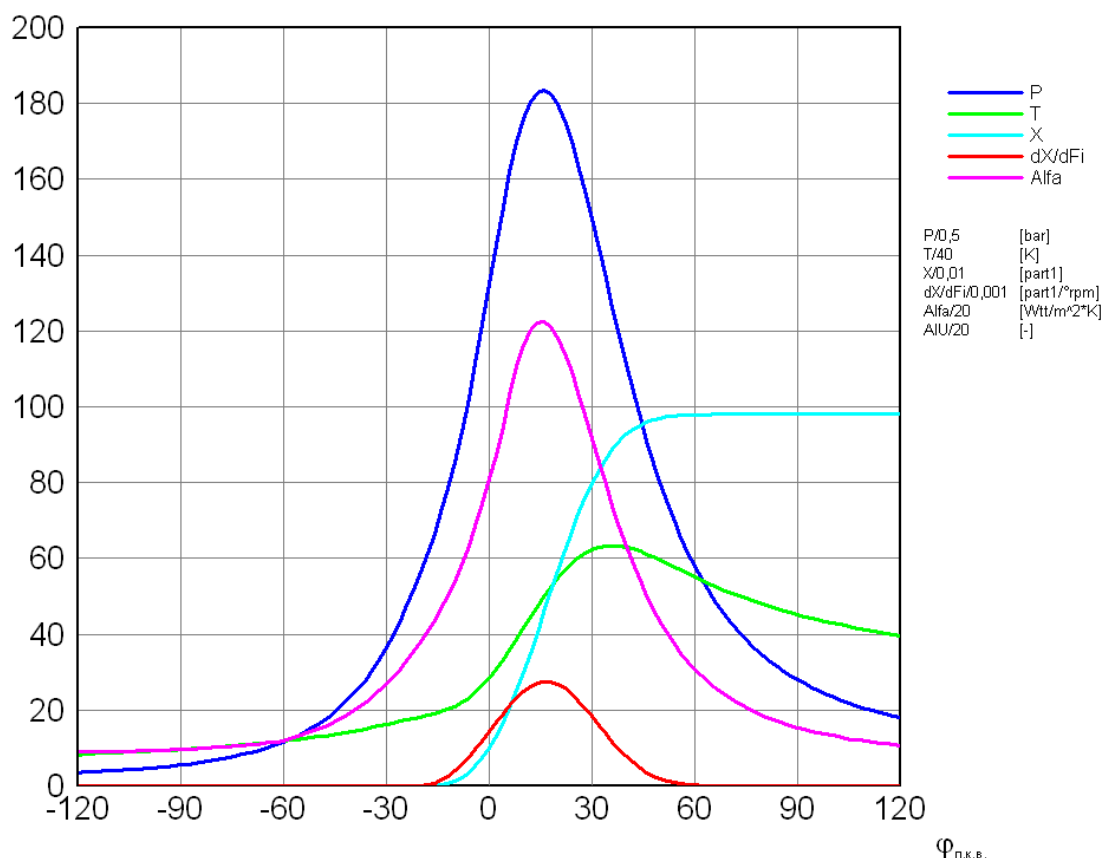


Рис. 3.17. Графики изменения параметров в цилиндре двухтактного малооборотного газового двигателя на тактах сжатия-сгорания-расширения

Анализ результатов расчета показывает, что величина p_z (9,18 МПа) ниже, чем в дизельном варианте двигателя, однако T_z (2535 К) существенно более высока, что несмотря на более низкий среднецикловой коэффициент теплоотдачи в КС будет определять высокий уровень тепловой напряженности двигателя. Несмотря на дефорсирование двигателя, его индикаторный к.п.д. (0,448) достаточно высок, а максимальная скорость нарастания давления в цилиндре составила всего 0,264 МПа/°п.к.в. (процесс сгорания в газовом двигателе в значительной степени «растянут»). Эффективный к.п.д. газового варианта составил 0,420, несколько ниже, чем в дизельном варианте, однако мощность выше порядка на 30 %, поскольку газовый двигатель рассчитан на более низкий коэффициент избытка воздуха – 1,4, поэтому даже при уменьшении общего расхода воздуха через двигатель, расход топлива выше, чем в дизельном варианте.

3.2.8. Среднеоборотный четырехтактный газодизель

В этом примере будем опираться на данные по судовому двигателю MAN 632/40G, посчитав, что двигатель переведен на газодизельный процесс. В качестве основного топлива используем регазифицированный СПГ марки А. Исходные данные к расчету сведены в таблицу 3.10.

Таблица 3.10. Исходные данные к моделированию рабочего процесса среднеоборотного четырехтактного газодизельного двигателя

№ строки	Параметры	Обозначения в соответствии с таблицей 3.1
1	MAN 632/40G Gas-Diesel	TEXT
2	*** Variant 008 ***	VAR
3	2 1 1 4 6 3	MT, NDTV, NPF, KDV, ICIL, KPR
4	0.400 0.320 11.00 0.230 0.00 0.0	S, D, EPS, LAM, EXD, UGOL
5	750 5.00 0.600 0.000 330.000	N, GT, DROS, ETAM, ENMEX
6	42.50 190.0 0.880 0.120 0.000	QT, SMT, C, H, OT
7	0.001 0.000 0.000	ST, ANT, H2OT
8	0.0 51.0 890.0	OCHI, CCHM, ROT
9	48.00 0.750 0.245 0.005	QN_G2, C_G2, H_G2, O_G2
10	16 80.00 313.0 1	SMUGAZ, DG_G2, T_G2, ITZ
11	460.0 560.0 0.00	FH21, FH22, GVBAZ
12	580.0 540.0 1.300 1.000	TPP, TKK, PKP, PKK
13	420.0 390.0 380.0 0.0030 0.000	TGG, TG1, TG2, STZ, CUKCM
14	87.0 1.80 -18.0 0.980	FIZ, M, FHC, XMAX
15	320.0 590.0 145.0 400.0	FOVP, FZVP, FOVIP, FZVIP
16	2.500 2.200 320.0 800.0	PK, PP, TK, TP
17	1	NVR
18	120.0 120.0 90.0 90.0 1 1	FM2, FM1, FIM2, FIM1, KL2, KL1
19	0.000 0.000 0.000 0.0	FEKV, DPZ, PKG, TKG
20	0.210 0.000	DO2, EGR
21	2 0.0 0.0 0.200 0.0	IREZ, CH0, SMUCH, UGAR, SMUMC
22	100.0 100.00	Notn, Motn

Необходимые пояснения к расчету:

1. Двигатель рассчитывается как «газовый», KDV = 4 при любом соотношении топлив газ/дизель при внешнем смесеобразовании (подача топлива на такте наполнения). Чтобы учесть вытеснение входящего в двигатель воздуха газом (порядка 4% при $\alpha = 1,35$) величина дросселя подобрана величину вытеснения и задана равной 0,6.

2. Динамика тепловыделения – по И.И. Вибе, NDTV = 1.

3. Степень сжатия понижена до 11 относительно дизельного варианта.
4. Мощность механических потерь в двигателе соответствует дизельному варианту.

Результаты расчета приведены в протоколе и на графиках рис. 3.18.

***Протокол расчета рабочего цикла
малооборотного двухтактного газового двигателя:***

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ДВС НА БАЗЕ
"РАЗОМКНУТОЙ" СХЕМЫ СИСТЕМЫ РЕСИВЕР - ЦИЛИНДР - КОЛЛЕКТОР

MAN 632/40G Gas-Diesel *** Variant 008 ***

S = 400.0 D = 320.0 [мм]; Epsr = 11.0; Lam = .230; Eх = .000

Epsd = 9.6 Режим:

Pk = 2.50 [бар] Tk = 320.0 [K] N = 750 [1/мин]

Pr = 2.20 [бар] Tr = 800.0 [K] Gt = 85.00 [кг/ч]

Vh 32.170 [дм³] Dros = .600 Cm = 10.00 [м/с]

dTk = 20.92 [K]

Температуры стенок камеры, [K]: Cu/Cm = .000

поршня Tr = 580.0; гильзы Tg = 393.5; крышки Tk = 540.0

Параметры тепловыделения по И.И.Виббе:

Fiz = 87.0 M = 1.80 Fнс = -18.0 Xmax = .980

Продолжительность сгорания Fсг = 90.6 град. пкв

Доля выг. топлива к моменту C = .079

Доля выг. топлива к моменту Z = .757 (32.2 пкв)

Макс. доля выгоревшего топлива = .980

Цикловая подача топлива = .3778E-02 кг/цикл

Фазы газораспределения: выпуск 145.0 - 400.0

впуск 320.0 - 590.0

Максимальные условные площади проходных сечений

органов газораспределения: выпуск 120.00 [см^{**2}]

впуск 72.00 [см^{**2}]

Условное давление конца сжатия Pс 69.8 [бар]

Давление в цилиндре к концу расширения Pв 11.84 [бар]

Усредненный показатель политропы сжатия 1.397

Усредненный показатель политропы расширения 1.323

Степень повышения давления 1.552

Степень предварительного расширения 1.930

Степень последующего расширения 5.699

Коэффициент полноты идеальной диаграммы .947

Средняя температура газов за период выпуска 931.8 [K]

Температура ОГ в выпускном патрубке 846.5 [K]

Эквивалентная условная площадь перетечек .00000 [мм^{**2}]

Массовая доля потери рабочего тела из КС .000 %

Давление картерных газов .000 [бар], темп-ра .0 [K]

Параметры комбинированного топлива (с газом):

Qн = 47.7 [МДж/кг], L0 = 16.88, C = .758, H = .238, O = .005

Расход жидкого топлива 5.00 [кг/ч], газового 80.00 [кг/ч]

Характеристика подачи газа: начало 460.0, окончание 560.0

Доля замены жидкого топлива газом .941

Объемная доля газа в поступающей смеси и .000
 Коэффициент избытка воздуха по газу в ней .000

EGR: .0 % Воздух O2/N2: .210/.790; SMUвоз = 28.960
 LOR: 16.880 Заряд O2/N2: .210/.790; SMUзрд = 28.960

Qн топлива при Alfa=1: 47.68 ; истинная: 47.68 [МДж/кг]
 Qн смеси при Alfa=1: 2666.5 ; истинная: 2001.8 [КДж/кг]

*** ИНДИКАТОРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЦИКЛА ***

Мощность 516.23 [кВт] 701.40 [л.с.]
 Расход топлива 164.65 [г/кВт*ч] 121.19 [г/л.с.*ч]
 Действительный коэффициент избытка воздуха 1.352
 Действительный расход воздуха на цилиндр 2001.03 [кг/ч]
 Инд. КПД .459 Индикаторное давление 25.68 [бар]
 Инд. момент цилиндра 6572.89 [Н*м] 670.02 [кг*м]

Максимальные значения по циклу:

Макс. давление сгорания 108.33 [бар] при Fi= 16.6
 Макс. температура цикла 2159.4 [K] при Fi= 41.6
 Макс. жесткость процесса 2.372 [бар/град] при Fi= -1.2

Среднецикловая температура 868.08 [K]
 Результирующая температура 1126.29 [K]
 Средний коэфф-т теплоотдачи 508.82 [Вт/м^2*K]
 Лучистая составляющая .87 [Вт/м^2*K] (.17 %)

Газовоздушные каналы:

ВЫПУСК: Средний к-т ТО 724.44 [Вт/м^2*K]
 Результирующая температура 828.66 [K]
 ВПУСК: Средний к-т ТО 383.61 [Вт/м^2*K]
 Результирующая температура 315.75 [K]

Коэффициент остаточных газов .017 Заброс .00 %
 Коэффициент наполнения .895
 Коэффициент продувки 1.032
 Мощность насосных ходов 11.230 [кВт] (15.26 [л.с.])

*** ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ ***

Количество цилиндров 6 Мех. КПД .893
 Мощность цилиндровая 461.23 [кВт] 626.68 [л.с.]
 Мощность двигателя 2767.40 [кВт] 3760.05 [л.с.]
 Мощность мех. потерь 330.00 [кВт] 448.37 [л.с.]
 Удельный расход топлива 184.29 [г/кВт*ч] 135.64 [г/л.с.*ч]
 Суммарный коэффициент избытка воздуха 1.395
 Расход воздуха 12006.21 [кг/ч] 10268.43 [м^3/ч]
 Расход топлива 510.00 [кг/ч] 573.03 [л/ч]
 Из него: жидкое 30.00 [кг/ч], газ 480.00 [кг/ч]
 Эфф. КПД .410 Эффективное давление 22.94 [бар]
 Крутящий момент 35235.63 [Н*м] 3591.81 [кг*м]

*** ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС РАБОЧЕГО ЦИКЛА ***

Параметр	величина, Дж	% от Qr	% от Qп
Располагаемая энергия Qr	180111.1	100.00	-
Потери энергии при Alfa<1	.0	.00	-
Потери от недогорания	3602.2	2.00	-
Подведенная энергия Qп	176508.9	98.00	100.00
Механическая работа	82597.3	45.86	46.79

Потери тепла в стенки КС	15171.0	8.42	8.60
Потери тепла в стенки ГVK	5806.3	3.22	3.29
Потери от неплотности КС	.0	.00	.00
Вынос отработавшими газами	72934.3	40.49	41.32
Полезная работа цикла	73797.3	40.97	41.81
Потери трения в двигателе	8800.0	4.89	4.99

*** ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОГ И ВРЕДНЫЕ ВЫБРОСЫ ***

Чистые продукты сгорания:

Компоненты ОГ	Объем ПС кмоль/кг топл.	Объемная доля %	Массовая доля %
Азот N2	.6224082	73.44762	73.47939
Кислород O2	.0430484	5.07995	5.80816
Вода H2O	.1188235	14.02184	9.01794
ДиоксидС CO2	.0628609	7.41793	11.66179
Водород H2	.0000000	.00000	.00000
Угарн.газ CO	.0002764	.03261	.03263
ДиоксидS SO2	.0000003	.00004	.00008
Всего по ЧПС	.8474177	99.99999	100.00000

В ОГ на выхлопе с учетом продувки (1.032):

Компоненты ОГ	Объем ПС кмоль/кг топл.	Объемная доля %	Массовая доля %
Азот N2	.6421257	73.60649	73.57423
Кислород O2	.0482897	5.53542	6.32342
Вода H2O	.1188235	13.62067	8.75231
ДиоксидС CO2	.0628609	7.20571	11.31829
Водород H2	.0000000	.00000	.00000
Угарн.газ CO	.0002764	.03168	.03167
ДиоксидS SO2	.0000003	.00004	.00008
Всего в ОГ	.8723764	100.00000	100.00000

Выход токсичных компонентов ОГ на режиме:

Массовый расход ОГ 12516.21 [кг/ч]
 Объемный расход ОГ 10704.61 [м³/ч] (при н.у.)

Компоненты ОГ	Объем м ³ /ч	Масса кг/ч	Уд. выбросы кг/кВт*ч
Вода H2O	.14580E+04	.10955E+04	.39584E+00
ДиоксидС CO2	.77134E+03	.14166E+04	.51190E+00
Угарн.газ CO	.33913E+01	.39635E+01	.14322E-02
ДиоксидS SO2	.38346E-02	.10244E-01	.37015E-05
Углеводороды	.12894E+01	.13420E+01	.48494E-03

Показания газоанализатора (осушенные ОГ):

Кислород	O2	6.41 % об.
Диоксид углерода	CO2	8.34 % об.
Угарный газ	CO	367. ppm
Диоксид серы	SO2	0. ppm
Углеводороды	CNx	139. ppm
Ср. молярная масса	CNx	29. кг/кмоль

END OF DATA

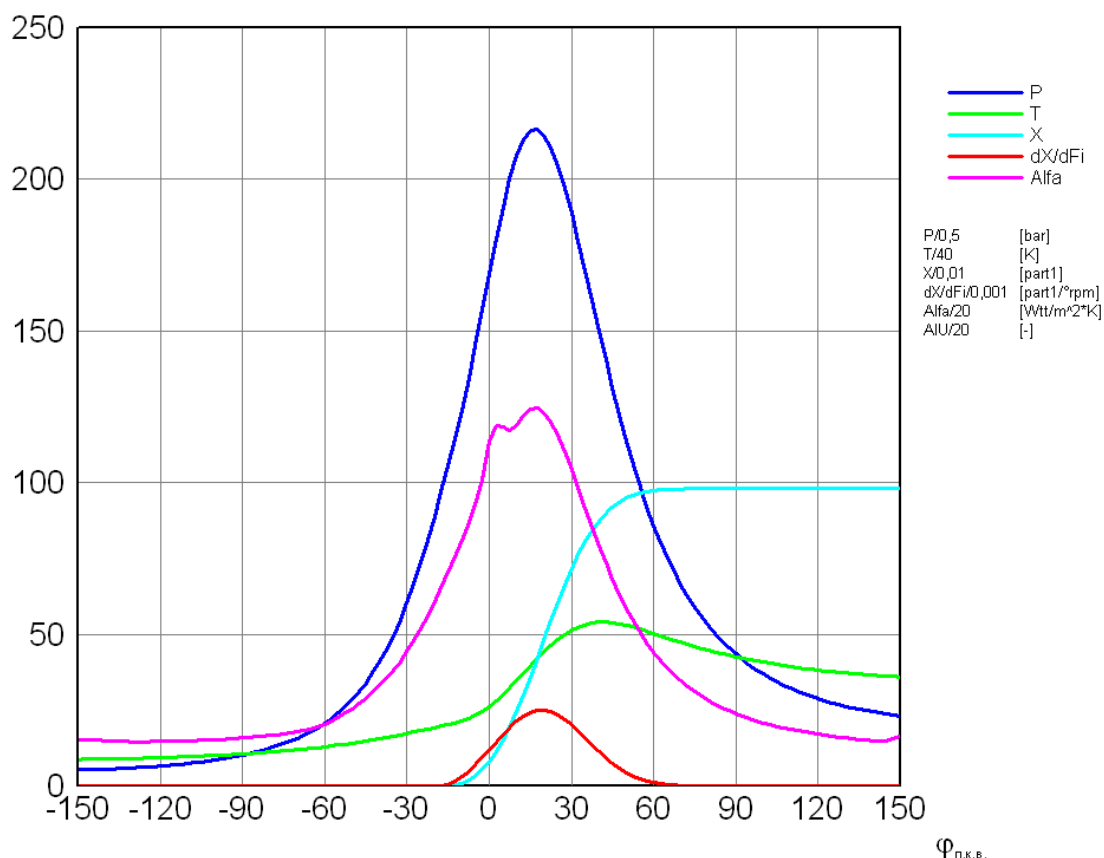


Рис. 3.18. Графики изменения параметров в цилиндре четырехтактного среднеоборотного газодизельного двигателя на тактах сжатия-сгорания-расширения

Анализ результатов расчета показывает, что величины p_z (10,83 МПа) и T_z (2160 К) находятся в допустимых пределах, однако уровень тепловой напряженности двигателя будет весьма высоким. Индикаторный к.п.д. двигателя (0,459) достаточно высок при максимальной скорости нарастания давления в цилиндре 0,237 МПа/°п.к.в. Эффективный к.п.д. газодизеля составил 0,410 при удельном расходе комбинированного топлива 0,184 кг/кВт·ч. Коэффициент избытка воздуха – 1,35 обеспечивается за счет высокого коэффициента наполнения (0,895) и глубокого охлаждения наддувочного воздуха (320 К).

3.2.9. Высокофорсированный дизель с циклом Миллера

Рабочие циклы Миллера и Аткинсона представляют собой процессы с «продолженным» расширением, однако реализация их различна. Первый характерен ранним окончанием такта впуска (раньше НМТ), тем самым, перед началом сжатия рабочее тело в цилиндре первоначально расширяется. Второй характеризуется наоборот, более поздним окончанием впуска (значительно позже НМТ), часть свежего заряда при этом уходит обратно во впускной ресивер. Общим для обоих циклов является то, что наполнение цилиндра оказывается меньшим, нежели чем в классических циклах Дизеля или Отто. Это, в свою очередь, обеспечивает возможность более глубокого расширения рабочего тела на рабочем ходе и повышению индикаторного к.п.д., а также снижение среднецикловых температур и частичное решение экологических проблем ОГ.

Применение подобных циклов находят в современных высокофорсированных двигателях с возможностью изменения фаз газораспределения для реализации мощностных режимов. Для компенсации потерь в наполнении при переходе на циклы Миллера или Аткинсона используют высокий наддув. Его применению способствует также то, что оба рассматриваемых цикла эквиваленты снижению действительной степени сжатия рабочего тела, что достаточно часто позиционируется фирмами-производителями двигателей как «изменение степени сжатия». Создание перспективных высокофорсированных, малотоксичных бензиновых и дизельных двигателей западные компании не видят без применения указанных циклов.

Исходные данные к расчету высокофорсированного двигателя с циклом Дизеля-Миллера сведены в таблицу 3.11.

Расчет выполняется на примере двигателя размерностью 12/12 с открытой КС. Большинство исходных данных принимаются в соответствии с таблицей 3.5. Основные отличия в исходных данных составляют:

1. Вводится высокий наддув двигателя (0,65 МПа).
2. Расход топлива увеличен с целью сохранения коэффициента избытка воздуха, как в базовом расчете.
3. Окончание впуска свежего заряда в цилиндр производится за 40 °п.к.в. до ВМТ (появляется «пятый такт» – расширение свежего заряда).
4. Геометрическая степень сжатия понижена до 11.

5. Температуры стенок КС увеличены для учета возросшего уровня теплонапряженности двигателя.

6. Для описания тепловыделения используется методика Б.П. Пугачева для открытых КС (NDTV = 4).

Таблица 3.11. Исходные данные к моделированию рабочего процесса высокофорсированного дизеля с циклом Миллера

№ строки	Параметры	Обозначения в соответствии с таблицей 3.1
1	4T Diesel-Miller	TEXT
2	*** Variant 009 ***	VAR
3	2 4 1 1 8 3	MT, NDTV, NPF, KDV, ICIL, KPR
4	0.120 0.120 11.00 0.267 0.00 0.0	S, D, EPS, LAM, EXD, UGOL
5	2200 14.00 1.000 0.000 50.000	N, GT, DROS, ETAM, ENMEX
6	42.50 190.0 0.870 0.126 0.004	QT, SMT, C, H, OT
7	0.200 0.015 0.005	ST, ANT, H2OT
8	0.0 50.0 820.0	OCHI, CCHM, ROT
9	620.0 600.0 1.350 1.000	TPP, TKK, PKP, PKK
10	450.0 420.0 400.0 0.0030 0.000	TGG, TG1, TG2, STZ, CUKCM
11	-15.0 30.0 0.08 0.80 0.0	FHC, FVG, DIKAM, ZX1, ZFI2
12	320.0 500.0 120.0 400.0	FOVP, FZVP, FOVIP, FZVIP
13	6.500 5.800 360.0 900.0	PK, PP, TK, TP
14	1	NVR
15	18.0 16.0 80.0 100.0 2 2	FM2, FM1, FIM2, FIM1, KL2, KL1
16	0.200 0.500 1.050 370.0	FEKV, DPZ, PKG, TKG
17	0.210 0.000	DO2, EGR
18	2 0.0 0.0 0.500 0.0	IREZ, CH0, SMUCH, UGAR, SMUMC
19	100.00 100.00	Notn, Motn

Результаты расчета приведены в протоколе и на графиках, рис. 3.19 и 3.20.

Протокол расчета рабочего цикла высокофорсированного, быстрходного четырехтактного дизеля с циклом Миллера:

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ДВС НА БАЗЕ "РАЗОМКНУТОЙ" СХЕМЫ СИСТЕМЫ РЕСИВЕР - ЦИЛИНДР - КОЛЛЕКТОР

4T Diesel-Miller

*** Variant 009 ***

S = 120.0 D = 120.0 [мм]; Epsr = 11.0; Lam = .267; Ex = .000

Epsd = 10.1 Режим:

Pk = 6.50 [бар] Tk = 360.0 [K] N = 2200 [1/мин]

Pr = 5.80 [бар] Tr = 900.0 [K] Gt = 14.00 [кг/ч]

Vh 1.357 [дм³] Dros = 1.000 Cm = 8.80 [м/с]

dTk = 20.36 [K]

Температуры стенок камеры, [K]: Cu/Cm = .000
поршня Tr = 620.0; гильзы Tg = 422.4; крышки Tk = 600.0

Параметры тепловыделения по В.П.Пугачеву:

Fнвпр = -15.0 Fвпр = 30.0 ДИКАМ = .080 [м]
X1 = .201 X2 = .787 FI1 = 4.53 FI2 = 18.8
K1 = 2.00 K2 = 1.80 угол начала сгорания Fнс = -3.80
Угол задержки самовоспламенения = 11.20 (.849 мс)
Продолжительность сгорания Fсг = 87.0 град. пкв
Доля выг. топлива к моменту C = .079
Доля выг. топлива к моменту Z = .660 (23.6 пкв)
Макс. доля выгоревшего топлива = .987
Цикловая подача топлива = .2121E-03 кг/цикл

Фазы газораспределения: выпуск 120.0 - 400.0
впуск 320.0 - 500.0

Максимальные условные площади проходных сечений

органов газораспределения: выпуск 16.00 [см**2]
впуск 18.00 [см**2]

Условное давление конца сжатия Pc 125.5 [бар]
Давление в цилиндре к концу расширения Pb 18.57 [бар]
Усредненный показатель политропы сжатия 1.404
Усредненный показатель политропы расширения 1.299
Степень повышения давления 1.489
Степень предварительного расширения 1.521
Степень последующего расширения 7.231
Коэффициент полноты идеальной диаграммы .958
Средняя температура газов за период выпуска 797.7 [K]
Температура ОГ в выпускном патрубке 860.5 [K]

Эквивалентная условная площадь перетечек .25102 [мм**2]
Массовая доля потери рабочего тела из КС .500 %
Давление картерных газов 1.050 [бар], темп-ра 370.0 [K]

Элементарный состав топлива С/Н/О (доли от 1): .870/.126/.004
Примеси к топливу Сера/Азот/Вода, % : .200/.015/ .00
Стехиометрическое соотношение L0: 14.302 [кг возд./кг топл.]
Октановое число ОЧИ: 20.0; Цетановое число ЦЧ: 50.0
Плотность топлива: 820.0; Воздуха на впуске: 6.291 [кг/м^3]
EGR: .0 % Воздух O2/N2: .210/.790; SMUвоз = 28.960
L0R: 14.302 Заряд O2/N2: .210/.790; SMUзрд = 28.960

Qн топлива при Alfa=1: 42.50 ; истинная: 42.50 [МДж/кг]
Qн смеси при Alfa=1: 2777.4 ; истинная: 1320.1 [КДж/кг]

*** ИНДИКАТОРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЦИКЛА ***

Мощность 78.52 [кВт] 106.68 [л.с.]
Расход топлива 178.30 [г/кВт*ч] 131.23 [г/л.с.*ч]
Действительный коэффициент избытка воздуха 2.181
Действительный расход воздуха на цилиндр 473.65 [кг/ч]
Инд. КПД .475 Индикаторное давление 31.56 [бар]
Инд. момент цилиндра 340.81 [Н*м] 34.74 [кг*м]

Максимальные значения по циклу:
 Макс. давление сгорания 186.94 [бар] при $F_i = 9.6$
 Макс. температура цикла 1692.1 [K] при $F_i = 34.2$
 Макс. жесткость процесса 8.909 [бар/град] при $F_i = .6$

Среднецикловая температура 740.59 [K]
 Результирующая температура 999.61 [K]
 Средний коэфф-т теплоотдачи 1008.30 [Вт/м²*K]
 Лучистая составляющая 136.82 [Вт/м²*K] (13.57 %)

Газовоздушные каналы:
 ВЫПУСК: Средний к-т ТО 2779.72 [Вт/м²*K]
 Результирующая температура 897.14 [K]
 ВПУСК: Средний к-т ТО 1161.04 [Вт/м²*K]
 Результирующая температура 359.33 [K]

Коэффициент остаточных газов .010 Заброс .00 %
 Коэффициент наполнения .705
 Коэффициент продувки 1.084
 Мощность насосных ходов 7.967 [кВт] (10.82 [л.с.])

*** ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ ***

Количество цилиндров 8 Мех. КПД .920
 Мощность цилиндровая 72.27 [кВт] 98.19 [л.с.]
 Мощность двигателя 578.14 [кВт] 785.52 [л.с.]
 Мощность мех. потерь 50.00 [кВт] 67.93 [л.с.]
 Удельный расход топлива 193.72 [г/кВт*ч] 142.58 [г/л.с.*ч]
 Суммарный коэффициент избытка воздуха 2.366
 Расход воздуха 3789.23 [кг/ч] 3240.77 [м³/ч]
 Расход топлива 112.00 [кг/ч] 136.59 [л/ч]
 Из него: жидкое 112.00 [кг/ч], газ .00 [кг/ч]
 Эфф. КПД .437 Эффективное давление 29.05 [бар]
 Крутящий момент 2509.49 [Н*м] 255.81 [кг*м]

*** ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС РАБОЧЕГО ЦИКЛА ***

Параметр	величина, Дж	% от Q_r	% от Q_p
Располагаемая энергия Q_r	9015.2	100.00	-
Потери энергии при $\alpha < 1$.0	.00	-
Потери от недогорания	113.5	1.26	-
Подведенная энергия Q_p	8901.7	98.74	100.00
Механическая работа	4282.8	47.51	48.11
Потери тепла в стенки КС	873.5	9.69	9.81
Потери тепла в стенки ГВК	2288.5	25.39	25.71
Потери от неплотности КС	41.7	.46	.47
Вынос отработавшими газами	1415.1	15.70	15.90
Полезная работа цикла	3941.9	43.73	44.28
Потери трения в двигателе	340.9	3.78	3.83

*** ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОГ И ВРЕДНЫЕ ВЫБРОСЫ ***

Чистые продукты сгорания:

Компоненты ОГ	Объем ПС кмоль/кг топл.	Объемная доля %	Массовая доля %
Азот N2	.8509531	76.73096	74.28587
Кислород O2	.1224934	11.04530	12.22095
Вода H2O	.0630000	5.68075	3.53554
ДиоксидС CO2	.0724902	6.53649	9.94431
Водород H2	.0000000	.00000	.00000
Угарн.газ CO	.0000098	.00088	.00086
ДиоксидS SO2	.0000625	.00564	.01247
Всего по ЧПС	1.1090090	100.00000	100.00000

В ОГ на выхлопе с учетом продувки (1.084):

Компоненты ОГ	Объем ПС кмоль/кг топл.	Объемная доля %	Массовая доля %
Азот N2	.9226346	76.90257	74.46790
Кислород O2	.1415479	11.79817	13.05674
Вода H2O	.0630000	5.25112	3.26885
ДиоксидС CO2	.0724902	6.04213	9.19419
Водород H2	.0000000	.00000	.00000
Угарн.газ CO	.0000098	.00082	.00079
ДиоксидS SO2	.0000625	.00521	.01153
Всего в ОГ	1.1997450	100.00000	100.00000

Выход токсичных компонентов ОГ на режиме:

Массовый расход ОГ 3901.23 [кг/ч]
 Объемный расход ОГ 3336.56 [м³/ч] (при н.у.)

Компоненты ОГ	Объем м ³ /ч	Масса кг/ч	Уд. выбросы кг/кВт*ч
Вода H2O	.17521E+03	.12753E+03	.22058E+00
ДиоксидС CO2	.20160E+03	.35869E+03	.62041E+00
Угарн.газ CO	.27244E-01	.30846E-01	.53353E-04
ДиоксидS SO2	.17382E+00	.44982E+00	.77805E-03
Углеводороды	.36107E-01	.10079E+00	.17433E-03

Показания газоанализатора (осушенные ОГ):

Кислород O2	12.45 % об.
Диоксид углерода CO2	6.38 % об.
Угарный газ CO	9. ppm
Диоксид серы SO2	55. ppm
Углеводороды CHx	11. ppm
Ср. молярная масса CHx	81. кг/кмоль

END OF DATA

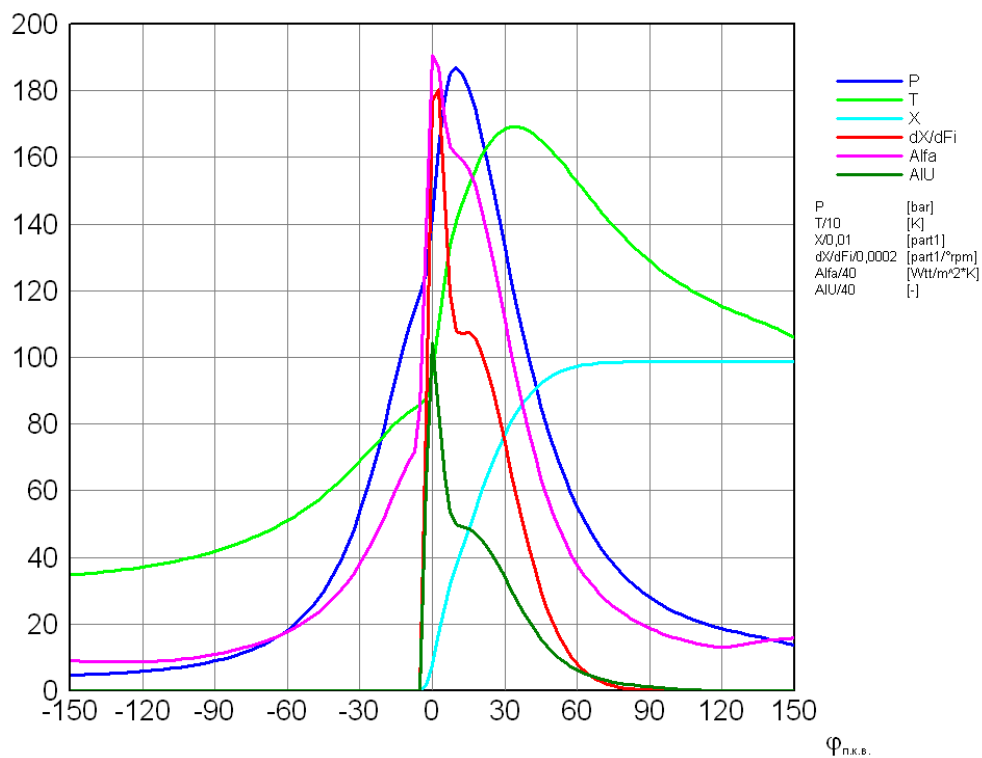


Рис. 3.19. Графики изменения параметров в цилиндре высокофорсированного дизеля с циклом Миллера на тактах сжатия-сгорания-расширения

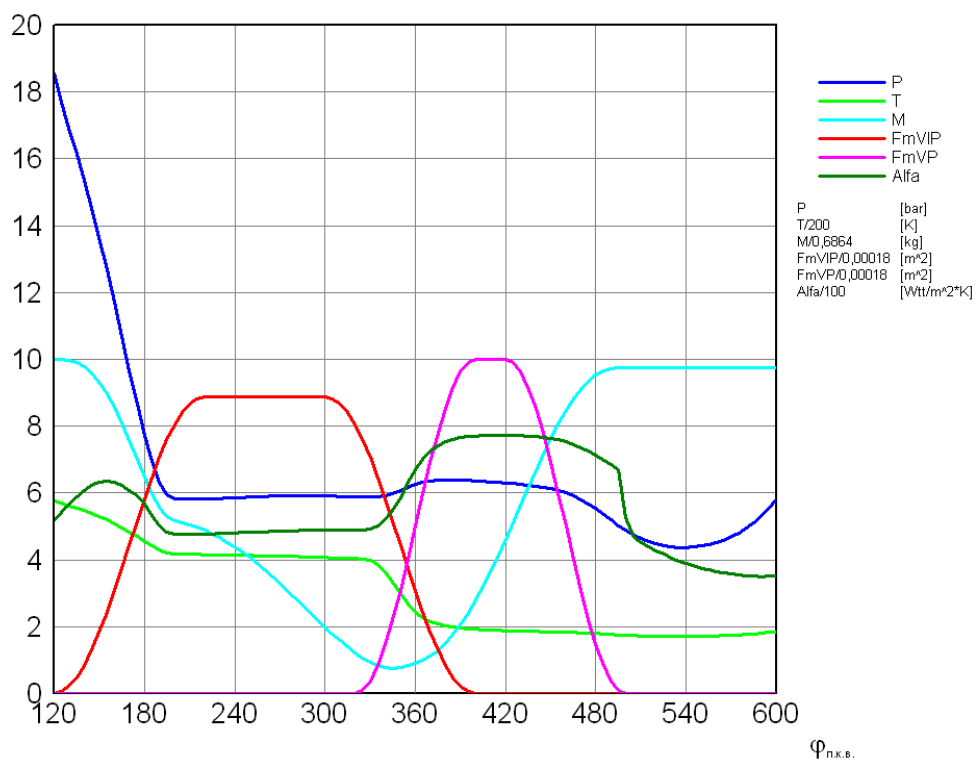


Рис. 3.20. Графики изменения параметров в цилиндре высокофорсированного дизеля с циклом Миллера на тактах газообмена

Анализ результатов расчета показывает следующее. Даже при увеличенном коэффициенте избытка воздуха (2,181 против 1,823) удается достичь гораздо большей мощности двигателя (более чем в два раза) при существенном снижении удельного расхода топлива. Максимальная температура в цикле T_z составила 1692 К, что вполне допустимо, максимальная скорость нарастания давления составила 0,891 МПа/°п.к.в., что выше, чем у двигателя-прототипа. Величина p_z составила 18,69 МПа, что потребует существенной переработки и усиления конструкции двигателя. Среднецикловая (741 К) и результирующая (1000 К) температуры в расчете получены относительно невысокими, чему способствует предварительное расширение и охлаждение свежего заряда в цилиндре перед сжатием (см. рис. 3.20). Индикаторный к.п.д. (0,475) достаточный, но не очень высокий, однако в настоящий момент им часто жертвуют в угоду экологическим показателям двигателя. Дальнейшая перспектива в форсировании рабочих процессов дизелей находится в зоне $p_z = 25 \dots 30$ МПа при значениях $p_k = 7 \dots 8$ МПа и выше для обеспечения значений среднего эффективного давления в цилиндрах в диапазоне $p_e = 2,5 \dots 3,0$ МПа.

В заключение к главе 3 следует отметить, что версия программы расчета рабочего процесса ДВС 2018 г. отличается от предыдущих версий в основном введением в программу блоков, предназначенных для более корректного расчета процессов в двигателях, использующих газовое топливо (четырёхтактных) и возможностью расчета токсичности ОГ по таким параметрам, как угарный газ CO, оксид серы SO₂, несгоревшие углеводороды CН_x, двуокись углерода CO₂ (методики расчета и анализ результатов – в следующей главе). Для большего удобства расчета процессов газообмена, в частности двухтактных двигателей, введен новый «комбинированный геометрический» способ расчета проходных сечений органов газораспределения. Уточненный список исходных данных приведен в документе «Описание применения» ПМК RP-TOX-2018 RU.02068574.02018-02 31 (см. Приложение). Примеры расчета бензиновых, судовых дизельных и газопоршневых двигателей находятся в электронном приложении, см. ссылку в аннотации «Описания применения».

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТОКСИЧНОСТИ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

4.1. Отрабатываемые газы ДВС и вредные выбросы

Отрабатываемые газы (ОГ) – основной источник токсичных веществ ДВС [18], представляют собой «гетерогенную смесь различных газообразных веществ с разнообразными химическими и физическими свойствами, состоящая из продуктов полного и неполного сгорания топлива, избыточного воздуха, аэрозолей и различных микропримесей (как газообразных, так и в виде жидких и твердых частиц), поступающих из цилиндров двигателя в его выпускную систему». В своем составе ОГ содержат около 300 известных веществ, большинство из которых токсичны.

При сжигании углеводородных топлив в ДВС наряду с безвредными компонентами ОГ – кислородом, азотом и водяным паром (их доля составляет 95,0...99,9% объема ОГ) в атмосферу выбрасываются также экологически вредные компоненты. Их доля обычно составляет 0,1...5,0% по объему, но может быть и более указанных величин.

Вредными выбросами (ВВ) в атмосферу считаются «выбросы, включающие органические, неорганические, радиоактивные и другие виды соединений, различные газы, пары, частицы твердых и жидких веществ в количестве, превышающем медико-санитарные нормы содержания вредных веществ в атмосферном воздухе, отрицательно влияющие на живые организмы, ухудшающие жизненные условия и наносящие материальный ущерб» [17].

Основными нормируемыми токсичными компонентами ОГ ДВС являются оксиды углерода, азота и несгоревшие углеводороды. Кроме того, с ОГ в атмосферу поступают альдегиды, канцерогенные вещества, сажа и другие вещества. Рассмотрим основные вредные компоненты ОГ.

Монооксид углерода CO , углеводороды CH и твердые (сажистые) частицы являются продуктами неполного сгорания топлива.

В камерах сгорания ДВС монооксид углерода CO (он же угарный газ) образуется либо при существенном недостатке кислорода (в бензиновых и газовых двигателях). Либо при плохом качестве распыливания топ-

лива (в дизелях). Частично CO образуется в результате высокотемпературной диссоциации диоксида углерода CO_2 . На этапах догорания-расширения при наличии кислорода угарный газ доокисляется до CO_2 . Тем не менее, угарный газ содержится, в том числе, и в ОГ дизелей, даже при большом избытке воздуха.

Углеводороды CH и CHO (метан, этан, ацетилен, бензол, альдегиды, ПАУ – полиароматические углеводороды и пр., всего их более 200) весьма токсичны. Выделение CH вызывается неполным сгоранием вблизи холодных стенок (где цепные реакции окисления топлива обрываются). Также CH образуются при сильном недостатке воздуха (в бензиновых и газовых двигателях), недостаточной степени распыливания топлива (в дизелях), при неудовлетворительном завихрении воздушного заряда и низких температурах (например, на режимах близких к холостому ходу).

Альдегиды (формальдегид, акролеин – R_xCHO) образуются, если сгорание топлива происходит при низких температурах или при сгорании очень обедненных смесей. Образованию альдегидов способствует окисление пленки масла на поверхности гильзы цилиндра или подтекание топлива из распылителя форсунки при неисправности топливной аппаратуры.

В состав твердых частиц (ТЧ) кроме сажи (представляющей собой углерод до 90%) входят зола и механические примеси, источником которых может служить топливо и масло, содержащее продукты износа.

Образование сажи представляет собой процесс термического разложения (пиролиза) углеводородов в газовой (паровой) фазе в условиях сильного недостатка кислорода. Начало образования сажи зависит от многих факторов: температуры и давления в камере сгорания, вида топлива, состава топливовоздушной смеси, конструктивных особенностей двигателя и др. Количество образовавшейся сажи в значительной степени зависит от температуры в зоне горения. С ростом температуры и давления это количество резко увеличивается.

На образование сажи оказывают влияние также и свойства топлива. Чем выше отношение углерод/водород (C/H) в топливе, тем больше выделяется сажи; чем выше молекулярный вес предельных и непредельных углеводородов с прямыми цепями, тем выше скорость образования сажи. По склонности к образованию сажи различные углеводороды можно располо-

жить следующим образом: нормальные парафины, изопарафины, циклопарафины, олефины, циклоолефины, диолефины, ароматики.

При сгорании топлива происходит не только процесс образования сажи, но и ее выгорание. Выгорание происходит за счет реакции углерода с радикалами OH или кислородом. Если двигатель работает на бедных смесях, то происходит прямое окисление сажи кислородом. Скорость выгорания сажи зависит от размеров частиц. Вся образовавшаяся сажа может выгореть в том случае, если размеры частиц не будут превышать 0,01 мкм [18]. Значительная часть образовавшейся сажи обычно выгорает в процессе расширения газов в цилиндре, когда идут процессы перемешивания продуктов сгорания с остаточным кислородом.

Сажистые ТЧ сами по себе малотоксичны, хотя и оказывают на организм человека отрицательное воздействие, задерживаясь в легких. Основная опасность ТЧ заключается в том, что они, имея очень высокую площадь поверхности и пористую структуру, адсорбируют на себе канцерогенные вещества – полиароматические углеводороды.

Оксиды азота (NO , NO_2 , N_2O , N_2O_3 , N_2O_5) – являются одними из наиболее токсичных компонентов ОГ. Монооксид азота NO (более 90%) и диоксид азота NO_2 (около 5%) – составляют большую часть всех оксидов азота, которые принято обозначать NO_x .

Оксиды азота раздражающе воздействуют на слизистые оболочки, разрушают легкие человека, так как при соединении с влагой в верхних дыхательных путях, образуют азотную и азотистую кислоты. Закись азота N_2O (он же «веселящий газ») обладает наркотическим действием. Считается, что для организма человека оксиды азота 10-40 раз токсичнее CO .

Превалирующее влияние на выбросы оксидов азота, образующихся из азота воздуха, оказывает температура в камере сгорания. При температурах от 2500 до 2700 К скорость реакций образования NO_x увеличивается в 2,6 раза, а при уменьшении от 2500 до 2300 К – уменьшается в 8 раз [18], в любом случае, чем выше максимальные и средние температуры в цикле, тем выше концентрация NO_x на выходе из двигателя. На выбросы NO_x влияет также состав смеси, чем она беднее, тем выше концентрация оксидов азота. Определенную «добавку» (до 10...30 %) дают топливные оксиды азота, что актуально для тяжелых видов топлив.

Оксиды серы (SO_x – смесь SO_2 и SO_3 , соотношение около 15:1), их содержание в ОГ определяется содержанием серы в топливе. Практически вся сера, находящаяся в топливе в связанном виде (в активной форме наличие серы не допускается даже в мазутах) [2], при сгорании окисляется.

Серный и сернистый ангидриды вызывают сильные раздражения слизистой оболочки носоглотки, глаз и органов дыхания, поскольку оксиды серы, как и оксиды азота, растворяясь в воде, образуют серную H_2SO_4 и сернистую кислоты H_2SO_3 . Они губительно действуют как на человека, так и на животных и растения.

Примерный состав ОГ представлен в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Состав отработавших газов ДВС (по данным [18])

Компоненты ОГ	Формула	Объемное содержание, %	
		Бензиновые двигатели	Дизели
Азот	N_2	74,0 – 77,0	76,0 – 78,0
Кислород	O_2	0,2 – 8,0	2,0 – 18,0
Водяной пар	H_2O	3,0 – 5,5	0,5 – 4,0
Диоксид углерода	CO_2	5,0 – 12,0	1,0 – 10,0
Монооксид углерода	CO	0,1 – 10,0	0,01 – 5,00
Углеводороды	CH	0,2 – 3,0	0,01 – 0,50
Альдегиды	R_xCHO	0,0 – 0,2	0,001 – 0,009
Диоксид серы	SO_2	0,000 – 0,002	0,00 – 0,03
Сажа, г/м ³	C	0,00 – 0,04	0,01 – 1,10
Бенз(а)пирен, мг/м ³	$C_{20}H_{12}$	0,01 – 0,02	до 0,01

Помимо токсичных компонентов в ОГ присутствуют нейтральные кислород и азот, а также углекислый газ CO_2 и водяной пар. Последние, несмотря на то, что для человека в целом не вредны, оказывают существенное влияние на окружающую среду.

Диоксид углерода (CO_2 – углекислый газ) входит в состав атмосферы (около 0,03% по объему), санитарными нормами не нормируется. Однако повышенная концентрация CO_2 создает атмосфере Земли «парнико-

вый эффект». Это явление заключается в нагреве внутренних слоев атмосферы Земли за счет поглощения теплового излучения Солнца. Тепловое излучение поглощается молекулами многоатомных газов (CO_2 , SO_2 , H_2O и др.), причем по многим оценкам на долю углекислого газа приходится до двух третей от всего негативного воздействия парниковых газов.

Поглощение лучистой энергии газами происходит в строго определенных длинах волн спектра излучения Солнца. Для диоксида углерода полосами поглощения являются волны длиной 2,4...3,0, 4,0...4,8 и 12,5...16,5 мкм, приходящиеся на тепловое излучение (длина волны 0,6...50,0 мкм). Тепловое излучение, помимо CO_2 , поглощают пары воды, метан, озон, а также другие вещества, в частности техногенного происхождения, такие как хлорфторуглероды, гексафторид серы, фреоны.

С точки зрения минимизации выбросов CO_2 в атмосферу выгоден перевод двигателей внутреннего сгорания на работу на природном газе. Для жидких топлив соотношение углерода и водорода в топливе $C:H$ в среднем составляет 0,87 к 0,13, в то время как для природного газа метана это соотношение составляет 0,75 к 0,25. Таким образом, состав конечных продуктов сгорания ДВС будет смещаться в сторону уменьшения содержания CO_2 и увеличения содержания H_2O , т.е. воды, которая в атмосфере в отличие от CO_2 не накапливается.

Объемные концентрации всех газообразных компонентов ОГ определяются результате газового анализа (за исключением паров воды, от которых ОГ обычно «осушают» для предотвращения их конденсации в измерительных элементах газоанализатора). Объемную концентрацию компонентов принято измерять в % если их доля составляет более 1%. При меньших концентрациях (характерных для ВВ) их принято измерять в *ppm* или *чм* (*parts per million* – частей на миллион). Соотношения между единицами измерения следующие: 1% об. = 10^4 *ppm*, или 1 *ppm* = 10^{-4} % об. Величины объемных концентраций отдельных компонентов ОГ C_i , выраженных в % или *ppm*, принято называть *составом газообразных выбросов*.

Концентрация твердых частиц измеряется в граммах или миллиграммах на кубический метр газов при нормальных условиях ($мг/Нм^3$). Концентрация газообразных компонентов ОГ также может быть выражена в $мг/Нм^3$, для пересчета используется формула:

$$C_{i, \text{мг}} = \frac{C_{i, \text{ppm}} \mu_i}{22,4}, \quad (4.1)$$

где: $C_{i, \text{мг}}$ – объемная концентрация i -го компонента ОГ в мг/Нм³;

$C_{i, \text{ppm}}$ – объемная концентрация i -го компонента ОГ в ppm;

μ_i – молекулярная масса i -го компонента ОГ.

Объемная концентрация ВВ в ОГ ДВС не отражает в полной мере величину выбросов, для этого используют другие характеристики: *скорость выделения выбросов (или массовый часовой выброс) E* , кг/ч и *удельный выброс e_i* , г/(кВт·ч). Эти характеристики связаны между собой соотношением

$$e_i = \frac{E_i}{N_e}, \quad (4.2)$$

где N_e – эффективная мощность двигателя, кВт.

Для определения скорости выделения выбросов используют значения расходов воздуха и топлива на двигатель, кг/ч.

Наиболее объективным показателем для количественной оценки выброса вредных компонентов с ОГ ДВС является удельный выброс, поэтому этот параметр принят как нормативный в международных и национальных стандартах по ограничению выбросов [32-37].

Пассажирские и грузовые суда (а также железнодорожный и автотранспорт) являются одними из основных загрязнителей водо-воздушной среды, поэтому к ним предъявляют повышенные требования по экологии эксплуатации, которые изложены в «Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., измененной Протоколом 1978 г. к ней», или сокращенно МАРПОЛ 73/78.

Конвенция содержит шесть приложений, регламентирующих требования к судам по предотвращению загрязнения окружающей среды, в том числе приложение VI — «Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов» [37]. Правила учитывают, что источниками загрязнения атмосферы с судов являются выбросы из энергетических силовых установок оксидов углерода, серы и азота, озоноразрушающих веществ. Правила предусматривают, что все дизели мощностью более 130 кВт должны контролироваться на содержание NO_x в выпускных газах и по результатам контроля сопровождаться документами международного образца [38].

Для отечественных судов водного транспорта (также железнодорожных тепловозов и промышленных дизелей) выбросы загрязняющих веществ регламентированы ГОСТ Р 51249-99 «Дизели судовые, тепловозные и промышленные. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения» [33], где определены предельно допустимые значения нормируемых параметров вредных веществ, приведенные в таблице 4.2 для новых двигателей.

Таблица 4.2. Значения выбросов вредных веществ для новых двигателей судовых, промышленных и тепловозных

Наименование нормируемого параметра	Назначение двигателя	Норма удельных средневзвешенных выбросов	
		Выпуск до 2000 г.	Постановка на производство с 2000 г.*
Удельный средневзвешенный выброс оксидов азота NO_x в приведении к NO_2 , г/(кВт·ч)	Тепловозный	18,0	12,0
	Промышленный	16,0	10,0
	Судовой	17,0	(17,0-9,8)*
Удельный средневзвешенный выброс оксида углерода CO , г/(кВт·ч)	Любое	6,0	3,0
Удельный средневзвешенный выброс углеводородов CH в приведении к CH_{85} , г/(кВт·ч)	Любое	2,4	1,0

* Удельный средневзвешенный выброс оксидов азота для судовых двигателей: а) при частоте вращения 130 мин = 17 г/(кВт·ч); б) в диапазоне частот 130...2000 мин⁻¹ определяется расчетным путем, г/(кВт·ч); в) при частоте вращения >2000 мин⁻¹ = 9,8 г/(кВт·ч).

Предельно допустимые значения выбросов вредных веществ с отработавшими газами двигателей после капитального ремонта определяют расчетным путем на основе данных таблицы 4.2 с применением корректирующих коэффициентов, приведенных в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Значения корректирующих коэффициентов
в зависимости от вредного вещества

Наименование вредного вещества	Значение коэффициента
Оксид углерода	1,20
Оксид азота	0,95
Углеводороды	1,25

Основные требования «Правил предотвращения загрязнения атмосферного воздуха с судов»:

1. Замена озоноразрушающих веществ на нейтральные. К ним относятся, но не ограничиваются: галлоны 1211, 1301, 2402, фреоны ХФУ – 113, 114, 115; ХФУ-22 сохраняется на судах до 2020 г.

2. Вводится ограничение на содержание серы в топливах, сжигаемых в судовых двигателях:

Для тяжелых сортов топлива:

- до 4,5% S до 01.01.2012;
- до 3,5% S после 01.01.2012;
- до 0,5% S после 01.01.2020.

Европарламент принял директиву по ограничению наличия серы в судовом бункере, который используется в территориальных водах и в портах стран Европарламента: наличие серы должно быть не более 1,5% для тяжёлого топлива и не более 0,1% для лёгкого топлива после 2010 г.

Правительство США установило Калифорнийскую зону с аналогичными требованиями.

3. Каждое судно при бункеровке должно получить от поставщика топлива накладную, в которой должны быть отражены сведения о бункере, установленные Дополнением VI к Приложению VI. Накладная на поставку топлива и сопровождающая ее проба топлива, опечатанная и подписанная поставщиком и представителем судна, должны храниться на судне: накладная 3 года, проба топлива 1 год.

4. Дизеля должны быть оборудованы системой для уменьшения выбросов NO_x и SO_x или системой очистки выхлопных газов в соответствии с техническим кодексом по NO_x . Устанавливается контроль за содержанием

в отходящих газах двигателей оксидов азота NO_x . Предельное содержание оксидов азота NO_x допускается не более:

- 1) 17 г/кВт·ч – при $n < 130$ об/мин;
- 2) $45n^{-0,2}$ г/кВт·ч – при $n > 130$ об/мин, но < 2000 об/мин;
- 3) 9,8 г/кВт·ч – при $n = 2000$ об/мин и более, где n – номинальная частота вращения вала двигателя в минуту.

5. Вводится ограничение на использование главных двигателей в акваториях портов. Главные двигатели с приходом в порт должны глушиться на внешнем рейде, судно буксируется к портовому причалу и также выводится на внешний рейд буксирами, главные двигатели запускаются только на внешнем рейде. Порты активно оборудуются береговым электропитанием для судов.

6. Правительства стран-сторон Приложения VI могут назначать порты и терминалы, в которых регулируются выбросы летучих органических соединений с танкеров (паров нефтепродуктов) в соответствии с требованиями Правила 15 Приложения VI.

7. Все танкеры должны быть обеспечены системой сбора паров нефтепродуктов и использовать ее во время погрузки таких грузов.

8. Сжигание нефтяных остатков и твердых отходов на судне допускается только в судовом инсинераторе, причем работа инсинераторов на стоянке в портах запрещается.

9. Применяемые на судне инсинераторы должны соответствовать «Стандартным техническим требованиям ИМО», основными из которых являются:

- температура газов, отходящих из камеры сгорания, должна быть в пределах 850...1200°C;
- содержание кислорода O_2 в камере сгорания – 6...12%;
- максимальное содержание CO в топочном газе – 200 мг/МДж;
- содержание несгоревших остатков в золе не более 10% по весу;
- температура в камере сгорания должна достигать 600°C в течение 5 минут после пуска.

10. Осадки сточных вод и нефтесодержащие остатки могут сжигаться в главной или вспомогательной установке или бойлерах за пределами портовых вод.

11. Запрещается сжигание на судне: остатков грузов, в соответствии с Приложениями I, II, III и связанных с ними упаковочных материалов, полихлорированных бифенилов, мусора, содержащего галогеновые соединения.

В Приложении VI приводится форма Международного свидетельства о предотвращении загрязнения воздуха, выдаваемого Классификационным обществом на 5 лет, с ежегодным переосвидетельствованием.

12. При оснащении судов (включая пассажирские, контейнеровозы и паромы) скруббинг-системами (газоочистительная установка, снижающая содержание оксидов серы в выхлопных газах; монтируется непосредственно на судне; не требует специального наблюдения оператора; постоянно выдает информацию о составе выхлопных газов; обеспечивает безопасную эксплуатацию судового двигателя; анализирует эффективность его работы; не нарушает стабильности судна) возможно использовать самые тяжелые мазуты, при этом не выходя за рамки не только требований Приложения VI МАРПОЛ 73/78, но гораздо более жесткого требования ЕС, лимитирующего содержание серы на уровне 0,1 % в своих территориальных водах.

Исходя из сказанного выше, есть насущная необходимость в моделировании и прогнозировании токсических характеристик ОГ двигателей с учетом условий их применения, используемых видов топлив, уровня форсирования и т.д.

В настоящее время методы моделирования токсичности выхлопа по многим направлениям, в частности по образованию оксидов азота и сажи, в достаточной степени разработаны и приводятся далее в настоящем пособии. Для расчета концентраций этих составляющих ОГ необходим достаточно подробный расчет равновесного состава продуктов сгорания.

Параметры токсичности ОГ по таким составляющим, как CO_2 , H_2O , CO , SO_2 (а, теоретически, и топливных оксидов азота) могут быть получены из достаточно элементарных соотношений термохимического расчета рабочего тела в цилиндре двигателя, методика этого расчета также приводится в настоящей главе.

Для расчета выбросов несгоревших углеводородов физически обоснованных методик не существует до сих пор. Потому для их определения используются статистические данные.

4.2. Методика расчета равновесного состава продуктов сгорания углеводородных топлив

Рабочее тело, участвующее в процессах горения при высокой температуре, в общем случае представляет собой многокомпонентную смесь индивидуальных веществ в газообразном и конденсированном состояниях. Газовые составляющие смеси обычно частично диссоциированы и, возможно, ионизированы. Расчет процессов горения в двигателях обычно производится при некоторых допущениях относительно состояния рабочего тела. Необходимость их введения определяется требованиями достаточной простоты расчетов.

Так, для смеси газов принимается, что она состоит из идеальных индивидуальных веществ. Тогда их термодинамические функции – энтальпия, энтропия a , следовательно, теплоемкости и константы равновесия – не зависят от давления. К отдельным газам, в том числе и ионам, а также к смеси в целом применимо уравнение состояния идеального газа.

Определение равновесного состава является частью многих задач высокотемпературной энергетики и характеризуется большим разнообразием методов расчета. Основы многих методов даны в известных работах Ваничева, Глушко, Зельдовича, Болгарского [13,28]. Наиболее полные сведения с методов расчета состава можно найти в работах по теории и проектированию ракетных двигателей, в специальных обзорах и работах, посвященных исследованию процессов горения при высоких температурах [13,16,22,24,25,28,31].

Методы расчета равновесного состава продуктов сгорания классифицируют следующим образом.

1. Частные методы: а) метод исключения неизвестных; б) метод проб и ошибок; в) метод итераций; г) метод ступенчатого расчета равновесия.

2. Общие методы, использующие константы равновесия: а) метод линеаризации полной системы уравнений; б) метод исключения уравнений действующих масс.

3. Общие методы, основанные на минимизации свободной энергии: а) метод линейной аппроксимации уравнений; б) метод квадратичной аппроксимации уравнений; в) градиентный метод.

4. Методы численного интегрирования: а) «кинетический» метод; б) метод численного интегрирования по параметру.

В целях обеспечения эффективности применения ПЭВМ при решении определенного класса задач основными требованиями к методам расчета являются универсальность метода решения, его надежность и экономичность. Применительно к ДВС, метод расчета равновесного состава должен давать решения в широком интервале изменения состава топливо-воздушной смеси, давлений, температур и в то же время быть достаточно экономичным, с целью включения его в состав программ по оптимизации параметров рабочего цикла двигателя.

Из наиболее часто применяемых методов расчета равновесного состава продуктов сгорания в практике двигателестроения применяется метод исключения неизвестных, который использовался в наиболее близких по целям работах [20,21]. В дальнейшем метод развит по следующим основным моментам:

1. увеличено число компонентов газовой смеси;
2. в состав топлива, для учета влияния азотсодержащих соединений в синтетических альтернативных топливах на токсичность отработавших газов, введен дополнительный элемент – азот;
3. изменена система уравнений материального баланса для учета влияния рециркуляции отработавших газов, присадок водорода, воды и др. на равновесный состав продуктов сгорания и, следовательно, на общую токсичность отработавших, газов;
4. предложен иной метод задания начальных значений независимых параметров "*a*" и "*b*" (см. ниже);
5. улучшена надежность метода за счет применения специального алгоритма поиска интервала существования и изоляции корня целевого уравнения, к которому сводится исходная система уравнений методом исключения неизвестных.

Из большого числа содержащихся в углеводородных пламенах компонентов для расчета выбираются только те, которые в значительных количествах образуются при протекании послепламенных реакций и опускаются из-за малости содержания другие возможные компоненты. К первым относятся 12 компонентов: CO_2 , CO , H_2O , H_2 , H , OH , O_2 , O , NO , N_2 , N , N_2O .

Расчет равновесия производится по следующим реакциям:

$$\begin{array}{l}
1) CO_2 = CO + 0,5O_2 + Q_{CO}, \\
2) H_2O = H_2 + 0,5O_2 + Q_{H_2}, \\
3) H_2O = OH + 0,5H_2 + Q_{OH}, \\
4) H_2 = H + H + Q_H, \\
5) O_2 = O + O + Q_O, \\
6) N_2 + O_2 = 2NO + Q_{NO}, \\
7) N_2 = N + N + Q_N, \\
8) N_2 + 0,5O_2 = N_2O + Q_{N_2O}.
\end{array}
\quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} 1) \\ 2) \\ 3) \\ 4) \\ 5) \\ 6) \\ 7) \\ 8) \end{array}} \right\} \quad (4.3)$$

Система уравнений, соответствующая кинетической схеме реакций (4.3), содержит восемь уравнений закона действующих масс, четыре уравнения материального баланса атомов C , H , O , N и уравнение Дальтона.

Для условий $p = \text{const}$ и $T = \text{const}$ система имеет следующий вид.

Уравнения закона действующих масс:

$$\begin{array}{l}
1) K_1 = \frac{M_{CO_2}}{M_{CO} \sqrt{M_{O_2}}} \left(\frac{p}{M} \right)^{-0,5}, \quad 2) K_2 = \frac{M_{H_2O}}{M_{H_2} \sqrt{M_{O_2}}} \left(\frac{p}{M} \right)^{-0,5}, \\
3) K_3 = \frac{M_{H_2O}}{M_{OH} \sqrt{M_{H_2}}} \left(\frac{p}{M} \right)^{-0,5}, \quad 4) K_4 = \frac{M_H}{\sqrt{M_{H_2}}} \left(\frac{p}{M} \right)^{0,5}, \\
5) K_5 = \frac{M_O}{\sqrt{M_{O_2}}} \left(\frac{p}{M} \right)^{0,5}, \quad 6) K_6 = \frac{M_{NO}}{\sqrt{M_{O_2} M_{N_2}}}, \\
7) K_7 = \frac{M_N}{\sqrt{M_{N_2}}} \left(\frac{p}{M} \right)^{0,5}, \quad 8) K_8 = \frac{M_{N_2O}}{M_{N_2} \sqrt{M_{O_2}}} \left(\frac{p}{M} \right)^{-0,5}.
\end{array}
\quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} 1) \\ 2) \\ 3) \\ 4) \\ 5) \\ 6) \\ 7) \\ 8) \end{array}} \right\} \quad (4.4)$$

Уравнения материального баланса:

$$\begin{aligned}
 1) \quad & M_{CO_2} + M_{CO} = \frac{C}{12}(1 + \gamma_r), \\
 2) \quad & M_{H_2O} + M_{H_2} + 0,5M_H + 0,5M_{OH} = \frac{H}{2}(1 + \gamma_r), \\
 3) \quad & M_{CO_2} + M_{O_2} + 0,5M_{H_2O} + 0,5M_{OH} + 0,5M_O + \\
 & + 0,5M_{NO} + 0,5M_{N_2O} = \left(\frac{O}{32} + 0,21\alpha M_0 \right) (1 + \gamma_r), \\
 4) \quad & M_{N_2} + 0,5M_{NO} + 0,5M_N + 0,5M_{H_2O} = \left(\frac{N}{28} + 0,79\alpha M_0 \right) (1 + \gamma_r).
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

Уравнение Дальтона:

$$\begin{aligned}
 & M_{CO_2} + M_{CO} + M_{H_2O} + M_{H_2} + 0,5M_H + M_{OH} + M_{O_2} + M_O + \\
 & + M_{NO} + M_{N_2} + M_N + M_{N_2O} = M.
 \end{aligned}$$

Здесь и выше M_{CO_2} , M_{CO} , ... M_{N_2O} и M – число долей компонентов газовой смеси CO_2 , CO , ... N_2O и суммарное число молей продуктов сгорания, отнесенное к одному килограмму топлива, кмоль/кг; C , H , O , N – массовые доли углерода, водорода, кислорода и азота в одном килограмме топлива; γ_r – коэффициент остаточных (рециркулируемых) газов; p – давление газов, МПа; T – температура газов, К; Q_{CO} , Q_{H_2} , ... Q_{N_2O} – тепловые эффекты реакций (4.3), отнесенные соответственно CO , H_2 , ... N_2O , кДж/кмоль; K_1 , K_2 , ... K_8 – константы равновесия.

Значения коэффициентов аппроксимации кинетических констант равновесия в форме расширенного закона Аррениуса $K_i = A 10^m T^n \exp(E/RT)$ приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4. Коэффициенты аппроксимации кинетических констант равновесия реакций диссоциации (4.3) $K_i = A 10^m T^n \exp(E/RT)$, по данным [20]

Отношение парциальных давлений	Единицы величин	A	m	n	E , кДж/кмоль	E , кал/моль
$p_{CO_2}/(p_{CO} p^{0,5})$	МПа ^{-0,5}	3,4464	-7	0,6885	284500	69100
$p_{H_2O}/(p_{H_2} p_{O_2}^{0,5})$	МПа ^{-0,5}	2,4156	-2	-0,2421	264500	59090
$p_{H_2O}/(p_{OH} p_H^{0,5})$	МПа ^{-0,5}	15,217 7	-4	-0,1118	284000	68920
$p_H/p_{H_2}^{0,5}$	МПа ^{0,5}	1,3172	1	0,4056	-218000	-52200
$p_O/p_{O_2}^{0,5}$	МПа ^{0,5}	1,5664	2	0,2126	-249500	-59700
$p_{NO}/(p_{O_2} p_{N_2})^{0,5}$	-	6,0469	0	-0,0322	-9100	-21790
$p_N/p_{N_2}^{0,5}$	МПа ^{0,5}	0,7977	2	0,2920	-474000	-113500
$p_{N_2O}/(p_{N_2} p_{O_2}^{0,5})$	МПа ^{-0,5}	3,7996	-6	0,6125	-78000	-18710

Далее примем следующие обозначения:

для компонентов газовой смеси

$$M_1 = M_{CO_2}, \quad M_2 = M_{CO}, \quad M_3 = M_{H_2O}, \quad M_4 = M_{H_2}, \quad M_5 = M_H,$$

$$M_6 = M_{OH}, \quad M_7 = M_{O_2}, \quad M_8 = M_O, \quad M_9 = M_{NO}, \quad M_{10} = M_{N_2},$$

$$M_{11} = M_N, \quad M_{12} = M_{N_2O}, \quad M_{13} = M = \sum_{i=1}^{12} M_i;$$

для правых частей уравнений материального баланса

$$b_1 = \frac{C}{12}(1 + \gamma_r), \quad b_2 = \frac{H}{2}(1 + \gamma_r),$$

$$b_3 = \left(\frac{O}{32} + 0,21\alpha M_0 \right) (1 + \gamma_r), \quad b_4 = \left(\frac{N}{28} + 0,79\alpha M_0 \right) (1 + \gamma_r);$$

для комбинаций констант равновесия

$$a_1 = \frac{K_6}{K_1 K_7}, \quad a_2 = \frac{K_6}{K_2 K_7}, \quad a_3 = \frac{K_3 K_4 K_6}{K_2 K_7},$$

$$a_4 = \frac{K_5 K_6}{K_7}, \quad a_5 = \frac{K_6 K_7}{K_5}, \quad a_3 = \frac{K_5 K_8}{K_6^2}.$$

Отношение концентраций NO к N и NO к O обозначим соответственно $a = M_9/M_{11}$; $b = M_9/M_8$.

Далее, во-первых, рядом тождественных преобразований можно свести исходную систему нелинейных уравнений (4.4) и (4.5) с 12 неизвестными к системе алгебраических уравнений, зависящей от двух параметров a и b . При этом целесообразно исключить из уравнения выражения $(p/M)^{\pm 0,5}$.

Во-вторых, для веществ, содержание которых в продуктах сгорания преобладает – CO_2 , H_2O , H_2 , CO , O_2 , аналитические выражения можно находить из линейной части исходной системы уравнений, т.е. уравнений материального баланса (4.5) [28].

Рассматривая (4.4), также можно заметить, что выражение для константы шестой реакции не содержит члена $(p/M)^{\pm 0,5}$ при наличии M_9 , который входит в параметры a и b . Следовательно, комбинирование (составление отношений, произведений) вторых, четвертых выражений для констант равновесия с K_6 позволяет исключить члены $(p/M)^{\pm 0,5}$ и выразить отношение концентраций двух любых компонентов через параметры a и b .

Используя эти предварительные замечания, приведем последовательность преобразований исходной системы уравнений к системе алгебраических уравнений, зависящей только от двух параметров a и b .

Для получения выражений для M_1 и M_2 используем первое уравнение материального баланса $M_1 + M_2 = b_1$ и соотношение $a_1 M = a M_2$, полученное комбинированием констант K_1 , K_6 , K_7 . Например, для исключения $(p/M)^{\pm 0,5}$ в выражении для K_1 , умножим K_1 на K_7 :

$$K_1 K_7 = \frac{M_1}{M_2 \sqrt{M_7}} \left(\frac{p}{M} \right)^{-0,5} \frac{M_{11}}{\sqrt{M_{10}}} \left(\frac{p}{M} \right)^{0,5} = \frac{M_1}{M_2} \frac{M_{11}}{\sqrt{M_7 M_{10}}}.$$

Для исключения $\sqrt{M_7 M_{10}}$ поделим последнее выражение на

$$\frac{K_1 K_7}{K_6} = \frac{M_1}{M_2} \frac{M_{11}}{M_9} \quad \text{или} \quad \frac{1}{a_1} = \frac{M_1}{M_2} \frac{1}{a}.$$

Итак, для нахождения M_1 и M_2 имеем два уравнения

$$a_1 M_1 = a M_2, \quad M_1 + M_2 = b_1,$$

совместное решение которых дает

$$M_1 = \frac{a b_1}{a_2 + a}, \quad M_2 = \frac{a_1 b_1}{a_1 + a}.$$

Для нахождения выражения для M_9 составим соотношение

$$a_5 = \frac{K_6 K_7}{K_5} = \frac{M_9}{\sqrt{M_7 M_{10}}} \frac{M_{11}}{\sqrt{M_{10}}} \frac{\sqrt{M_7}}{M_8} = \frac{M_9}{M_{10}} \frac{M_{11}}{M_8}.$$

Выразим отсюда

$$\frac{M_{10}}{M_9} = \frac{1}{a_5} \frac{M_{11}}{M_8} \frac{M_9}{M_9} = \frac{1}{a_5} \frac{b}{a}.$$

Составляя аналогичное соотношение

$$a_6 = \frac{K_5 K_8}{K_6^2} = \frac{M_{12}}{M_9} b,$$

получим связь между M_{12} и M_9 .

Преобразовав четвертое уравнение материального баланса для атомов азота к виду

$$M_9 = \left[1 + 2 \frac{M_{10}}{M_9} + \frac{M_{11}}{M_9} + \frac{M_{12}}{M_9} \right] = 2b_4,$$

и выразив из последнего M_9 с учетом предыдущего, получим

$$M_9 = \frac{2b_4}{1 + \frac{2b_4}{a_5 a} + \frac{1}{a} + a_6 b} = \frac{2b_4 a_5 a}{a_5 a + 2b + a_5 + a_5 a_6 a b}.$$

Для M_8 , M_{11} и M_{12} имеем тождественно

$$M_8 = \frac{M_9}{b}, \quad M_{11} = \frac{M_9}{a}, \quad M_{12} = M_9 a_6 b.$$

Из соотношения констант K_5 , K_6 , K_7

$$a_4 = \frac{K_5 K_6}{K_7} = \frac{M_8}{\sqrt{M_7}} \frac{M_9}{\sqrt{M_7 M_{10}}} \frac{\sqrt{M_{10}}}{M_{11}} = \frac{M_8}{M_7} \frac{M_9}{M_{11}} \frac{M_9}{M_9} = \frac{M_9}{M_7} \frac{a}{b}$$

найдем выражение для M_7

$$M_7 = \frac{a}{a_4 b} M_9.$$

Из 4-го уравнения системы (4.5) имеем

$$M_{10} = b_4 - (M_{12} + 0,5M_9 + 0,5M_{11}).$$

Для нахождения выражения для M_6 выразим из второго уравнения (4.5) сумму $M_3 + M_6$ и с учетом соотношений первого уравнения (4.5) получим

$$M_1 + 0,5M_2 = b_1 - 0,5M_9 = b_1 - 0,5(b_1 - M_1) = 0,5(b_1 + M_1),$$

$$M_3 + M_6 = c_1 = 2b_3 - b_1 - M_1 - 2M_7 - M_8 - M_9 - M_{12}.$$

Преобразуем второе уравнение (4.5) к виду

$$2M_3 \left(1 + \frac{M_4}{M_3}\right) = 2b_2 - M_6 \left(1 + \frac{M_5}{M_6}\right).$$

Нетрудно показать, что

$$\frac{M_5}{M_6} = \frac{a_3}{a}, \quad \frac{M_4}{M_3} = \frac{a_2}{a}$$

и тождественно $M_3 = c_1 - M_6$. С учетом последнего имеем:

$$2(c_1 - M_6) \left(1 + \frac{a_2}{a}\right) = 2b_2 - M_6 \left(1 + \frac{a_3}{a}\right).$$

Откуда

$$M_6 = \frac{2b_2 - 2c_1 \left(1 + \frac{a_2}{a}\right)}{1 + \frac{a_3}{a} - 2 \left(1 + \frac{a_2}{a}\right)},$$

или

$$M_6 = \frac{2(b_2 a - c_1 a - c_1 a_2)}{a_3 - 2a_2 - a}.$$

При известном выражении M_6 величины M_3 , M_4 , M_5 , можно найти из следующих выражений, получающихся из соотношений, использованных выше:

$$M_3 = c_1 - M_6, \quad M_4 = \frac{a_2}{a} M_3, \quad M_5 = \frac{a_3}{a} M_6.$$

Для нахождения выражения, связывающего параметры b и a , воспользуемся уравнением 7 исходной системы (4.4)

$$\frac{M_{11}}{M_{10}} \frac{M_{11}}{M_{13}} = \frac{K_7^2}{p}.$$

Поделив его на a_5 , выразим M_{10} :

$$a_5 = \frac{K_6 K_7}{K_5} = \frac{M_9}{M_{10}} \frac{M_{11}}{M_{13}}, \quad \frac{M_{10}}{b^2} = \left(\frac{K_5}{K_6} \right)^2 \frac{M_{13}}{p}.$$

Вводя обозначение для правой части последнего выражения – D , получим

$$M_{10} = Db^2.$$

С другой стороны, воспользуемся выражением для b_4 , полученным из уравнения материального баланса

$$M_{10} = b_4 - (M_{12} + 0,5M_9 + 0,5M_{11}) = b_4 - M_9 \left(\frac{M_{12}}{M_9} + 0,5 + 0,5 \frac{M_{11}}{M_9} \right).$$

Имея в виду, что

$$\frac{M_{12}}{M_9} = a_6 b, \quad \frac{M_{11}}{M_9} = \frac{1}{a}, \quad M_9 = \frac{2b_4 a_5 a}{a_5 a + 2b + a_5 + a_5 a_6 a b}$$

будем иметь

$$M_{10} = b_4 - \frac{2b_4 a_5 (a_6 a b + 0,5a + 0,5)}{a_5 a + 2b + a_5 + a_5 a_6 a b}.$$

Приравняем оба выражения для M_{10} и получим

$$b_4 - \frac{2b_4 a_5 (a_6 a b + 0,5(a+1))}{a_5 (a+1) + b(2 + a_5 a_6 a)} = Db^2.$$

Приведем полученное выражение к общему знаменателю и сгруппируем подобные члены

$$\begin{aligned} a_5 (a+1)b_4 + (2 + a_5 a_6 a)b_4 b - 2b_4 a_5 a_6 a b - 2b_4 a_5 (a+1)0,5 = \\ = a_5 (a+1)Db^2 + (2 + a_5 a_6 a)Db^3, \end{aligned}$$

или

$$(2 + a_5 a_6 a)Db^3 + a_5 (a+1)Db^2 - (2 - a_5 a_6 a)b_4 b = 0.$$

Поскольку $b \neq 0$, получим квадратное уравнение относительно b

$$\frac{2 + a_5 a_6 a}{(2 - a_5 a_6 a)b_4} Db^2 + \frac{a_5 (a+1)}{(2 - a_5 a_6 a)b_4} Db - 1 = 0,$$

$$\text{или } ABb^2 + ACb - 1 = 0,$$

где
$$A = \frac{1}{(2 - a_5 a_6 a) b_4} \left(\frac{K_5}{K_6} \right)^2 \frac{M_{13}}{p}, \quad B = 2 + a_5 a_6 a, \quad C = a_5 (a + 1).$$

Принимая для b положительное значение корня, будем иметь

$$b = \sqrt{\left(\frac{C}{2B} \right)^2 + \frac{1}{AB} - \frac{C}{2B}}.$$

Таким образом, исходная система уравнений (4.3), (4.4) и (4.5) после преобразований имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{1}{(2 - a_5 a_6 a) b_4} \left(\frac{K_5}{K_6} \right)^2 \frac{M_{13}}{p}, \quad B = 2 + a_5 a_6 a, \quad C = a_5 (a + 1), \\ b &= \sqrt{\left(\frac{C}{2B} \right)^2 + \frac{1}{AB} - \frac{C}{2B}}, \quad M_1 = \frac{ab_1}{a_1 + b}, \quad M_2 = \frac{a_1 b_1}{a_1 + a}, \\ M_9 &= \frac{2b_4 a_5 a}{a_5 a + 2b + a_5 + a_5 a_6 ab}, \\ M_8 &= \frac{M_9}{b}, \quad M_{11} = \frac{M_9}{a}, \quad M_{12} = M_9 a_6 b, \\ M_7 &= \frac{a M_9}{a_4 b}, \quad M_{10} = b_4 - (M_{12} + 0,5(M_9 + M_{11})), \\ c_1 &= 2b_3 - b_1 - M_1 - 2M_7 - M_8 - M_9 - M_{12}, \\ M_6 &= \frac{2(b_2 a - c_1 a - c_1 a_2)}{a_3 - 2a_2 - a}, \quad M_5 = \frac{a_3 M_6}{a}, \\ M_3 &= c_1 - M_6, \quad M_4 = \frac{a_2}{a} M_3, \quad M_{13} = \sum_{i=1}^{13} M_i. \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

Значение параметра a будет найдено из решения уравнения

$$F(a) = \frac{M_5(a)}{\sqrt{M_4(a)M_{13}(a)}} - \frac{K_5}{p} = 0. \quad (4.7)$$

Корень уравнения (4.7) находится методом деления расчетного шага пополам, на котором функция $F(a)$ меняет знак. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 4.1.

Вначале вычисляются численные значения констант равновесия и их комбинации $a_1 \dots a_6$. Затем производится вычисление начальных значений концентраций газов. При этом используются первые три реакции равнове-

сия системы (4.3) и соответствующие им уравнения закона действующих масс (4.4). Уравнения 1-3 из системы (4.4) при введении степеней превращения ξ_1 , ξ_2 и ξ_3 реакций 1-3 системы (4.3) приводятся виду

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \ln(K_1 p) - \ln x_1 - \ln x_2 + C_0 = 0, \\ F_2 &= \ln(K_2 p) - \ln x_3 - \ln x_5 + C_0 = 0, \\ F_3 &= \ln(K_3 p) - \ln x_3 - \ln x_6 + 0,5(\ln x_5 - \ln x) = 0, \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

где

$$\left. \begin{aligned} C_0 &= 0,5(\ln x_4 - \ln x), \\ x_1 &= x_{10}(1 - \xi_1), \quad x_2 = x_{20} + \xi_1 x_{10}, \\ x_3 &= (1 - \xi_3 - \xi_2)x_{30}, \\ x_4 &= x_{40} + 0,5\xi_1 x_{10} + \xi_2 x_{30}, \\ x_5 &= x_{50} + x_{30}(\xi_2 + 0,5\xi_3), \\ x_6 &= \xi_3 x_{30}, \quad x = \sum_{i=1}^6 x_i + x_{70}. \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

Здесь $x_1 \dots x_7$ – концентрации CO_2 , CO , H_2O , O_2 , H_2 , OH и N_2 соответственно; x_{i0} – начальные значения концентраций газов, определяемые по условиям стехиометрии.

Степени диссоциации ξ_i находятся методом Ньютона из выражения

$$F_i = F_{i0} + \frac{\partial F_i}{\partial \xi_1} \Delta \xi_1 + \frac{\partial F_i}{\partial \xi_2} \Delta \xi_2 + \frac{\partial F_i}{\partial \xi_3} \Delta \xi_3, \quad i = 1 \dots 3. \quad (4.10)$$

Решение системы уравнений (4.10) производится с использованием стандартной программы пакета прикладных программ для ЭВМ. Для бедных смесей ($\alpha \geq 1$) решение достигается за 5...8 итераций с достаточно высокой точностью $\delta \xi_\Sigma = 10^{-6}$. Для богатых смесей ($\alpha < 1$) наблюдается плохая сходимость итерационного процесса, поэтому во избежание закливания число итераций ограничивается 50...100.

Концентрации N и NO для вычисления начального значения параметра a находятся по выражениям 6 и 7 системы (4.4) из условия равновесия реакций диссоциации N_2 и реакции 6 из (4.3).

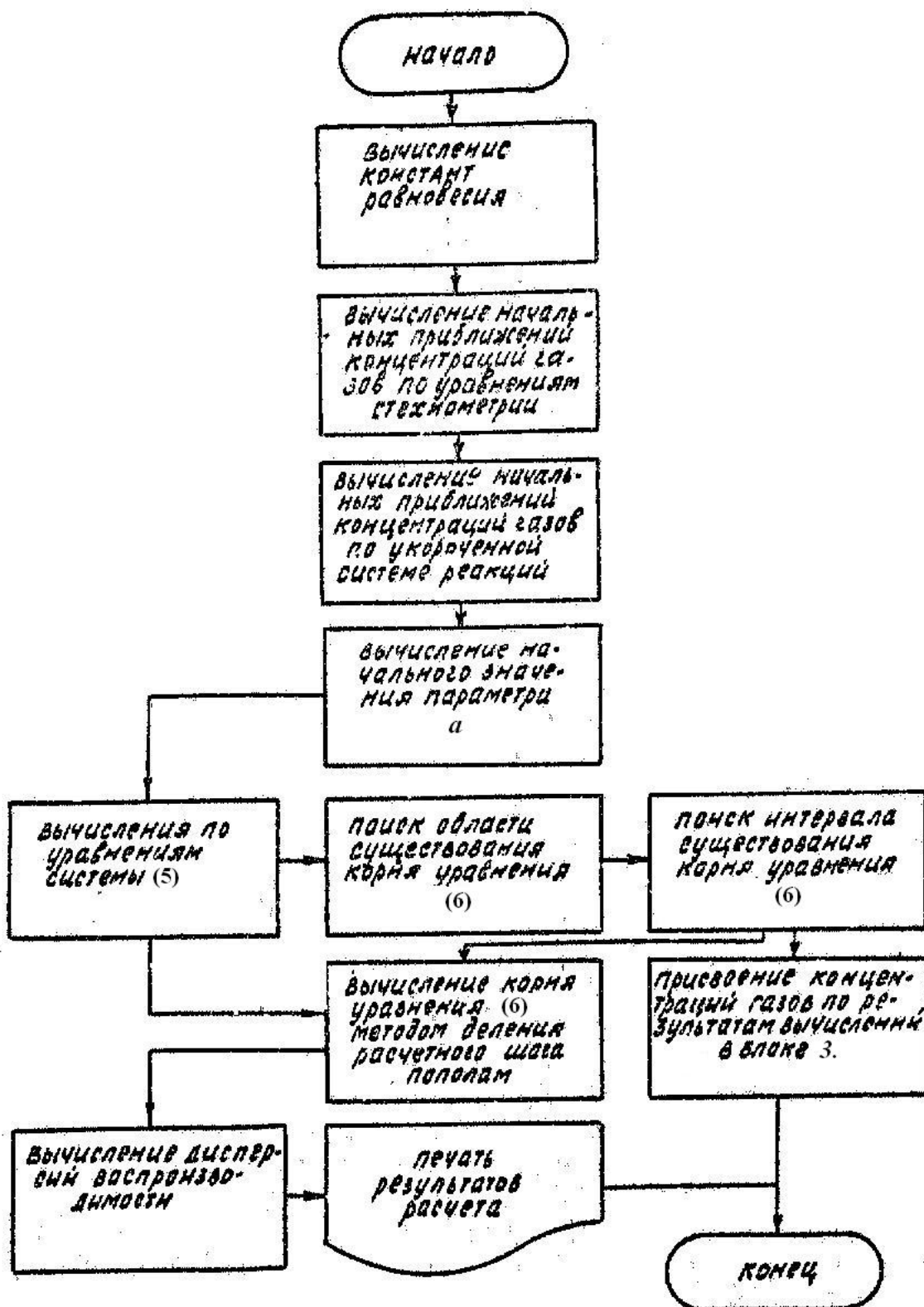
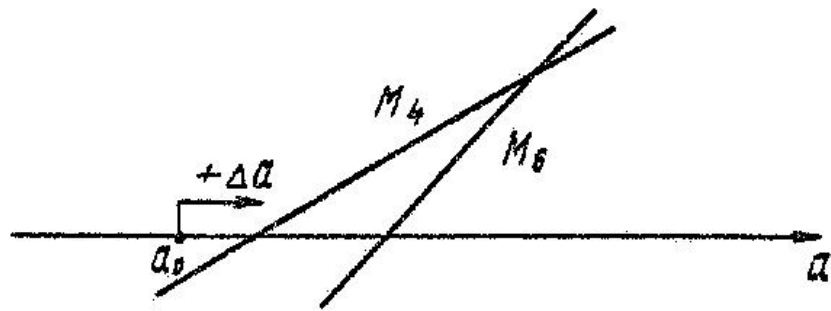
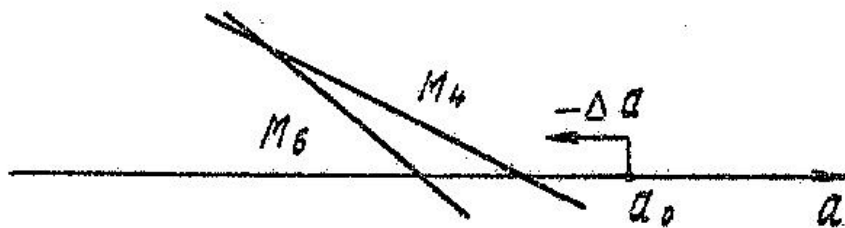


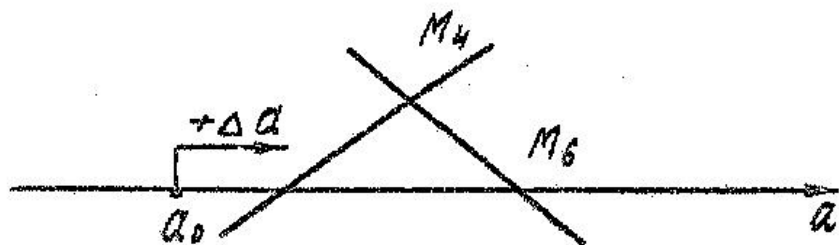
Рис. 4.1. Общая блок-схема алгоритма расчета равновесного состава продуктов сгорания



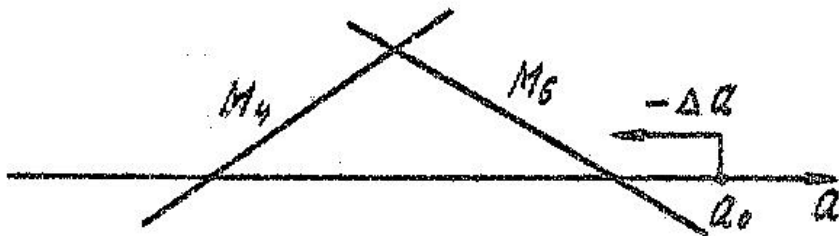
а) M_4 или $M_6 < 0$; $p_4, p_6 > 0$: $\Delta a = +\Delta a$



б) M_4 или $M_6 < 0$; $p_4, p_6 < 0$: $\Delta a = -\Delta a$

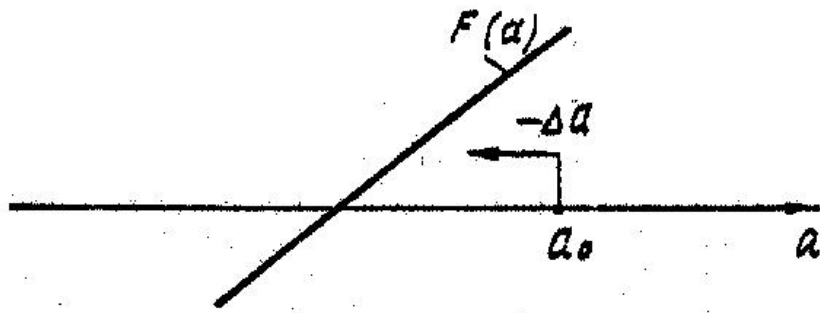


в) $M_4 < 0$; $M_6 > 0$; $p_4 > 0$; $p_6 < 0$: $\Delta a = +\Delta a$

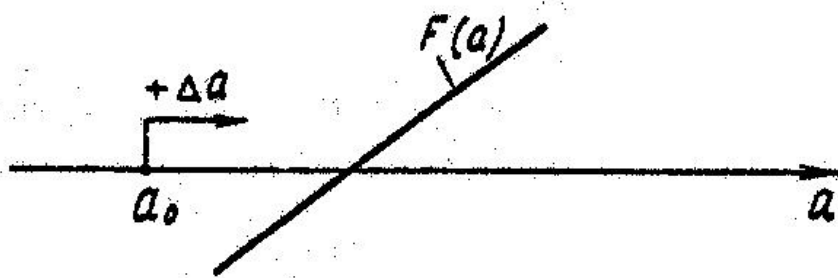


г) $M_4 > 0$; $M_6 < 0$; $p_4 > 0$; $p_6 < 0$: $\Delta a = -\Delta a$

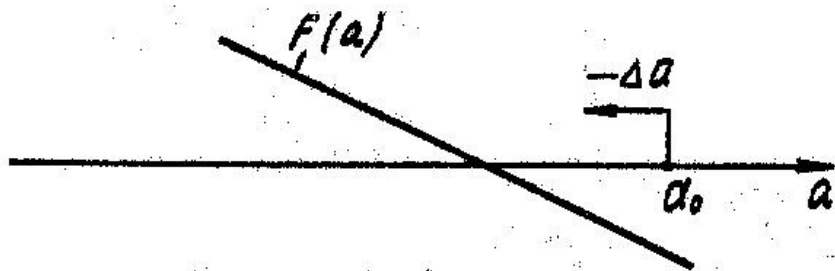
Рис. 4.2. К алгоритму поиска области существования
корня функции $F(a) = 0$



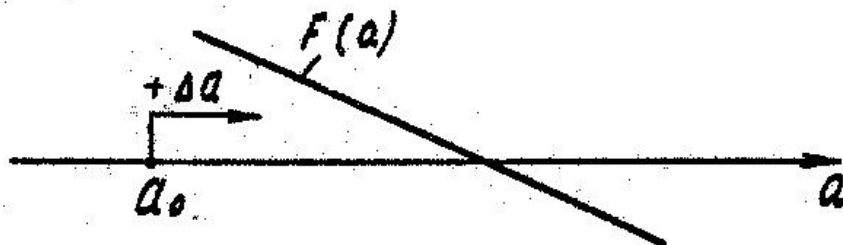
a) $F(a) > 0; dF/da > 0; \Delta a = -\Delta a$



б) $F(a) < 0; dF/da > 0; \Delta a = +\Delta a$



в) $F(a) < 0; dF/da < 0; \Delta a = -\Delta a$



г) $F(a) > 0; dF/da < 0; \Delta a = +\Delta a$

Рис. 4.3. К алгоритму поиска интервала изоляции
корня уравнения $F(a) = 0$

В общем случае область определения функции $F(a)$ (4.7) ограничена неотрицательными значениями концентраций M_4 и M_{13} . При неудачном выборе начального приближения корня a_0 уравнения $F(a)$ или в случае, когда значение шага аргумента больше ширины области определения функции $F(a)$, возникает необходимость поиска области существования корня, а затем и интервала изоляции корня уравнения $F(a)$, т.е. интервала, на котором функция меняет знак. Алгоритм поиска области существования корня уравнения $F(a) = 0$ построен на анализе знаков концентраций M_4 , M_6 и их производных $p_4 = \partial M_4 / \partial a$ и $p_6 = \partial M_6 / \partial a$. Схемы выбора направления изменения параметра a , т.е. знака шага Δa , представлены на рис. 4.2.

Алгоритм поиска интервала изоляции корня уравнения $F(a) = 0$ построен аналогичным образом. Здесь анализируются знаки функции $F(a)$ и ее производной $dF(a)/da$. Схема выбора направления изменения параметра a при поиске интервала изоляции корня уравнения $F(a) = 0$ показана на рис. 4.3.

Алгоритм нахождения корня уравнения $F(a) = 0$ методом деления расчетного шага пополам построен по следующей схеме:

$$\left. \begin{array}{l} \text{если} \\ \text{то} \\ \text{иначе} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{sign}[F(a)] = \text{sign}[F(0,5(a_1 + a_2))], \\ a_1 = a_3 = 0,5(a_1 + a_2), \\ a_2 = a_3 = 0,5(a_1 + a_2). \end{array} \quad (4.11)$$

Здесь $sign$ – операция выделения знака числа; a_1 и a_2 – первое и второе значение параметра a . Второе и третье выражения (4.11) обеспечивают пере-присвоение значения параметра в точках 1 и 2 для следующего шага a_3 поиска корня в зависимости от значения на предыдущем шаге $a_{1,2}$.

Рассмотренный способ задания начальных значений параметра a и поисковые алгоритмы области существования и интервала изоляции корня уравнения $F(a) = 0$ обеспечивают надежную сходимость решения в широком интервале температур $T = 1700 \dots 3800$ К, давлений $p = 0,1 \dots 20,0$ МПа и состава смеси $\alpha = 0,6 \dots 20,0$.

4.3. Математическая модель процесса образования оксидов азота

Основу рабочего процесса ДВС составляет процесс высокотемпературного горения топлива, негативным следствием которого является образование вредных компонентов в продуктах сгорания. Решение проблем снижения токсичности выхлопа ДВС основывается на анализе физико-химических основ фундаментальной теории горения. Цель рассматриваемой ниже методики – расчетное определение содержания токсичных оксидов азота в отработавших газах двигателя.

В основе методики лежит схема цепных реакций, предложенная Я.Б. Зельдовичем. Для решения системы уравнений, описывающих эти процессы, необходимо в любой момент времени знать мгновенные температуры и концентрации реагирующих компонентов, включая неравновесные. Учитывая неравномерность полей температур и концентраций в цилиндре, необходимо принять ту или иную модель сгорания. В данном случае принята так называемая «модель стехиометрического слоя», хорошо подтвержденная опытом расчетов.

Основные положения модели сводятся к следующему:

- 1) сгорание основной массы топлива происходит в зоне стехиометрического состава с коэффициентом избытка воздуха близким к единице;
- 2) продукты сгорания однородны по составу (т.е. принимается гипотеза о «полном смешении» продуктов сгорания);
- 3) температура в зоне продуктов сгорания одинакова во всех точках в данный момент времени;
- 4) средняя термодинамическая температура в цилиндре определяется по уравнению состояния;
- 5) давление в любой точке камеры сгорания одинаково в данный момент цикла времени;
- 6) содержание компонентов газовой смеси в зоне продуктов сгорания соответствует условиям равновесия;
- 7) образование NO происходит в зонах продуктов сгорания топливовоздушной смеси стехиометрического состава, т.е. в зонах, где сгорает основная масса топлива;

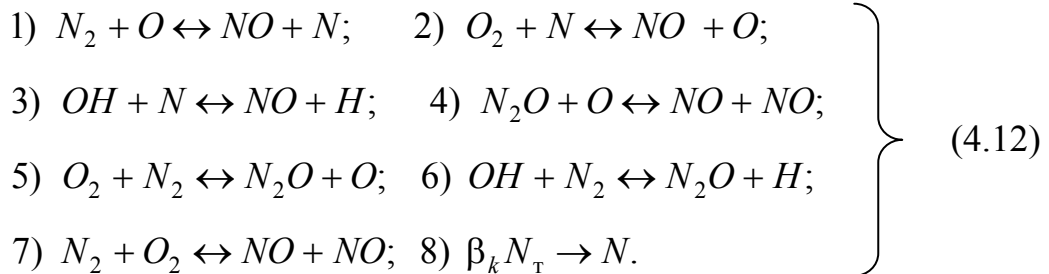
8) закон выгорания топлива $x(\varphi)$, индикаторная диаграмма $p(\varphi)$ и масса заряда в цилиндре известны;

9) текущее значение температуры воздуха, не участвующего в сгорании топлива, рассчитывается по уравнению адиабаты;

10) температура продуктов сгорания определяется для каждого момента цикла из уравнения баланса энтальпий с учетом потерь теплоты на недогорание и диссоциацию продуктов сгорания.

11) Количество оксидов азота к моменту открытия выпускных органов рассматривается как содержание их в отработавших газах.

Согласно механизму Я.Б.Зельдовича, образование оксидов азота сводится к системе уравнений:



В (4.12) во внимание принимаются только процессы, происходящие в продуктах сгорания. Поскольку скорости реакций горения достаточно высоки, то сгоревшие газы близки к термодинамическому равновесию. Это позволяет с достаточной для практики точностью вместо реальных концентраций использовать при расчетах равновесные концентрации. Уравнение 8 учитывает переход связанного азота топлива в лабильное состояние пропорционально коэффициенту конверсии β_k .

Дифференциальное уравнение, описывающее процесс образования NO по механизму Я.Б.Зельдовича (реакции 1, 2) имеет вид:

$$\frac{d[NO]}{dt} = R_{+1} - R_{-1} + R_{+2} - R_{-2}, \quad (4.13)$$

где $R_{\pm j}$ – скорости прямых и обратных реакций вида $R_{+1} = K_{+1}[N_2][O]$ (здесь $[N_2]$, $[O]$ и т.д. – концентрации реагирующих веществ; $K_{\pm j}$ – константы скоростей реакций).

Используя принцип квазистационарных концентраций для O и N , можно выразить текущую концентрацию атомарного азота через равновесные значения концентраций реагирующих веществ, приравняв скорости реакций

$$\frac{dO}{dt} = -\frac{dN}{dt} = -R_{+1} + R_{-1} - R_{+1} + R_{-2} = 0. \quad (4.14)$$

Приняв условные обозначения

$$\alpha = \frac{[NO]}{[NO]_p} \text{ и } K_1 = \frac{R_{1p}}{R_{2p}},$$

получим

$$[N] = [N]_p \frac{R_{1p} + \alpha R_{2p}}{\alpha R_{1p} + R_{2p}}. \quad (4.15)$$

Поскольку реакции рекомбинации $N_2 + M \leftrightarrow N + N + M$ достаточно медленны, то в процессе образования NO атомарный азот не будет находиться в равновесии с N_2 и квазистационарная концентрация N будет определяться только кинетикой реакций. Подставляя (4.15) в (4.13), с учетом принятых обозначений получим

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2(1 - \alpha^2) \frac{R_{1p}}{1 + \alpha K_1}. \quad (4.16)$$

Образование NO в ДВС происходит в переменном объеме камеры сгорания, поэтому концентрацию реагирующих веществ удобнее выражать в объемных долях r_i , а отсчет времени вести в градусах угла поворота коленчатого вала φ , °п.к.в.

$$\frac{dr_{NO}}{d\varphi} = \frac{2 \cdot 10^3 p R_{1p} (1 - \alpha^2)}{6nRT \left(1 + \alpha \frac{R_{1p}}{R_{2p}} \right)}, \frac{1}{\text{°п.к.в.}}. \quad (4.17)$$

где $\alpha = r_{NO}/[r_{NO}]_p$ – как и выше, отношение действительной концентрации оксида азота к равновесной; $R_{1p} = K_{+1} [r_{N_2}]_p [r_O]_p$, $R_{2p} = K_{+2} [r_{O_2}]_p [r_N]_p$ и т.д. – скорости реакций при равновесных значениях концентраций реагирующих веществ; p – давление газов в цилиндре, МПа; n – частота вращения коленчатого вала, 1/мин; T – температура продуктов сгорания, К; $[r_{O_2}]_p$, $[r_N]_p$ и

т.д. – равновесные концентрации реагирующих веществ, объемные доли; R – газовая постоянная ($R = 8,314$ кДж/(кмоль·К)); $K_{\pm j}$ – константы скоростей прямых и обратных реакций, м³/(кмоль·с).

Используя принцип квазистационарных концентраций для N , O , N_2O и OH после несложных преобразований по аналогии с (4.13)-(4.15) для расширенного кинетического механизма (реакции 1-7) получим:

$$\frac{d[NO]}{dt} = R_{+1} - R_{-1} + R_{+2} - R_{-2} + R_{+3} - R_{-3} + 2(R_{+4} - R_{-4} + R_{+7} - R_{-7}), \quad (4.18)$$

и

$$[N] = [N]_p \frac{R_{1p} + \alpha R_{2p} + \alpha R_{3p}}{\alpha R_{1p} + R_{2p} + R_{3p}},$$

$$[N_2O] = [N_2O]_p \frac{R_{5p} + R_{6p} + \alpha^2 R_{4p}}{R_{5p} + R_{6p} + R_{4p}}.$$

Используя полученные выражения, выразив в выражении (4.18) действительные скорости реакции $R_{\pm j}$ через их равновесные значения R_{jp} и параметр α , получим

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2(1 - \alpha^2) \left[\frac{R_{1p}}{1 + \alpha K_1} + \frac{R_{4p}}{1 + K_2} + R_{7p} \right]. \quad (4.19)$$

или

$$\frac{dr_{NO}}{d\varphi} = \frac{2 \cdot 10^3 p (1 - \alpha^2)}{6nRT} \left[\frac{R_{1p}}{1 + \alpha K_1} + \frac{R_{4p}}{1 + K_2} + R_{7p} \right] \cdot \frac{1}{\circ_{\text{П.К.В.}}}. \quad (4.20)$$

где

$$K_1 = \frac{R_{1p}}{R_{2p} + R_{3p}}; \quad K_2 = \frac{R_{4p}}{R_{5p} + R_{6p}}; \quad R_{3p} = K_{+3} [r_{OH}]_p [r_N]_p \text{ и т.д.}$$

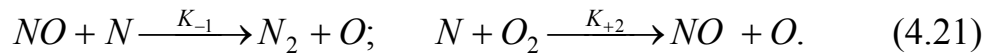
На основании анализа многочисленных литературных данных в предлагаемой методике расчета приняты следующие значения кинетических констант.

$$K_{+1} = 1,36 \cdot 10^{11} e^{-\frac{315700}{RT}};$$

$$K_{-1} = 3,12 \cdot 10^{10} e^{-\frac{1670}{RT}};$$

$$\begin{aligned}
K_{+2} &= 1,33 \cdot 10^7 T e^{-\frac{29600}{RT}}; \\
K_{+3} &= 4,21 \cdot 10^{10}; \\
K_{+4} &= 4,82 \cdot 10^{10} e^{-\frac{100480}{RT}}; \\
K_{+5} &= 5,10 \cdot 10^{10} e^{-\frac{458240}{RT}}; \\
K_{+6} &= 4,08 \cdot 10^{10} e^{-\frac{277210}{RT}}; \\
K_{+7} &= 9,10 \cdot 10^{21} T^{-2,5} e^{-\frac{538000}{RT}}.
\end{aligned}$$

Процесс образования NO можно разбить на два периода: 1) образование топливных оксидов азота; 2) образование термических оксидов из азота воздуха. При этом в первом периоде скорости реакций с участием атомарного азота на 2...3 порядка превышают скорости других реакций. Это позволяет аппроксимировать процесс образования NO в этом периоде схемой двух реакций



Поскольку для условий в цилиндре ДВС время релаксации реакций образования топливных оксидов азота по крайней мере на два порядка меньше времени образования термических оксидов азота, то первый период можно интерпретировать как введение в зону продуктов сгорания дополнительного числа молей NO на линии тепловыделения:

$$\frac{dr_{NO}}{d\varphi} = \frac{dr_{NO}^k}{d\varphi} + (r_{NO}^T - r_{NO}) \frac{dM_{nc} / d\varphi}{M_{nc}}, \quad (4.22)$$

где r_{NO} и $dr_{NO}/d\varphi$ – объемная концентрация NO и скорость ее изменения по углу п.к.в.; $dr_{NO}^k/d\varphi$ – кинетическая составляющая скорости изменения NO , отражающая процесс образования термических оксидов азота, образующихся вследствие окисления азота воздуха (рассчитывается по выражениям (4.17) или (4.19);

$M_{\text{пс}}$ – количество продуктов сгорания; $r_{NO} \frac{dM_{\text{пс}} / d\varphi}{M_{\text{пс}}}$ – составляющая скорости изменения концентрации NO , учитывающая в дифференциальной форме эффект разбавления очередных долей продуктов сгорания, не содержащей NO ; $r_{NO}^T \frac{dM_{\text{пс}} / d\varphi}{M_{\text{пс}}}$ – составляющая скорости изменения концентрации NO , описывающая процесс образования топливных оксидов азота.

Концентрацию топливных оксидов азота r_{NO}^T можно рассчитать по приближенному математическому выражению, полученному при вышеупомянутых допущениях:

$$\beta = \frac{NO^T}{N_0} = \frac{1}{K_0} \left[1 - \exp\left(-\frac{K_0}{1 + 0,5K_0\beta e^{K_0}} \right) \right], \quad (4.23)$$

где β – безразмерная концентрация оксида азота; K_0 – концентрационно-температурный критерий:

$$K_0 = \frac{K_{-1}N_0}{K_{+2}O_2}, \quad (4.24)$$

в котором K_{-1} и K_{+2} – константы скоростей реакций системы (4.21).

Начальная концентрация атомарного азота равна сумме его выхода из азота топлива и азота воздуха

$$N_0 = \beta_k N_T + C_N \sqrt{N_2}, \quad (4.25)$$

где N_T – возможная концентрация атомарного азота при полном переходе связанного азота топлива в атомарное состояние; β_k – коэффициент конверсии азота топлива в атомарное состояние

$$N_T = 2100 \frac{[N_T]p}{\alpha L_0 RT}, \quad \text{кмоль/м}^3, \quad (4.26)$$

или в объемных долях

$$r_{N_T} = 2,1 \frac{[N_T]}{\alpha L_0}, \quad \text{об. доли.} \quad (4.27)$$

Выше C_N – константа равновесия реакции диссоциации молекулярного азота; p – давление газов, МПа; $[N_T]$ – массовое содержание связанного азота в топливе; α – коэффициент избытка воздуха; L_0 – количество килограммов воздуха, теоретически необходимое для сгорания одного кило-

грамма топлива; R – газовая постоянная, кДж/(кмоль·К); T – температура, К.

При этом концентрацию кислорода и азота в выражениях (4.24) и (4.25) принимают исходя из условия равновесия с учетом высокотемпературной диссоциации продуктов сгорания.

На основе анализа экспериментальных и расчетных данных определена нижняя граница содержания азота в топливе $[N_T] = 0,01$ %, начиная с которой необходимо в расчетах учитывать влияние азота топлива на общую эмиссию NO_x в ДВС.

4.4. Основные положения математической модели результатирующего сажевыделения в дизелях

Обобщенная физико-химическая модель процесса результирующего сажевыделения, основанная на высокотемпературных многостадийных механизмах образования сажистых частиц и их одновременного выгорания реализует «ацетиленовый» механизм, предложенный в [12, 14]. Сам механизм основывается на следующем.

1) Процесс результирующего сажевыделения в дизелях представляет совокупность взаимосвязанных между собой процессов образования и выгорания частиц сажи, каждый из которых протекает по своим особым физико-химическим закономерностям.

2) Процесс образования сажи является результатом протекания цепных реакций термического и окислительного крекинга углеводородов топлива.

3) Сажка образуется в локальных зонах камеры сгорания, когда атомное отношение в реагирующей смеси C/H больше 0,5.

4) Процессы образования и выгорания сажи протекают в различных зонах камеры сгорания. Процесс сажеобразования протекает в зонах термического крекинга топлива, процесс выгорания – в зоне продуктов сгорания.

5) Физико-химической основой механизма начальной стадии образования сажи в дизелях является двухстадийный ацетиленовый механизм П.А. Теснера [29, 30].

6) Процессы окислительного, термического крекинга, механизм начальной стадии сажеобразования, процессы коагуляции и газификации частиц сажи для адекватного описания процесса образования сажи представляются в единой кинетической схеме реакций, так как эти процессы взаимосвязаны и физически протекают в одних и тех же элементах пространства и времени.

7) Скорости реакций процесса образования сажи значительно меньше скоростей реакций окислительного крекинга углеводородов топлива. На основании этого концентрацию исходного сырья для образования сажи – ацетилена можно рассчитывать по условиям динамического равновесия. Для расчета равновесного состава продуктов частичного окисления богатых смесей использован кинетический метод.

8) В математической модели предполагается, что все химические реакции протекают в газовой фазе. Процессы жидкофазного крекинга углеводородов топлива не рассматриваются.

9) В модели принято, что гетерогенные реакции поверхностного роста и выгорания частиц сажи протекают в кинетическом режиме.

10) Процесс коагуляции частиц сажи происходит по механизму броуновской коалесценции [16,28].

11) Процесс выгорания частиц сажи описывается в рамках теории приведенной пленки при негорящем пограничном слое.

12) Процесс термического разложения углеводородов топлива рассматривается в рамках системы кинетических уравнений брутто-реакций, разработанный на основе рассмотрения детальных кинетических радикально-цепных механизмов крекинга исходных и индивидуальных углеводородов топлива.

13) Процессы, происходящие в цилиндре двигателя, баротропны и давление газов в любой точке камеры сгорания одинаково в каждый момент цикла.

14) Считаются заданными индикаторная диаграмма $p(\varphi)$, закон подачи топлива и закон выделения теплоты в единичном цикле $x(\varphi)$.

15) Доля испарившегося топлива рассчитывается по уравнениям испарения единичной капли, трансформированным с учетом особенностей условий испарения всего топливного факела.

16) Располагаемое время процесса образования сажи рассматривается как время между кривыми испарившегося и выгоревшего топлива.

17) Средняя температура газов в цилиндре дизеля определяется по уравнению состояния.

18) Текущее значение температуры воздуха T_v , не участвующего в сгорании топлива, рассчитываются по уравнению адиабаты.

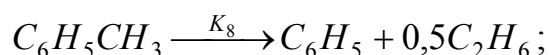
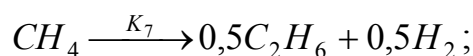
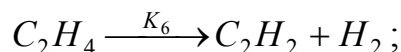
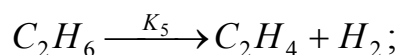
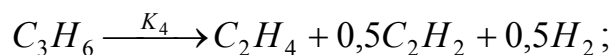
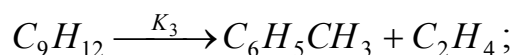
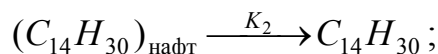
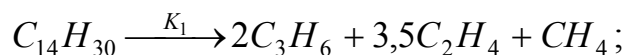
19) Температура продуктов сгорания $T_{пс}$ определяется для каждого момента цикла из уравнения баланса энтальпий с учетом потерь теплоты на недогорание топлива, диссоциацию продуктов сгорания и радиационных тепловых потерь из зоны реакции.

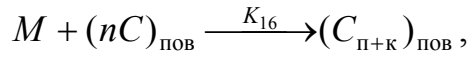
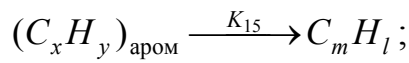
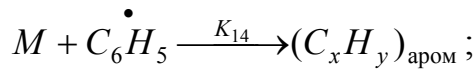
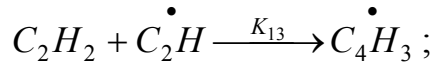
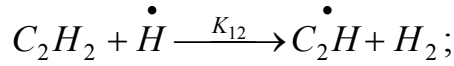
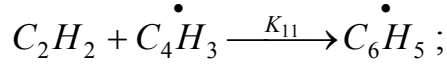
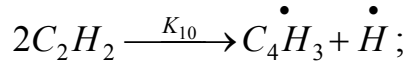
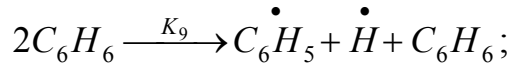
20) В качестве определяющей температуры процесса образования сажи принята средняя интегральная температура фронта пламени усредненная в границах $T = T_v - T_{пс}$ по константе скорости гетерогенного процесса поверхностного роста частиц сажи при линейном профиле температур по фронту пламени.

В качестве определяющей температуры процесса выгорания сажи принята среднемассовая температура пламени.

21) Взаимосвязь процессов массообмена и химического взаимодействия реагирующих веществ устанавливается с использованием математического аппарата совокупности неравновесных реакторов идеального смешения.

Физический механизм образования сажи в дизеле описывается следующей общей системой химических уравнений:





где M – молекулы C_2H_2 , полиароматических углеводородов или радикалов $C_2\dot{H}$, $C_4\dot{H}_3$, $C_6\dot{H}_5$; $K_1 \dots K_{16}$ – кинетические коэффициенты реакции.

При математическом описании процесса образования сажи полагается, что образование сажистых частиц при термическом разложении топлива происходит независимо от процесса их выгорания. Для установления связи между этими двумя процессами между собой и с параметрами рабочего процесса, используется дифференциальное уравнение, отражающее изменение числа молей компонентов газовой смеси в зонах термического крекинга в виде:

$$\frac{dM_i}{dt} = \left(\frac{dM_i}{dt} \right)_{\sigma} + \left(\frac{dM_i}{dt} \right)_{k} - \left(\frac{dM_i}{dt} \right)_{x}, \quad (4.28)$$

где $\left(\frac{dM_i}{dt} \right)_{\sigma}$ – подвод массы компонента с испаренным топливом; $\left(\frac{dM_i}{dt} \right)_{k}$

– изменение массы компонента в результате химического преобразования;

$\left(\frac{dM_i}{dt} \right)_{x}$ – изменение массы компонента в результате горения топлива (вы-

вода вещества из зоны пиролиза на линии активного тепловыделения).

Индекс i у компонента массы M обозначает различные углеводороды согласно таблице 4.5:

Таблица 4.5. принятое индексирование углеводородов

Номер компонента	1	2	3	4	5	6	7	8
Формула углеводорода	$C_{14}H_{30}$	$(C_{14}H_{30})_{\text{наф}}$	C_9H_{12}	C_3H_6	C_2H_4	CH_4	$C_6H_5CH_3$	C_2H_2
Номер компонента	9	10	11	12	13	14	15	16
Формула углеводорода	H_2	C_2H_6	C_2H	H	C_4H_3	C_6H_5	C_6H_6	M

Результирующее сажевыделение в цилиндре двигателя представляется в виде суммы составляющих, характеризующих образование и выгорание сажи:

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_{\Sigma} = \left(\frac{dN}{dt}\right)_{\text{обр}} - \left(\frac{dN}{dt}\right)_{\text{выг}}. \quad (4.29)$$

Полная система дифференциальных уравнений, описывающая процесс сажевыделения, записывается в виде:

$$\frac{dM_1}{d\varphi} = M_{1\text{н}} \frac{d\sigma}{d\varphi} + (C_2 - C_1) \frac{V}{6n} - M_1 A;$$

$$\frac{dM_2}{d\varphi} = M_{2\text{н}} \frac{d\sigma}{d\varphi} - C_2 \frac{V}{6n} - M_2 A;$$

$$\frac{dM_3}{d\varphi} = M_{3\text{н}} \frac{d\sigma}{d\varphi} - C_3 \frac{V}{6n} - M_3 A;$$

$$\frac{dM_4}{d\varphi} = (2C_1 - C_4) \frac{V}{6n} - M_4 A;$$

$$\frac{dM_5}{d\varphi} = (3,5C_1 + C_3 + C_4 + C_5 - C_6) \frac{V}{6n} - M_5 A;$$

$$\frac{dM_6}{d\varphi} = (C_1 - C_7) \frac{V}{6n} - M_6 A;$$

$$\frac{dM_7}{d\varphi} = M_{7\text{н}} \frac{d\sigma}{d\varphi} + (C_3 - C_8) \frac{V}{6n} - M_7 A;$$

$$\frac{dM_8}{d\varphi} = \frac{(0,5C_4 + C_6 - 2C_{10} - C_{11} - C_{12} - C_{13})V - C_n/24}{6n} - M_8 A;$$

$$\frac{dM_9}{d\varphi} = \frac{(0,5C_4 + C_5 + C_6 + 0,5C_7 + C_{12})V + C_n/24}{6n} - M_9 A;$$

$$\frac{dM_{10}}{d\varphi} = \frac{(0,5C_7 - C_5)V}{6n} - M_{10} A;$$

$$\frac{dM_{11}}{d\varphi} = \frac{(C_{12} - C_{13})V}{6n} - M_{11} A;$$

$$\frac{dM_{12}}{d\varphi} = \frac{(C_9 + C_{10} - C_{12})V}{6n} - M_{12} A;$$

$$\frac{dM_{13}}{d\varphi} = \frac{(C_{10} + C_{13} - C_{11})V}{6n} - M_{13} A;$$

$$\frac{dM_{14}}{d\varphi} = \frac{(C_8 + C_9 + C_{11})V}{6n} - M_{14} A;$$

$$\frac{dM_{15}}{d\varphi} = M_{15H} \frac{d\sigma}{d\varphi} - C_9 \frac{V}{6n} - M_{15} A;$$

$$\frac{dM_{16}}{d\varphi} = M_{16H} \frac{d\sigma}{d\varphi} - M_{16} A;$$

$$\frac{dN_{\text{обр}}}{d\varphi} = N_H \frac{\alpha_{\text{сг}}}{\alpha} \frac{d\sigma}{d\varphi} + \frac{(C_8 + C_9 + C_{11})V + C_n}{6n} - N_{\text{обр}};$$

$$\frac{dN_{\text{выг}}}{d\varphi} = N_H \frac{\alpha - \alpha_{\text{сг}}}{\alpha} \frac{d\sigma}{d\varphi} - N_{\text{выг}} S_{\text{уд}} j_c + N_{\text{обр}} A,$$

где $A = \frac{dx/d\varphi}{\sigma - x}$; $\frac{dx}{d\varphi}$ – скорость тепловыделения, x – доля выделившейся те-

плоты; σ – доля поданного топлива.

Скорости реакций $C_1 \dots C_{13}$ определяются по выражениям:

$$C_i = K_i R_i,$$

где $i=1 \dots 8$; K_i – кинетические константы реакций, R_i – объемные доли компонентов: $R_i = M_i/V$; остальные скорости реакций определяются как

$$C_9 = K_9 R_{15}^2; C_{10} = K_{10} R_8^2; C_{11} = K_{11} R_8 R_{15}; C_{12} = K_{12} R_8 R_{12}; C_{13} = K_{13} R_8 R_{11}.$$

Объем зоны пиролиза топлива V определяется по соотношению:

$$V = \frac{RTM_{\Sigma}}{p}, \quad \text{где } M_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N M_i.$$

Скорость реакции поверхностного роста C_n определяется уравнением:

$$C_n = 17,1 \cdot 10^3 \left(1 - k \frac{br_9 P}{1 + br_9 P} \right) e^{-13000/RT} S_{уд} N_{обп} r_8 P.$$

Объемные доли ацетилена r_8 и водорода r_9 определяются соотношением:

$$r_8 = M_8 / \sum_{i=1}^N M_i; \quad r_9 = M_9 / \sum_{i=1}^N M_i$$

Начальное содержание сажи в цилиндре на момент начала сгорания назначается равным количеству сажи, содержащемуся в камере сгорания в остаточных продуктах сгорания:

$$N_n = \gamma_r G_B C_d;$$

где γ_r – коэффициент остаточных газов, G_B – масса воздуха в цилиндре, C_d – концентрация сажи в отработавших газах.

Кинетические коэффициенты реакций K_i определяются по выражениям:

$$K_1 = p \cdot 10^{-10} e^{-301000/RT};$$

$$K_2 = 10^{13} e^{-473000/RT};$$

$$K_3 = 1,17 \cdot 10^{11} e^{-234000/RT};$$

$$K_4 = p \cdot 10^{-10} e^{-10500/RT};$$

$$K_5 = 10^{-12} e^{-75000/RT};$$

$$K_6 = p \cdot 10^{-10} e^{-78000/RT}.$$

Представленная выше система нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка решается численным образом. Интегрирование построено с использованием высокоустойчивого метода Рунге-Кутты 4-го порядка.

По результатам интегрирования, на момент открытия выпускного клапана двигателя, определяется величина суммарного сажевыделения N_Σ . По этой величине определяется уровень дымности отработавших газов на выхлопе двигателя:

$$C_d = \frac{N_\Sigma g_T}{V_B}, \quad (4.30)$$

где g_T – цикловая подача топлива, V_B – расход воздуха на режиме.

4.5. Математическая модель выбросов оксидов углерода и серы

Как указывалось выше, состав ОГ по составляющим CO_2 , H_2O , CO , SO_2 может быть получен из известных соотношений термохимического расчета рабочего тела в цилиндре двигателя, приведенного в параграфе 2.4.2. Однако, зависимости (2.29) и (2.30) должны быть несколько модифицированы, исходя из того, что реальный выброс CO (по газоанализатору) при использовании богатых топливовоздушных смесей несколько выше, чем дает классическая методика расчета, а для бедных смесей выброс CO не нулевой. Кроме этого, в ОГ имеется остаточный кислород даже при работе на смесях с $\alpha < 1$.

С учетом сказанного, мольное содержание компонентов продуктов сгорания при коэффициенте избытка воздуха $\alpha < 1$ будем рассчитывать так:

$$\begin{aligned}M_{CO} &= \frac{0,42(1-\alpha)l_0}{1+S_k} + 0,004C; \\M_{CO_2} &= C/12 - M_{CO}; \\M_{H_2} &= S_k M_{CO}; \\M_{H_2O} &= 0,5H - M_{H_2}; \\M_{O_2} &= 0,002\alpha - 0,001.\end{aligned}\tag{4.31}$$

Мольное содержание компонентов продуктов сгорания при $\alpha \geq 1$:

$$\begin{aligned}M_{CO} &= (0,0183908 - 0,0143678\alpha)C \text{ при } \alpha \leq 1,2; \\M_{CO} &= (0,0073563 - 0,0051724\alpha)C \text{ при } \alpha > 1,2; \\M_{CO} &= (0,000356322 - 0,000172414\alpha)C \text{ при } \alpha > 1,4; \\M_{CO} &= (0,0000140804 - 0,0000012931\alpha)C \text{ при } \alpha > 2,0; \\M_{CO_2} &= C/12 - M_{CO}; \\M_{H_2} &= 0; \\M_{H_2O} &= 0,5H; \\M_{O_2} &= 0,21(\alpha - 1)l_0,\end{aligned}\tag{4.32}$$

Для любого состава ТВС остается:

$$M_{N_2} = 0,79\alpha l_0.\tag{4.33}$$

Кроме этого, считая, что вся сера, находящаяся в топливе в связанном виде, будет окислена до SO_2 :

$$M_{SO_2} = S/32. \quad (4.34)$$

В зависимостях (2.31-2.34): l_0 – мольное стехиометрическое соотношение для используемого топлива; C, H, S – удельное содержание углерода и водорода и серы в топливе; α – коэффициент избытка воздуха; S_k – эмпирический коэффициент ($\approx 0,5$).

Суммарное количество продуктов сгорания, кмоль/кг топлива:

$$M_{\text{пс}} = M_{N_2} + M_{O_2} + M_{H_2O} + M_{CO_2} + M_{H_2} + M_{CO} + M_{SO_2}. \quad (4.35)$$

Объемная доля каждого компонента ОГ в чистых продуктах сгорания (ЧПС):

$$v_i = M_i / M_{\text{пс}}. \quad (4.36)$$

Массовая доля каждого компонента ОГ в ЧПС:

$$m_i = \mu_i v_i / \sum_{i=1}^7 \mu_i v_i, \quad (4.37)$$

где μ_i – молярная масса i -того компонента ОГ, которых всего 7, в соответствии с (4.35).

Далее необходимо учесть факт продувки цилиндра двигателя свежим воздухом, т.е. количество азота и кислорода в выходящих из двигателя ОГ должно быть увеличено:

$$\begin{aligned} M_{N_2}^{\text{ОГ}} &= M_{N_2}^{\text{ЧПС}} + 0,79\alpha l_0 (\eta_p - 1); \\ M_{O_2}^{\text{ОГ}} &= M_{O_2}^{\text{ЧПС}} + 0,21\alpha l_0 (\eta_p - 1), \end{aligned} \quad (4.38)$$

где η_p – коэффициент продувки, в случае, если он больше единицы.

После подсчета суммарного количества ОГ по зависимости (4.35) необходимо определить объемные и массовые доли компонентов ОГ по зависимостям (4.36) и (4.37).

Определив состав выходящих из двигателя газов, можно приступить к определению параметров токсичности ОГ по компонентам CO_2, H_2O, CO, SO_2 , воспользовавшись полученными в расчете рабочего процесса данными по объемному (при нормальных условиях) и массовому расходам ОГ.

На этом же этапе к токсичным компонентам ОГ добавляются выбросы несгоревших углеводородов, методика расчета которых рассматривается в следующем параграфе.

Таким образом, объемные выбросы токсичных компонентов ОГ определяются путем умножения объемного расхода ОГ на объемную долю i -того токсичного компонента и выражается в $\text{м}^3/\text{ч}$. Массовый выброс токсичных компонентов ОГ определяются путем умножения массового расхода ОГ на массовую долю i -того токсичного компонента и выражается в $\text{кг}/\text{ч}$. Для определения удельного выброса каждого токсичного компонента ОГ в $\text{кг}/\text{кВт}\cdot\text{ч}$, его массовый выброс должен быть отнесен к эффективной мощности двигателя.

Для определения «показаний газоанализатора», необходимо «осушить» ОГ, т.е. исключить из отходящих газов воду, которая действительно удаляется из ОГ при подаче их в измерительную систему газоанализатора. Объемный состав ОГ при этом необходимо пересчитать по (4.35) и (4.36) при отсутствии воды. Объемное содержание токсичных компонентов в ОГ представляется либо в % об., либо в *ppm*.

4.6. Модель выбросов несгоревших углеводородов

Одной из наиболее опасных токсических компонент отработавших газов двигателя внутреннего сгорания являются остаточные углеводороды C_nH_m или просто $СН$. Эти соединения вызывают тяжелые заболевания, оказывают отравляющее и наркотическое воздействие на живые организмы. Остаточные углеводороды являются носителями канцерогенов, приводящих к развитию онкологических заболеваний.

По своей структуре компоненты $СН$ являются углеводородами широкого спектра состава, с преобладанием алифатических (метан, этан, бутан и т.п.) и ароматических (бензол, толуол, ксилол, нафталины и т.п.). Всего в структуре отработавших газов насчитывается более 200 видов остаточных углеводородов [18].

Природа образования остаточных углеводородов в отработавших газах ДВС достаточно сложна и многообразна. Они являются продуктами как неполного сгорания топлива, так и моторного масла. Очевидно, что

при неограниченном времени сгорания, идеальном смесеобразовании и достаточном количестве окислителя конечными продуктами сгорания в двигателях являлись бы углекислый газ CO_2 и вода H_2O , Остаточные углеводороды при этом в составе ОГ отсутствовали бы. Однако в реальных условиях, когда время сгорания ограничено, влияние этого фактора увеличивается по мере роста частоты вращения коленчатого вала. Смесеобразование не является идеальным – топливовоздушная смесь в общем случае является гетерогенной. В цилиндре имеются различные зоны, которые существенно различаются скоростью выгорания топлива – объемная и пристеночная. Следствием этих факторов и является неполное сгорание топлива, а испарение масляной пленки с зеркала цилиндра является источником появления в ОГ несгоревших остатков моторного масла.

Для современных четырехтактных бензиновых и дизельных двигателей, как правило, накладываются жесткие ограничения по расходу масла на угар, и для них доля масляных составляющих $СН$ пренебрежимо мала по сравнению с топливными. Однако, для двухтактных малооборотных дизелей с лубрикаторной системой смазывания ЦПГ, расход масла достаточно высок, и в этом случае неучтенная масляная составляющая остаточных углеводородов может привести к существенному занижению степени экологической опасности отработавших газов.

Механизмы образования топливной составляющей остаточных углеводородов имеют различную природу.

Во-первых, к образованию $СН$ приводит неэффективное сгорание части топливовоздушной смеси в пристеночной зоне цилиндра. В этой зоне наблюдается затухание цепных реакций горения топлива за счет контакта активных центров со стенками. Скорость сгорания падает, и к моменту открытия выпускных клапанов достаточно значимая доля топлива не успевает сгореть.

Во-вторых, к образованию остаточных углеводородов приводит нарушения гомогенности топливовоздушной смеси из-за неидеальных условий смесеобразования. Из-за этого даже в процессе сгорания определенная доля топлива в смеси находится в жидкой фазе. Для ее выгорания требуется прогрев и испарение, что требует дополнительного времени. Особенно данная составляющая топливных $СН$ заметна на режимах холостого хода и

малых нагрузок, в первую очередь для бензиновых двигателей. Для дизельных ДВС на режимах малых нагрузок она менее выражена, но также присутствует, что объясняется ухудшением качества смесеобразования при малых цикловых подачах, характерных для этих режимов.

В-третьих, к образованию топливных *СН* приводит недостаток окислителя в зонах обогащенных топливовоздушных смесей. Это также более выражено для двигателей с внешним смесеобразованием с искровым зажиганием, однако и для дизелей такие зоны могут образовываться в непосредственной окрестности топливного факела.

В-четвертых, к образованию определенной доли топливных остаточных углеводородов приводит накопление в зазорах между поршнем и цилиндром определенного количества топливовоздушной смеси, нагнетаемой туда на такте сжатия. Примерно на полуходе поршня на такте сгорания-расширения, давление в этом зазоре становится больше, чем в камере сгорания, и эта часть топливовоздушной смеси начинает поступать в цилиндр двигателя. При этом времени для ее выгорания уже практически не остается, и она почти полностью переходит в остаточные углеводороды ОГ.

Очевидно, что динамика образования остаточных углеводородов по описанным механизмам чрезвычайно сложна и зависит от множества факторов, основными из которых являются:

- углеводородный состав топлива и моторного масла, их физико-химические свойства;
- организация рабочего процесса, тип и форма камеры сгорания;
- скоростной и нагрузочный режимы работы двигателя;
- температурное состояние двигателя;
- особенности и качество процесса смесеобразования;
- закон подачи топлива в цилиндр двигателя;
- конструкция, величины рабочих зазоров и техническое состояние ЦПГ, в первую очередь – системы кольцевого уплотнения;
- регулировочные показатели двигателя – угол опережения впрыска или зажигания, фазы газораспределения.

Следует отметить, что в настоящее время общепринятой модели образования остаточных углеводородов по всем вышеописанным механизмам не существует. Поэтому в разработанной авторами модели для расчета

итогового содержания в отработавших газах остаточных углеводородов используются эмпирические зависимости, полученные на базе обработки многочисленных экспериментальных данных, полученных в ходе проводимых в последние 20 лет исследований в лаборатории ДВС СПбПУ с использованием современного газоаналитического оборудования.

Ниже приведены использованные в программном комплексе зависимости для расчета концентраций (*ppm*) остаточных углеводородов топливной и масляной группы для различных типов ДВС (бензиновых, газовых, дизельных с различными типами камер сгорания).

Бензиновый двигатель.

Для расчета концентрации остаточных углеводородов в бензиновом двигателе внешнего смесеобразования на режиме с частотой вращения коленчатого вала *n*, об/мин при нагрузке *Me*, Н·м, используется формула:

$$\begin{aligned}
 CH &= CH_0 \times \\
 &\times (2,648 - 14,758n_{отн} + 46,668n_{отн}^2 + 54,827n_{отн}^3 + 21,257n_{отн}^4) \times \quad (4.39) \\
 &\times (0,854 - 3,124Me_{отн} + 14,403Me_{отн}^2 - 22,595Me_{отн}^3 + 11,458Me_{отн}^4),
 \end{aligned}$$

где $n_{отн} = n/n_0$, $Me_{отн} = Me/Me_0$, $CH_0 = (100...150) ppm$, n_0 , Me_0 , CH_0 – соответственно, частота вращения коленчатого вала, эффективный крутящий момент и содержание остаточных углеводородов на номинальном (базовом) режиме работы двигателя.

Зависимость действительна для следующих диапазонов изменения режима работы:

- по частоте вращения коленчатого вала – 600...6500 об/мин;
- по удельной мощности – 0...70 кВт/л;
- состав смеси – стехиометрический.

Для определения концентрации CH_0 в зависимости от регулировки двигателя по составу смеси:

$$CH_0(\alpha) = CH_0(\alpha = 1) \times (7,997 - 14,337\alpha + 7,760\alpha^2 + 0,427\alpha^3), \quad (4.40)$$

где α – величина коэффициента избытка воздуха, расчетный диапазон изменения $\alpha = 0,6...1,3$.

Дизельный двигатель.

Для дизельных двигателей для определения содержания CH в отработавших газах на режиме с частотой вращения коленчатого вала n , об/мин при нагрузке Me , Н·м, используется следующая формула:

$$CH = CH_0 \times (0,254 + 2,939n_{отн} - 6,502n_{отн}^2 + 6,456n_{отн}^3 - 2,147n_{отн}^4) \times (0,730 + 0,387Me_{отн} - 1,385Me_{отн}^2 + 2,049Me_{отн}^3 - 0,781Me_{отн}^4), \quad (4.41)$$

где $CH_0 = (10 \dots 30)$ ppm.

Зависимость действительна для следующих диапазонов изменения режима работы:

- по частоте вращения коленчатого вала – 80...2200 об/мин;
- по удельной мощности – 0...60 кВт/л.

Ориентировочные зависимости для разных камер сгорания в зависимости от состава смеси:

а) открытая камера сгорания для диапазона изменения $\alpha = 1,4 \dots 6,0$:

$$CH_0(\alpha) = CH_0(\alpha_6) \times (4,129 - 4,856\alpha_{отн} + 2,168\alpha_{отн}^2 - 0,326\alpha_{отн}^3), \quad (4.42)$$

где $\alpha_{отн} = \alpha/\alpha_6$, $CH_0(\alpha_6) = 11$ ppm, $\alpha_6 = 2,0$.

б) Полуразделенная камера сгорания, $\alpha = 1,2 \dots 6,0$:

$$CH_0(\alpha) = CH_0(\alpha_6) \times (10,848 - 23,806\alpha_{отн} + 20,743\alpha_{отн}^2 - 7,914\alpha_{отн}^3 + 1,103\alpha_{отн}^4), \quad (4.43)$$

где $CH_0(\alpha_6) = 18$ ppm, $\alpha_6 = 1,8$.

Газовый двигатель.

Для газовых двигателей с искровым зажиганием, работающих на разных газомоторных топливах (природном газе, сжиженной пропан-бутановой смеси) для определения содержания остаточных углеводородов

в отработавших газах на режиме с частотой вращения коленчатого вала n , об/мин при нагрузке Me , Н·м, используется следующая формула:

$$\begin{aligned}
 CH &= CH_0 \times \\
 &\times (1,996 - 7,474n_{\text{отн}} + 24,433n_{\text{отн}}^2 - 29,228n_{\text{отн}}^3 + 11,270n_{\text{отн}}^4) \times \\
 &\times (1,153 + 0,528Me_{\text{отн}} - 5,826Me_{\text{отн}}^2 + 9,288Me_{\text{отн}}^3 - 4,141Me_{\text{отн}}^4),
 \end{aligned} \quad (4.44)$$

где $CH_0 = (100 \dots 150)$ ppm.

Зависимость действительна для следующих диапазонов изменения режима работы:

- по частоте вращения коленчатого вала – 150...5500 об/мин;
- по удельной мощности – 0...70 кВт/л.

Зависимость CH_0 от состава смеси в зависимости от вида газомоторного топлива:

- а) для метана в диапазоне изменения $\alpha = 0,8 \dots 1,5$:

$$CH_0(\alpha) = CH_0(\alpha_6) \times (27,993 - 43,615\alpha_{\text{отн}} + 6,634\alpha_{\text{отн}}^2 + 9,891\alpha_{\text{отн}}^3), \quad (4.45)$$

где $CH_0(\alpha_6) = 65 \dots 70$ ppm, $\alpha_6 = 1,15$.

- б) для пропан-бутановых смесей в диапазоне изменения $\alpha = 0,5 \dots 1,5$:

$$CH_0(\alpha) = CH_0(\alpha_6) \times (5,142 - 7,313\alpha_{\text{отн}} + 2,228\alpha_{\text{отн}}^2 + 0,927\alpha_{\text{отн}}^3), \quad (4.46)$$

где $CH_0(\alpha_6) = 160 \dots 170$ ppm, $\alpha_6 = 1,05$.

Масляная составляющая остаточных углеводородов.

Величина масляной компоненты остаточных углеводородов принимается пропорциональной величине расхода масла на угар. Для этого в расчет вводится расход масла на угар (в % к расходу топлива) на номинальном режиме $g_{\text{мн}}$. Рассчитывается расход масла на рассчитываемом режиме при частоте вращения коленчатого вала n по формуле:

$$g_{\text{м}}(n) = g_{\text{мн}} \times (0,020 + 0,503n_{\text{отн}} - 0,113n_{\text{отн}}^2 + 0,590n_{\text{отн}}^3), \quad (4.47)$$

тогда $CH_{\text{м}} = CH_0 \cdot g_{\text{м}}(n) \cdot K_{\text{м}} / 100$, где $K_{\text{м}} = 8 \dots 10$.

4.7. Примеры расчета токсичности выхлопа ДВС

Описанные выше методики расчета параметров токсичности ОГ двигателей, реализованы в виде расчетного блока в программе расчета рабочего процесса и отдельных программ расчета выбросов оксидов азота и результирующего сажевыделения, написанных на языке Microsoft Fortran (MS Fortran Power Station), работающих в среде DOS и Windows.

Для расчета выбросов оксидов азота используется индикаторная диаграмма, рассчитанная в программе расчета рабочего процесса двигателя. Других исходных данных для работы программы не требуется.

Для расчета результирующего сажевыделения, помимо индикаторной диаграммы, требуются дополнительные исходные данные, подготавливаемые и записываемые при помощи препроцессора. Список необходимых исходных данных приводится ниже.

В конце работы программы расчета токсичности выгружают текстовые протоколы и файлы для вывода графической информации.

Далее приводятся примеры расчета токсичности ОГ различных двигателей и комментарии к ним.

4.7.1. Быстроходный четырехтактный бензиновый двигатель

Для примера расчета использованы данные рабочего процесса впрыскового бензинового двигателя ВАЗ-2111, см. параграф 3.2.1. Для данного двигателя рассчитывается только содержание в ОГ оксидов азота, поскольку считается, что при гомогенном смесеобразовании сажистых частиц не образуется. Все исходные данные, используемые программой расчета выбросов оксидов азота находятся в файле Ind001.dat и приведены в таблице 3.3 в параграфе 3.2.1.

При выполнении расчета программа выгружает файл протокола расчета NOx001.txt, где 001 – номер варианта расчета, имеющийся в файле индикаторной диаграммы и файл eNO001.dat, содержащий информацию для построения графиков. Содержимое файлов приведено ниже, график изменения концентрации оксидов азота приведен на рис. 4.4.

Содержимое файла протокола расчета NOx001.txt

VAZ - 2111. Nominal. N=5600

*** Variant 001 ***

Расчет процесса образования оксидов азота в цилиндре двигателя

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

D= .082, S= .071 [м];	Lamda= .2840	Степень сжатия = 10.50
Ne= 62.7 [кВт]	Цилл = 4 Такт= 4.	N= 5600.0 [1/мин]
Gt= 4.48 [кг/ч]	Gc= .2667E-04 [кг]	Gr= .0497 Prod= 1.000
Fi нач.стоп.= -15.00	Pa= .1208 [МПа]	Ta= 395.9 [K] Fia= -125.0
Alfa ср.= .920	Alfa сум.= .920	CNOx0= 2000.0 [мг/м.куб.]
Fi нач.табл.= -20.0	DfiT шаг табл.= 5.00	Шаг печати = 5.0 JT= 25
C= .845 H= .135	O= .020 N= .00000	Qh= 43000.0 Mu= 105.0

FI	P	T	X	FI	P	T	X
-20.00	1.65	823.33	.0000	-15.00	1.94	856.67	.0010
-10.00	2.26	903.07	.0062	-5.00	2.81	2696.15	.0452
.00	3.75	2839.70	.1391	5.00	4.90	2929.78	.2915
10.00	5.82	2970.91	.4814	15.00	6.18	2969.36	.6703
20.00	5.95	2927.70	.8209	25.00	5.34	2865.42	.9167
30.00	4.58	2783.88	.9646	35.00	3.85	2693.98	.9831
40.00	3.22	2601.74	.9886	45.00	2.71	2514.13	.9898
50.00	2.30	2429.75	.9900	55.00	1.97	2355.47	.9900
60.00	1.71	2274.38	.9900	65.00	1.50	2204.13	.9900
70.00	1.32	2140.84	.9900	75.00	1.18	2095.39	.9900
80.00	1.06	2043.22	.9900	85.00	.96	1995.85	.9900
90.00	.88	1953.09	.9900	95.00	.81	1914.38	.9900

M0= .4931 [кмоль/кг]	L0= 14.28 [кг/кг]	Va= .3526E-03 [м.куб]
MA= PA*VA/(R*TA) = .3748E-03 [кг/цикл]	Alд=MA/(L0*QC) = .938	

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Идентификация результатов расчета:

FI- угол поворота коленчатого вала, град. п.к.в.
 RNOравн- равновесная концентрация NO в зоне ПС, об. доля
 RNO- текущая объемная концентрация NO в зоне ПС, об. доля
 DRNO- скорость изменения концентрации NO в зоне ПС, об. доля/град. п.к.в.
 RNOCR- средняя объемная концентрация NO в цилиндре, об. доля
 RNOOB- средняя массовая концентрация NO в цилиндре, г/м.куб.
 GNO1- относительная масса NO, г NO/кг топлива
 GNO- массовое содержание NO в цилиндре, мг/цикл

FI	RNOравн	RNO	DRNO	RNOCR	RNOOB	GNO1	GNO
-10.0	.1228E-05	.0000E+00	.0000E+00	.4580E-04	.421	.681	.02
-5.0	.1138E-05	.4231E-05	.5077E-05	.4416E-04	.435	.659	.02
.0	.3875E-02	.1710E-02	.2411E-03	.2828E-03	2.870	4.247	.11
5.0	.5977E-02	.4509E-02	.3659E-03	.1367E-02	13.722	20.780	.55
10.0	.7356E-02	.6698E-02	.1969E-03	.3256E-02	31.100	50.289	1.34
16.3	.7931E-02	.7525E-02	-.1553E-05	.5295E-02	45.293	83.305	2.22
20.0	.7645E-02	.7308E-02	.9649E-05	.5868E-02	46.028	93.028	2.48
27.5	.6986E-02	.6768E-02	-.1745E-04	.6194E-02	39.785	98.994	2.64
32.5	.5327E-02	.5675E-02	-.7333E-04	.5349E-02	29.743	85.392	2.28
37.5	.4080E-02	.4943E-02	-.7222E-04	.4704E-02	22.676	74.958	2.00

42.5	.2945E-02	.4469E-02	-.5700E-04	.4264E-02	17.903	67.797	1.81
47.5	.2028E-02	.4188E-02	-.3679E-04	.3997E-02	14.720	63.436	1.69
52.5	.1000E-11	.4188E-02	-.1556E-07	.3994E-02	12.785	62.226	1.66
57.5	.8616E-03	.4097E-02	-.1251E-04	.3910E-02	11.353	61.914	1.65
62.5	.5255E-03	.4052E-02	-.6345E-05	.3867E-02	10.093	61.190	1.63
67.5	.3032E-03	.4029E-02	-.3234E-05	.3845E-02	9.095	60.823	1.62
72.5	.1000E-11	.4029E-02	-.3129E-11	.3842E-02	8.177	59.868	1.60
77.5	.1153E-03	.4022E-02	-.1020E-05	.3839E-02	7.626	60.701	1.62
82.5	.7619E-04	.4018E-02	-.5586E-06	.3835E-02	7.056	60.641	1.62
87.5	.4702E-04	.4016E-02	-.3123E-06	.3833E-02	6.573	60.607	1.62
92.5	.3025E-04	.4015E-02	-.1826E-06	.3832E-02	6.161	60.587	1.62
97.5	.1981E-04	.4015E-02	-.1051E-06	.3832E-02	5.808	60.576	1.62
102.5	.1331E-04	.4014E-02	-.7700E-07	.3831E-02	5.505	60.569	1.62

Число делений пополам(+) или удвоений(-) нач. шага интегрирования: IHFL= -3

Технико-гигиенические характеристики двигателя

Концентрация NO во влажных продуктах сгорания 857.2 ppm

1. Концентрация оксидов азота на выхлопе, % объемн. RNO= .08572
в пересчете на NO2 и N2O5: RNOX= .08588, RN2O5= .04306
то же в мг/норм.м.куб. CNO= 1148.6 в пересчете на NO2 и N2O5
CNOX= 1760.5 CN2O5= 2075.9

Концентрация NO в сухих продуктах сгорания 984.4 ppm

1. Концентрация оксидов азота на выхлопе, % объемн. RNO= .09844
в пересчете на NO2 и N2O5: RNOX= .09862, RN2O5= .04945
то же в мг/норм.м.куб. CNO= 1319.1 в пересчете на NO2 и N2O5
CNOX= 2021.8 CN2O5= 2384.1
2. Выделение NO, [г/час] ENO= .248E+03
в пересчете на NO2 ENOX= .380E+03
3. Выделение NO, [мг/(цикл*цилиндр)] GNO= .37
4. Удельное выделение, [г/(кВт.ч)] EUNO= 3.95 EUNOX= 6.06
5. Относит. выделение, [г/(кг топлива)] E1NO= 13.8 E1NOX= 21.2
6. Нормообъем, [м.куб/ч] VNO= .362E+05
7. Удельный нормообъем [м.куб/(кВт.ч)] UVNO= .577E+03
8. Индекс концентрации NO, ИКР= .383E+02
9. Удельное выделение NO, приведенное к CO, [г/(кВт.ч)] QE= 2.64
10. Часовые выделения отработавших газов:
(влажные ПС) - Volг= .2156E+03 [н.м.куб] Gог= .2742E+03 [кг]
(сухие ПС) - Volг= .1882E+03 [н.м.куб] Gог= .2522E+03 [кг].

Конец варианта

Содержимое файла графической информации eNO001.dat

-10.00	.1228E-05	.0000E+00	.0000E+00	.4580E-04	.421	.681	.02
-5.00	.1138E-05	.4231E-05	.5077E-05	.4416E-04	.435	.659	.02
.00	.3875E-02	.1710E-02	.2411E-03	.2828E-03	2.870	4.247	.11
5.00	.5977E-02	.4509E-02	.3659E-03	.1367E-02	13.722	20.780	.55
10.00	.7356E-02	.6698E-02	.1969E-03	.3256E-02	31.100	50.289	1.34
16.25	.7931E-02	.7525E-02	-.1553E-05	.5295E-02	45.293	83.305	2.22
20.00	.7645E-02	.7308E-02	.9649E-05	.5868E-02	46.028	93.028	2.48
27.50	.6986E-02	.6768E-02	-.1745E-04	.6194E-02	39.785	98.994	2.64
32.50	.5327E-02	.5675E-02	-.7333E-04	.5349E-02	29.743	85.392	2.28
37.50	.4080E-02	.4943E-02	-.7222E-04	.4704E-02	22.676	74.958	2.00

42.50	.2945E-02	.4469E-02	-.5700E-04	.4264E-02	17.903	67.797	1.81
47.50	.2028E-02	.4188E-02	-.3679E-04	.3997E-02	14.720	63.436	1.69
52.50	.1000E-11	.4188E-02	-.1556E-07	.3994E-02	12.785	62.226	1.66
57.50	.8616E-03	.4097E-02	-.1251E-04	.3910E-02	11.353	61.914	1.65
62.50	.5255E-03	.4052E-02	-.6345E-05	.3867E-02	10.093	61.190	1.63
67.50	.3032E-03	.4029E-02	-.3234E-05	.3845E-02	9.095	60.823	1.62
72.50	.1000E-11	.4029E-02	-.3129E-11	.3842E-02	8.177	59.868	1.60
77.50	.1153E-03	.4022E-02	-.1020E-05	.3839E-02	7.626	60.701	1.62
82.50	.7619E-04	.4018E-02	-.5586E-06	.3835E-02	7.056	60.641	1.62
87.50	.4702E-04	.4016E-02	-.3123E-06	.3833E-02	6.573	60.607	1.62
92.50	.3025E-04	.4015E-02	-.1826E-06	.3832E-02	6.161	60.587	1.62
97.50	.1981E-04	.4015E-02	-.1051E-06	.3832E-02	5.808	60.576	1.62
102.50	.1331E-04	.4014E-02	-.7700E-07	.3831E-02	5.505	60.569	1.62

Fi	RNOrv	RNO	DRNO	RNOCR	RNOOB	GNO1	GNO
"rpm	vol.part	vol.part	vol.part/"rpm	vol.part	g/m ³	gNO/kgF	mg/cykle
1	1	1	1	1	1	1	1

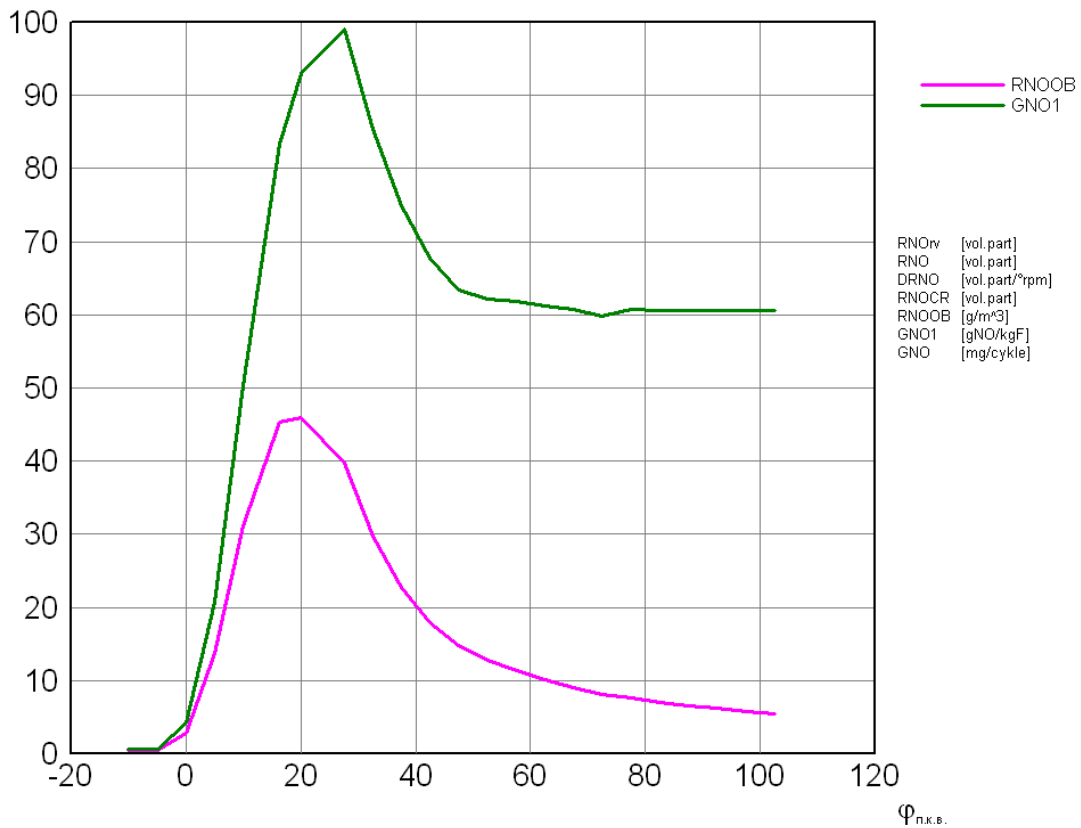


Рис. 4.4. График изменения объемной концентрации оксидов азота в цилиндре бензинового двигателя $R_{NO_{об}}$, г/м³ и массовой концентрации G_{NO1} , г/кг топлива, построенный встроенным постпроцессором

Основные результаты расчета токсичности ОГ бензинового двигателя сведены в таблицу 4.6.

Таблица 4.6. Расчетные показатели токсичности ОГ бензинового двигателя
(по протоколам расчета рабочего процесса и оксидов азота)

Компоненты ОГ	Удельные выбросы, кг/кВт·ч	Концентрация в сухих ОГ
Углекислый газ CO_2	0,705	12,75 % об.
Угарный газ CO	0,119	3,39 % об.
Диоксид серы SO_2	$5,760 \cdot 10^{-6}$	1 <i>ppm</i> (отсутствие)
Углеводороды CH	$0,732 \cdot 10^{-3}$	126 <i>ppm</i>
Оксид азота NO	$3,950 \cdot 10^{-3}$	984 <i>ppm</i>

Выводы по результатам выполненных расчетов можно сделать следующие:

1. Расчетные концентрации таких токсичных компонентов ОГ, как CO_2 , CO , CH и NO в целом соответствуют величинам, неоднократно полученным при стендовых испытаниях бензиновых двигателей (ВАЗ-2111 и ВАЗ-2112) в лаборатории ДВС СПбПУ. Поэтому модели выбросов токсичных компонентов ОГ для бензиновых двигателей можно считать верифицированными по экспериментальным данным.

2. Содержание диоксида серы SO_2 получено на минимальном уровне (практически «отсутствие»), поскольку в расчете использованы параметры бензина, соответствующему 5-му экологическому классу (содержание S не более 10 *ppm*).

3. Полученные значения удельных выбросов соответствуют номинальному режиму работы бензинового двигателя.

4. Для того, чтобы рассчитать средневзвешенный выброс ВВ по какому-либо «испытательному циклу», необходимо выполнить расчеты рабочего процесса на всех заданных режимах выбранного цикла, и далее, с использованием весовых коэффициентов для каждого режима, рассчитать средневзвешенный выброс каждого ВВ (а это большая работа!). Следует иметь в виду, что в расчетах с использованием ПМК «RP-TOX-2018» могут быть смоделированы только стационарные режимы работы двигателя.

4.7.2. Быстроходный четырехтактный дизельный двигатель

Для примера расчета использованы данные рабочего процесса дизельного двигателя КамАЗ 7403, размерностью 12/12, см. параграф 3.2.3. Для данного двигателя рассчитывается как содержание в ОГ оксидов азота, так и результирующее сажевыделение.

Все исходные данные, используемые программой расчета выбросов оксидов азота находятся в файле Ind003.dat (далее содержимое этих файлов не приводится т.к. их структура идентична приведенной в таблице 3.3 в параграфе 3.2.1). При выполнении расчета программа выгружает файл протокола расчета NOx003.txt, где 003 – номер варианта расчета, имеющийся в файле индикаторной диаграммы и файл eNO003.dat, содержащий информацию для построения графиков (содержимое этих файлов далее также не приводится). Содержимое файла протокола расчета приведено ниже, график изменения концентрации оксидов азота приведен на рис. 4.5.

Содержимое файла протокола расчета NOx003.txt

4T Diezel 12/12
*** Variant 003 ***

Расчет процесса образования оксидов азота в цилиндре двигателя

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

D= .120, S= .120 [м];	Lamda= .2670	Степень сжатия = 16.00
Ne= 227.4 [кВт]	Цилл = 8 Такт= 4.	N= 2200.0 [1/мин]
Gt= 6.50 [кг/ч]	Gc= .9848E-04 [кг]	Gr= .0143 Prod= 1.015
Fi нач.стоп.= -8.00	Pa= .2166 [МПа]	Ta= 391.7 [K] Fia= -145.0
Alfa ст.= 1.823	Alfa сум.= 1.850	CNOx0= 2000.0 [мг/м.куб.]
Fi нач.табл.= -10.0	DfiT шаг табл.= 5.00	Шаг печати = 5.0 JT= 23
C= .870 H= .126	O= .004 N= .00015	Qn= 42500.0 Mu= 190.0

FI	P	T	X	FI	P	T	X
-10.00	7.47	1017.63	.0002	-5.00	9.18	1902.03	.0413
.00	11.53	2279.80	.1613	5.00	11.94	2280.63	.2322
10.00	11.35	2239.42	.3105	15.00	10.28	2187.31	.4046
20.00	9.01	2130.86	.5050	25.00	7.75	2087.58	.6032
30.00	6.59	2022.08	.6925	35.00	5.58	1956.22	.7688
40.00	4.72	1890.95	.8305	45.00	4.00	1826.54	.8779
50.00	3.41	1763.85	.9126	55.00	2.92	1703.26	.9369
60.00	2.52	1645.42	.9531	65.00	2.19	1590.82	.9636
70.00	1.91	1539.84	.9700	75.00	1.69	1492.71	.9737
80.00	1.51	1449.55	.9759	85.00	1.36	1409.92	.9768
90.00	1.23	1373.95	.9771	95.00	1.13	1341.41	.9772

M0= .4946 [кмоль/кг]	L0= 14.32 [кг/кг]	Va= .1355E-02 [м.куб]
MA= PA*VA/(R*TA) = .2611E-02 [кг/цикл]	Alд=MA/(L0*QC) = 1.824	

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Идентификация результатов расчета:

FI- угол поворота коленчатого вала, град. п.к.в.
 RNOравн- равновесная концентрация NO в зоне ПС, об. доля
 RNO- текущая объемная концентрация NO в зоне ПС, об. доля
 DRNO- скорость изменения концентрации NO в зоне ПС, об. доля/град. п.к.в.
 RNOCR- средняя объемная концентрация NO в цилиндре, об. доля
 RNOOB- средняя массовая концентрация NO в цилиндре, г/м.куб.
 GNO1- относительная масса NO, г NO/кг топлива
 GNO- массовое содержание NO в цилиндре, мг/цикл

Данные во второй строке для процесса образования NO с учетом азота топлива

FI	RNOравн	RNO	DRNO	RNOCR	RNOOB	GNO1	GNO
-5.0	.3710E-02	.1707E-05	.2048E-05	.1322E-04	.387	.369	.04
	.3710E-02	.2918E-05	.3502E-05	.1327E-04	.389	.370	.04
.0	.3710E-02	.2762E-04	.1650E-04	.1597E-04	.486	.447	.04
	.3710E-02	.3284E-04	.1666E-04	.1682E-04	.512	.470	.05
5.0	.9475E-02	.5358E-03	.7319E-04	.1351E-03	3.979	3.787	.37
	.9474E-02	.5405E-03	.7350E-04	.1362E-03	4.011	3.818	.38
10.0	.9490E-02	.7685E-03	.3031E-04	.2479E-03	6.627	6.965	.69
	.9491E-02	.7764E-03	.3118E-04	.2504E-03	6.692	7.035	.69
15.0	.8709E-02	.8159E-03	.5034E-06	.3371E-03	7.815	9.497	.94
	.8709E-02	.8257E-03	.1049E-05	.3411E-03	7.907	9.608	.95
20.0	.7774E-02	.7679E-03	-.1123E-04	.3922E-03	7.683	11.079	1.09
	.7774E-02	.7787E-03	-.1097E-04	.3976E-03	7.788	11.231	1.11
25.0	.6827E-02	.7009E-03	-.1233E-04	.4244E-03	6.952	12.021	1.18
	.6827E-02	.7119E-03	-.1224E-04	.4310E-03	7.061	12.208	1.20
30.0	.6149E-02	.6384E-03	-.1261E-04	.4412E-03	6.045	12.529	1.23
	.6149E-02	.6496E-03	-.1256E-04	.4489E-03	6.150	12.747	1.26
35.0	.5202E-02	.5820E-03	-.9444E-05	.4445E-03	5.123	12.651	1.25
	.5202E-02	.5933E-03	-.9428E-05	.4531E-03	5.222	12.894	1.27
40.0	.4344E-02	.5415E-03	-.6686E-05	.4452E-03	4.356	12.691	1.25
	.4344E-02	.5528E-03	-.6681E-05	.4544E-03	4.446	12.954	1.28
45.0	.3587E-02	.5135E-03	-.4575E-05	.4451E-03	3.735	12.703	1.25
	.3587E-02	.5248E-03	-.4575E-05	.4548E-03	3.817	12.981	1.28
50.0	.2929E-02	.4946E-03	-.3051E-05	.4447E-03	3.237	12.706	1.25
	.2929E-02	.5059E-03	-.3051E-05	.4549E-03	3.310	12.995	1.28
55.0	.2369E-02	.4822E-03	-.1980E-05	.4445E-03	2.835	12.707	1.25
	.2369E-02	.4935E-03	-.1980E-05	.4549E-03	2.902	13.004	1.28
60.0	.2257E-02	.4742E-03	-.1249E-05	.4443E-03	2.510	12.708	1.25
	.2257E-02	.4855E-03	-.1249E-05	.4549E-03	2.569	13.010	1.28
65.0	.2257E-02	.4693E-03	-.7646E-06	.4442E-03	2.244	12.709	1.25
	.2257E-02	.4806E-03	-.7648E-06	.4549E-03	2.298	13.014	1.28
70.0	.2257E-02	.4663E-03	-.4512E-06	.4442E-03	2.025	12.710	1.25
	.2257E-02	.4776E-03	-.4513E-06	.4549E-03	2.073	13.017	1.28
75.0	.2256E-02	.4646E-03	-.2616E-06	.4442E-03	1.842	12.710	1.25
	.2256E-02	.4758E-03	-.2617E-06	.4549E-03	1.887	13.019	1.28
80.0	.2256E-02	.4636E-03	-.1289E-06	.4441E-03	1.690	12.711	1.25
	.2256E-02	.4749E-03	-.1289E-06	.4549E-03	1.731	13.020	1.28
85.0	.2256E-02	.4632E-03	-.4399E-07	.4442E-03	1.562	12.712	1.25
	.2256E-02	.4745E-03	-.4401E-07	.4550E-03	1.600	13.021	1.28
90.0	.2256E-02	.4631E-03	-.1153E-07	.4442E-03	1.454	12.712	1.25
	.2256E-02	.4743E-03	-.1155E-07	.4550E-03	1.489	13.022	1.28
95.0	.2256E-02	.4630E-03	.3913E-08	.4442E-03	1.361	12.713	1.25
	.2256E-02	.4743E-03	.3900E-08	.4550E-03	1.394	13.022	1.28
100.0	.2256E-02	.4631E-03	.3730E-08	.4442E-03	1.282	12.713	1.25
	.2256E-02	.4743E-03	.3717E-08	.4550E-03	1.314	13.023	1.28

Число делений пополам(+) или удвоений(-) нач. шага интегрирования: INFL= -3

Технико-гигиенические характеристики двигателя

Концентрация NO во влажных продуктах сгорания 640.4 ppm

1. Концентрация оксидов азота на выхлопе, % объемн. RNO= .06404
в пересчете на NO2 и N2O5: RNOX= .06406, RN2O5= .03204
то же в мг/норм.м.куб. CNO= 858.2 в пересчете на NO2 и N2O5
CNOX= 1313.2 CN2O5= 1544.6

Концентрация NO в сухих продуктах сгорания 686.0 ppm

1. Концентрация оксидов азота на выхлопе, % объемн. RNO= .06860
в пересчете на NO2 и N2O5: RNOX= .06862, RN2O5= .03432
то же в мг/норм.м.куб. CNO= 919.3 в пересчете на NO2 и N2O5
CNOX= 1406.7 CN2O5= 1654.6
2. Выделение NO, [г/час] ENO= .990E+03
в пересчете на NO2 ENOX= .152E+04
3. Выделение NO, [мг/(цикл*цилиндр)] GNO= 1.88
4. Удельное выделение, [г/(кВт.ч)] EUNO= 4.35 EUNOX= 6.67
5. Относит. выделение, [г/(кг топлива)] E1NO= 19.0 E1NOX= 29.2
6. Нормообъем, [м.куб/ч] VNO= .226E+05
7. Удельный нормообъем [м.куб/(кВт.ч)] UVNO= .993E+02
8. Индекс концентрации NO, ИКР= .286E+02
9. Удельное выделение NO, приведенное к CO, [г/(кВт.ч)] QE= 2.90
10. Часовые выделения отработавших газов:
(влажные ПС) - Vог= .1126E+04 [н.м.куб] Gог= .1454E+04 [кг]
(сухие ПС) - Vог= .1052E+04 [н.м.куб] Gог= .1395E+04 [кг].

С учетом топливных оксидов

Технико-гигиенические характеристики двигателя

Концентрация NO во влажных продуктах сгорания 656.0 ppm

1. Концентрация оксидов азота на выхлопе, % объемн. RNO= .06560
в пересчете на NO2 и N2O5: RNOX= .06562, RN2O5= .03282
то же в мг/норм.м.куб. CNO= 879.1 в пересчете на NO2 и N2O5
CNOX= 1345.2 CN2O5= 1582.2

Концентрация NO в сухих продуктах сгорания 702.7 ppm

1. Концентрация оксидов азота на выхлопе, % объемн. RNO= .07027
в пересчете на NO2 и N2O5: RNOX= .07029, RN2O5= .03516
то же в мг/норм.м.куб. CNO= 941.7 в пересчете на NO2 и N2O5
CNOX= 1440.9 CN2O5= 1694.9
2. Выделение NO, [г/час] ENO= .101E+04
в пересчете на NO2 ENOX= .155E+04
3. Выделение NO, [мг/(цикл*цилиндр)] GNO= 1.92
4. Удельное выделение, [г/(кВт.ч)] EUNO= 4.46 EUNOX= 6.84
5. Относит. выделение, [г/(кг топлива)] E1NO= 19.5 E1NOX= 29.9
6. Нормообъем, [м.куб/ч] VNO= .231E+05
7. Удельный нормообъем [м.куб/(кВт.ч)] UVNO= .102E+03
8. Индекс концентрации NO, ИКР= .293E+02
9. Удельное выделение NO, приведенное к CO, [г/(кВт.ч)] QE= 2.97
10. Часовые выделения отработавших газов:
(влажные ПС) - Vог= .1126E+04 [н.м.куб] Gог= .1454E+04 [кг]
(сухие ПС) - Vог= .1052E+04 [н.м.куб] Gог= .1395E+04 [кг].

Конец варианта

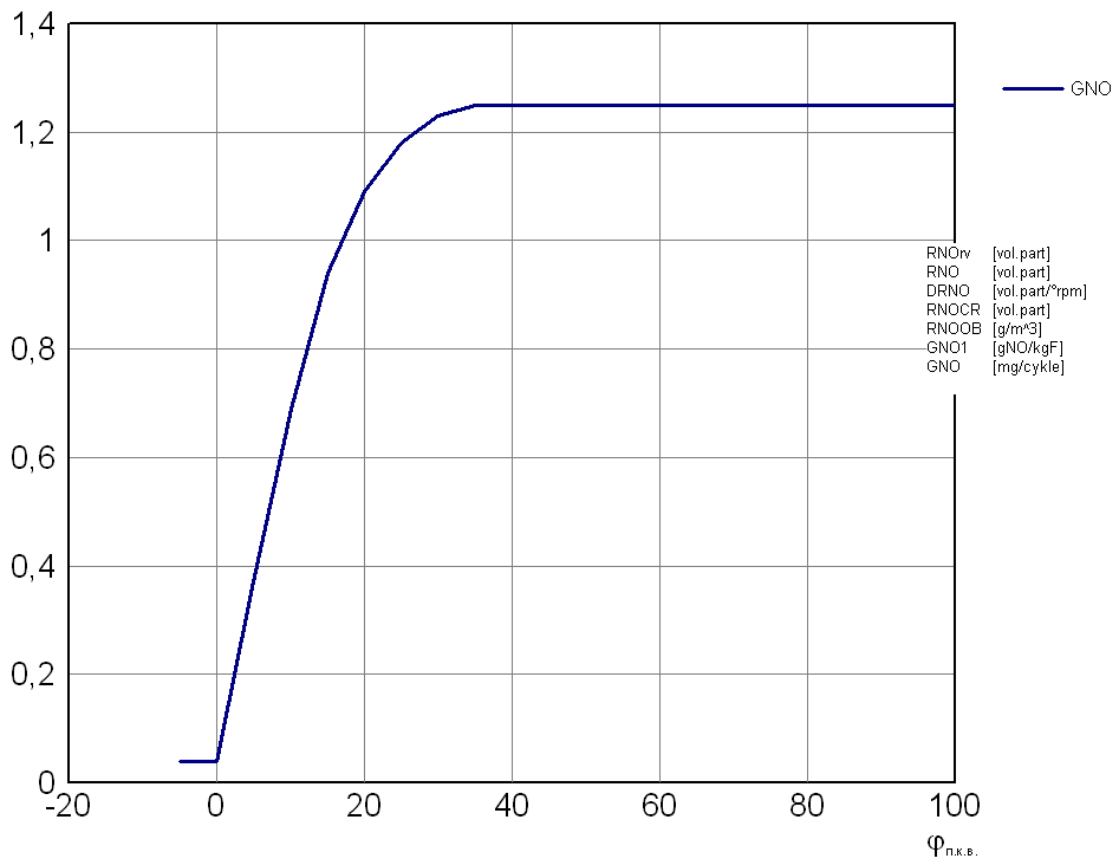


Рис. 4.5. График нарастания концентрации оксидов азота в цилиндре быстроходного дизеля, мг/цикл построенный встроенным постпроцессором

Список необходимых дополнительных исходных данных к расчету результирующего сажевыделения приведен в таблице 4.7. Введенные исходные данные записываются препроцессором в файлы типа Szi***.dat, где *** – номер варианта расчета. Содержимое файла показано ниже.

Таблица 4.7. Номер группы параметров, обозначение вводимых данных и пояснения к выбору исходных данных к расчету сажевыделения

№ гр.	Обозначение параметра	Пояснения к выбору данных
1	TEXT	Текстовая информация о двигателе, режиме работы и т.д. – 40 позиций.
2	VAR	Номер варианта расчета xxx – 3 позиции (по этому номеру записывается файл протокола типа SZHxxx.txt)

3	KP, KN, KA	Групповой состав топлива: парафины, нафтены, ароматика, [кг/кг топл.] – задается согласно статистическим, литературным или опытным данным по конкретному топливу
4	B1, B2, B3, ALC	«Опытные» коэффициенты, используемые для настройки базового варианта расчета, локальный коэффициент избытка воздуха в зоне образования сажи (0,4...0,6). Рекомендации по назначению коэффициентов см. в документе «Описание применения» в Приложении.
5	DSOP, ISOP, IGC	Диаметр [мм], количество сопел форсунки, тип характеристики впрыска: 1 – дифференциальная, 2 – интегральная.
6	FIHPT, FIBPR, IPF	Угол начала подачи топлива, продолжительность впрыска, [° п.к.в.]; число элементов массивов PF и ZTP. Внимание! Угол начала подачи топлива должен быть более ранним, чем угол начала видимого сгорания! См. рекомендации в документе «Описание применения» в Приложении.
7	PF(I), I=1,IPF	Таблица давления топлива в распылителе. Требуется отдельного расчета или задания по опытным данным.
8	ZTP(I), I=1,IPF	Закон (характеристика) подачи топлива (дифференциальная или интегральная). Требуется отдельного расчета или задания по опытным данным.
9	FN3	Имя файла индикаторной диаграммы для считывания. Здесь же показан и путь к нему.

Содержимое файла исходных данных Szi003.dat

```

KamAZ 7403
*** Variant 003 ***
0.8150 0.1660 0.0190 ! KP, KN, KA
1.500 0.060 1.000 0.570 ! B1, B2, B3, ALC
0.3200 4 2 ! DSOP, ISOP, IGC
-15.00 32.00 14 ! FIHPT, FIBPR, IPF
80.0 140.0 220.0 320.0 390.0
370.0 430.0 520.0 630.0 680.0
670.0 570.0 300.0 30.0 ! PF(I), I=1,IPF
0.0001 0.0300 0.0600 0.1100 0.1700
0.2500 0.3600 0.5000 0.6200 0.7800
0.8800 0.9500 0.9800 0.9999 ! ZTP(I), I=1,IPF
C:\ALFA\!!! RP-TOX 2018_2\Work RP-TOX-2018\!ЁшьхЁv
Ёрёўхёр\3_4с_фшчхы№_12 эр 12_рыхэюўэюх\ind003.dat

```

При выполнении расчета программа выгружает файл протокола расчета типа Szh***.txt, где *** – номер варианта расчета, имеющийся в файле исходных данных типа Szi***.dat и файл типа Szg***.dat, содержащий информацию для построения графиков. Содержимое файла протокола расчета приведено ниже, график изменения концентрации сажи приведен на рис. 4.6.

Содержимое файла протокола расчета Szh003.txt

KamAZ 7403

*** Variant 003 ***

Расчет процесса результирующего сажевыделения в цилиндре дизеля.

Исходные данные

D= .120, S= .120 [м];	LAMDA= .2670	Степень сжатия = 16.00
NE= 227.4 [кВт]	Ицил = 8 ТАКТ= 4.	N= 2200.0 [1/мин]
GT= 6.50 [кг/ч]	GC= .9848E-04 [кг]	GR= .0143 PROD= 1.015
FI нач.стор.= -8.00	PA= 2.1660 [бар]	TA= 391.7 [K] FIA= -145.0
ALFA обр.сажи= .570	ALFA сум.= 1.850	FIB отк.вып. кл-на= 130.0
FI нач.табл.= -15.0	DFIT шаг табл.= 5.00	Шаг печати = 5.0 IT= 29
B1= 1.500	B2= .060	B3= 1.000
DSOP= .3200 [мм]	ISOP= 4 FИНРТ=-15.00	FIBPR= 32.00 [град.]
Парафины= .8150	Нафтенны= .1660	Ароматики= .0190
C= .8700 H= .1260 O= .0040 N= .0150 QH= 42.5 [мДж/кг]	Молек.вес= 190.0	

Давление газов :

61.5220	74.7122	91.7570	115.3278	119.3660	113.5337	102.8370
90.1319	77.4610	65.8871	55.7910	47.2156	40.0360	34.0864
29.1820	25.1546	21.8520	19.1437	16.9190	15.0870	13.5670
12.3041	11.2500	10.3678	9.6250	8.9977	8.4650	8.0089
7.6070						

Закон выделения теплоты :

.0000	.0002	.0413	.1613	.2322	.3105	.4046
.5050	.6032	.6925	.7688	.8305	.8779	.9126
.9369	.9531	.9636	.9700	.9737	.9759	.9768
.9771	.9772	.9772	.9772	.9772	.9772	.9772
.9772						

Закон подачи топлива :

.0001	.0612	.1743	.3727	.6387	.8926	.9800
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1.0000						

Относительная доля испарившегося топлива :

.0001	.0367	.1246	.2835	.5163	.7714	.9315
.9893	.9994	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1.0000						

Давление топлива перед форсункой PF(I), [МПа]
 [FI начала таблицы PF(I)= -15.0] Шаг табл.= 2.5

8.1549	14.2712	22.4261	32.6198	39.7553	37.7166	43.8328
53.0071	64.2202	69.3170	68.2977	58.1040	30.5810	3.0581

Результаты расчета процесса сажеобразования.

FI	P	T обр	T выг	X	NTсум [г/кг]	CMсрo [г/м3]
-5.00	91.63	1901.2	2354.3	.0408	.3736E-02	.3923E-02
.00	115.24	1941.7	2395.4	.1607	.8079E+01	.8793E+01
5.00	119.37	1948.1	2401.8	.2321	.9139E+01	.9602E+01
10.00	113.60	1940.0	2394.2	.3099	.1026E+02	.9765E+01
15.00	102.86	1924.6	2380.0	.4044	.1088E+02	.8960E+01
20.00	90.14	1903.9	2360.0	.5049	.1118E+02	.7757E+01
25.00	77.49	1882.5	2340.0	.6030	.1156E+02	.6688E+01
30.00	65.90	1784.6	2201.3	.6923	.1417E+02	.6839E+01
35.00	55.81	1837.4	2295.6	.7686	.1917E+02	.7764E+01
40.00	47.22	1818.9	2278.8	.8305	.2412E+02	.8279E+01
45.00	40.11	1797.2	2256.1	.8775	.2986E+02	.8796E+01
50.00	34.10	1779.5	2238.8	.9126	.3541E+02	.9025E+01
55.00	29.23	1764.7	2224.8	.9367	.4018E+02	.8980E+01
60.00	25.23	1748.6	2207.8	.9529	.4433E+02	.8776E+01
65.00	21.85	1734.4	2193.3	.9636	.3778E+02	.6670E+01
70.00	19.14	1721.1	2179.2	.9700	.3275E+02	.5216E+01
75.00	16.92	1710.1	2167.9	.9737	.2881E+02	.4175E+01
80.00	15.09	1698.1	2154.5	.9759	.2568E+02	.3415E+01
85.00	13.57	1688.0	2143.2	.9768	.2317E+02	.2847E+01
90.00	12.30	1678.5	2132.7	.9771	.2110E+02	.2412E+01
95.00	11.25	1671.3	2125.0	.9772	.1937E+02	.2074E+01
100.00	10.37	1666.3	2120.3	.9772	.1789E+02	.1805E+01
105.00	9.63	1659.6	2112.7	.9772	.1661E+02	.1587E+01
110.00	9.00	1655.0	2107.9	.9772	.1550E+02	.1410E+01
115.00	8.47	1650.5	2103.2	.9772	.1451E+02	.1263E+01
120.00	8.01	1646.2	2098.5	.9772	.1363E+02	.1140E+01
125.00	8.01	1646.2	2098.5	.9772	.1282E+02	.1035E+01

Концентрация сажи на выхлопе СВХ= .5642 [г/м3]
 Дымность отработавших газов [%] по приборам:
 Хартридж= 75.7 Бош= 63.6 ИД-1= 63.6
 По ГОСТ 17.2.2.02-86: N= 60.7 [%] K= 2.173 [1/м]

Технико-гигиенические показатели двигателя.

А. Показатели по выбросам сажи.

1. Относительное выделение сажи E1C, [г/кг]	12.82
2. Массовая концентрация сажи CD, [г/м**3]	.5509
3. Часовые выделения ЕС, [г/час]	666.4
4. Цикловое выделение BC, [мг/цикл]	1.2622
5. Удельное выделение EUD, [г/кВт*ч]	2.93
6. Нормообъем по ПДК.СС=.05 мг/м**3, [м**3/ч]	.1333E+08
7. Индекс концентрации по ПДК.СС, КР	.1102E+05
8. Удельный нормообъем UVH, [м**3/кВт*ч]	.5862E+05
9. Удельн. выделение приведен. к CO, [г/кВт*ч]	.1759E+03

Б. Показатели по выбросам бенз/а/пирена (БАП).

1. Относительное выделение БАП Е1В, [мкг/кг]	65.06
2. Массовая концентрация БАП СВ, [мкг/м ³]	2.7967
3. Часовое выделение БАП ЕВ, [мг/час]	3.38
4. Цикловое выделение БАП ВВ, [мкг/цикл]	.6408E-02
5. Удельное выделение ЕUD, [мг/кВт*ч]	14.88
6. Нормообъем по ПДК.СС=1E-6 мг/м ³ , [м ³ /ч]	.3383E+07
7. Индекс концентрации по ПДК.СС, КР	.2797E+04
8. Удельный нормообъем UVH, [м ³ /кВт*ч]	.1488E+05
9. Удельн. выделение приведен. к СО, [г/кВт*ч]	.4464E+02

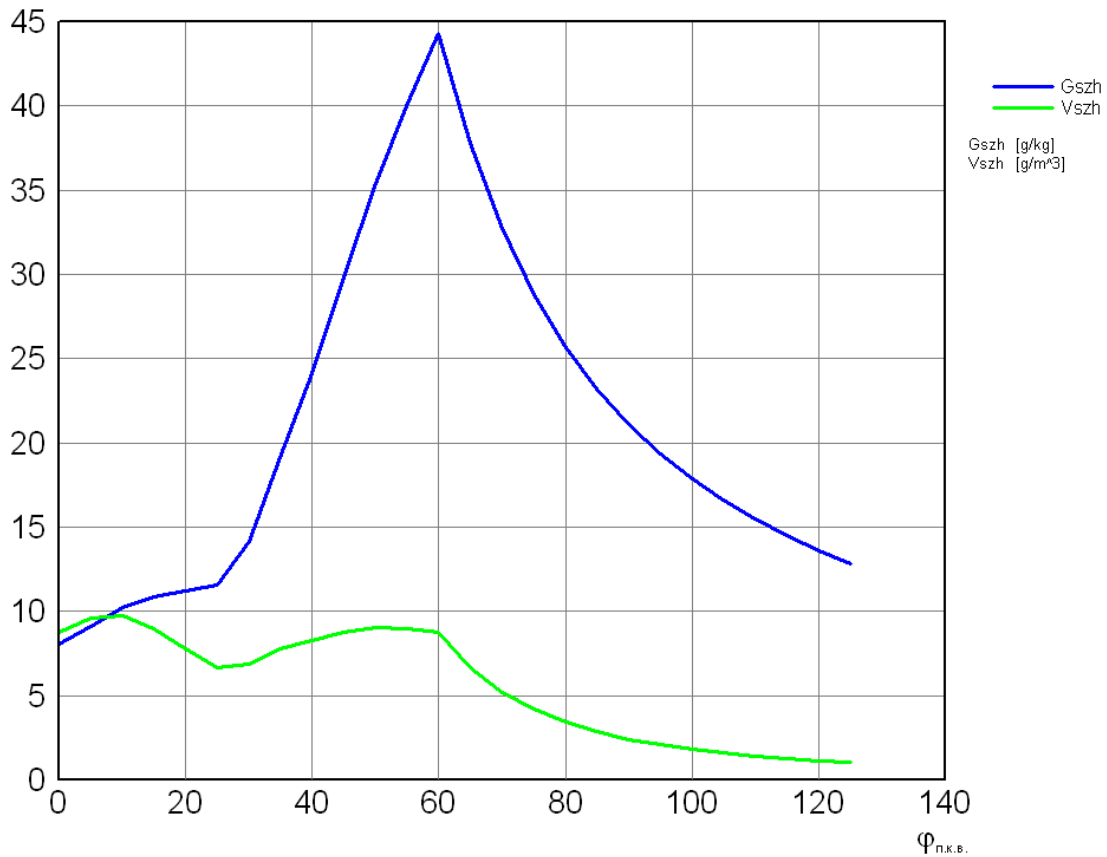


Рис. 4.6. График изменения концентрации сажи, г/кг рабочего тела и в г/м³, построенный встроенным постпроцессором

Основные результаты расчета токсичности ОГ быстроходного дизельного двигателя сведены в таблицу 4.8.

Таблица 4.8. Расчетные показатели токсичности ОГ дизельного двигателя (по протоколам расчета рабочего процесса, оксидов азота и выбросов сажи)

Компоненты ОГ	Удельные выбросы, кг/кВт·ч	Концентрация в сухих ОГ
Углекислый газ CO_2	0,732	8,21 % об.
Угарный газ CO	$0,235 \cdot 10^{-3}$	41 ppm
Диоксид серы SO_2	$0,918 \cdot 10^{-3}$	71 ppm
Углеводороды CH	$0,252 \cdot 10^{-3}$	18 ppm
Оксид азота NO	$4,460 \cdot 10^{-3}$	703 ppm
Сажа C	$2,930 \cdot 10^{-3}$	0,551 г/м ³
Бенз(а)пирен $C_{20}H_{12}$	$1,488 \cdot 10^{-5}$	2,797 мкг/м ³

По результатам выполненных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Расчетные концентрации таких токсичных компонентов ОГ, как CO_2 , CO , CH и NO в целом соответствуют величинам, неоднократно полученным при стендовых испытаниях дизельного двигателя КамАЗ-740 в лаборатории ДВС СПбПУ. Поэтому модели выбросов токсичных компонентов ОГ для дизелей можно считать верифицированными по экспериментальным данным.

2. Содержание диоксида серы SO_2 получено на относительно высоком уровне, поскольку в расчете использованы параметры ДТ, соответствующему 2-му экологическому классу (содержание S не более 0,2 %).

3. Выбросы сажи (а также бенз(а)пирена) достаточно высоки, и соответствуют высоконагруженному режиму работы двигателя с относительно невысоким коэффициентом избытка воздуха (1,82). Полученное в расчете значение коэффициента ослабления $K = 2,17$ 1/м соответствует среднестатистическим данным по испытаниям, проводимым на двигателе КамАЗ-740 в лаборатории ДВС СПбПУ, следовательно, коэффициенты B_1 , B_2 , B_3 , а также ALC подобраны верно.

4. Полученные значения удельных выбросов соответствуют номинальному режиму работы быстроходного дизельного двигателя.

5. Вывод тот же, что и вывод 4 в предыдущем параграфе.

4.7.3. Малооборотный двухтактный дизельный двигатель

Для примера расчета использованы данные рабочего процесса судового двигателя MAN B&W марки S26MC, см. параграф 3.2.6. Для данного двигателя рассчитывается как содержание в ОГ оксидов азота, так и результирующее сажевыделение.

Все исходные данные, используемые программой расчета выбросов оксидов азота находятся в файле Ind006.dat. При выполнении расчета программа выгружает файл протокола расчета NOx006.txt, где 006 – номер варианта расчета, и файл eNO006.dat, содержащий информацию для построения графиков. Содержимое файла протокола расчета приведено ниже, график изменения концентрации оксидов азота приведен на рис. 4.7.

Содержимое файла протокола расчета NOx006.txt

MAN B&W S26MC

*** Variant 006 ***

Расчет процесса образования оксидов азота в цилиндре двигателя

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

D= .260, S= .980 [м];	Lamda= .2500	Степень сжатия = 18.00
Ne= 1800.1 [кВт]	Цилл = 6 Такт= 2.	N= 250.0 [1/мин]
Gt= 55.00 [кг/ч]	Gc= .3667E-02 [кг]	Gr= .0341 Prod= 1.577
Fi нач.стоп.= -10.50	Pa= .2098 [МПа]	Ta= 334.0 [K] Fia= -120.0
Alfa ст.= 1.814	Alfa сум.= 2.862	CNOx0= 2000.0 [мг/м.куб.]
Fi нач.табл.= -15.0	DfiT шаг табл.= 5.00	Шаг печати = 5.0 JT= 24
C= .880 H= .120	O= .000 N= .00015	Qн= 44510.0 Mu= 190.0

FI	P	T	X	FI	P	T	X
-15.00	5.62	824.70	.0000	-10.00	6.98	874.92	.0010
-5.00	8.57	953.65	.0265	.00	10.31	1920.02	.0944
5.00	11.81	1953.56	.2125	10.00	12.41	1942.49	.3661
15.00	11.92	1896.15	.5306	20.00	10.66	1841.69	.6807
25.00	9.05	1905.28	.7993	30.00	7.45	1905.05	.8809
35.00	6.04	1858.35	.9299	40.00	4.88	1784.75	.9555
45.00	3.96	1700.50	.9672	50.00	3.25	1616.40	.9719
55.00	2.70	1538.05	.9735	60.00	2.27	1467.44	.9739
65.00	1.94	1404.61	.9741	70.00	1.68	1348.85	.9741
75.00	1.47	1299.30	.9741	80.00	1.30	1255.14	.9741
85.00	1.16	1215.68	.9741	90.00	1.05	1180.33	.9741
95.00	.96	1148.60	.9741	100.00	.88	1120.10	.9741

M0= .4921 [кмоль/кг]	L0= 14.25 [кг/кг]	Va= .4455E-01 [м.куб]
MA= PA*VA/(R*TA) = .9751E-01 [кг/цикл]	Alд=MA/(L0*QC)= 1.805	

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Идентификация результатов расчета:

- FI- угол поворота коленчатого вала, град. п.к.в.
- RNOравн- равновесная концентрация NO в зоне ПС, об. доля
- RNO- текущая объемная концентрация NO в зоне ПС, об. доля
- DRNO- скорость изменения концентрации NO в зоне ПС, об. доля/град. п.к.в.
- RNOCR- средняя объемная концентрация NO в цилиндре, об. доля
- RNOOB- средняя массовая концентрация NO в цилиндре, г/м.куб.
- GNO1- относительная масса NO, г NO/кг топлива
- GNO- массовое содержание NO в цилиндре, мг/цикл

Данные во второй строке для процесса образования NO с учетом азота топлива

FI	RNOравн	RNO	DRNO	RNOCR	RNOOB	GNO1	GNO
-5.0	.2244E-02	.3873E-05	.3995E-05	.3162E-04	1.591	1.382	5.07
	.2244E-02	.5065E-05	.5426E-05	.3164E-04	1.592	1.383	5.07
.0	.2244E-02	.1809E-04	.2832E-05	.3126E-04	1.639	1.368	5.02
	.2244E-02	.2363E-04	.3401E-05	.3159E-04	1.656	1.382	5.07
5.0	.3892E-02	.4757E-04	.5378E-05	.3419E-04	1.726	1.499	5.50
	.3892E-02	.5514E-04	.5658E-05	.3521E-04	1.778	1.544	5.66
10.0	.4288E-02	.7551E-04	.4596E-05	.4217E-04	1.913	1.854	6.80
	.4288E-02	.8420E-04	.4761E-05	.4419E-04	2.004	1.943	7.12
15.0	.4155E-02	.8905E-04	.1272E-05	.5119E-04	1.987	2.257	8.28
	.4155E-02	.9839E-04	.1376E-05	.5432E-04	2.108	2.395	8.78
20.0	.3624E-02	.8754E-04	-.4286E-06	.5588E-04	1.808	2.470	9.06
	.3624E-02	.9726E-04	-.3684E-06	.6005E-04	1.942	2.654	9.73
25.0	.3059E-02	.8666E-04	.5833E-06	.5953E-04	1.590	2.637	9.67
	.3059E-02	.9658E-04	.6032E-06	.6452E-04	1.723	2.857	10.48
30.0	.3725E-02	.9518E-04	.1441E-05	.6701E-04	1.480	2.972	10.90
	.3725E-02	.1052E-03	.1459E-05	.7255E-04	1.603	3.218	11.80
35.0	.3723E-02	.1009E-03	.6926E-06	.7223E-04	1.330	3.206	11.76
	.3723E-02	.1110E-03	.7065E-06	.7813E-04	1.438	3.468	12.72
40.0	.3225E-02	.1019E-03	.7096E-07	.7393E-04	1.146	3.283	12.04
	.3225E-02	.1120E-03	.7720E-07	.8001E-04	1.241	3.553	13.03
45.0	.2533E-02	.1017E-03	.1667E-08	.7435E-04	.983	3.302	12.11
	.2533E-02	.1119E-03	.3850E-08	.8051E-04	1.064	3.576	13.11
50.0	.2244E-02	.1018E-03	.3403E-07	.7458E-04	.851	3.313	12.15
	.2244E-02	.1120E-03	.3460E-07	.8078E-04	.921	3.588	13.16
55.0	.1000E-11	.1017E-03	-.1211E-07	.7457E-04	.742	3.312	12.14
	.2244E-02	.1122E-03	.5210E-07	.8100E-04	.806	3.598	13.19
60.0	.2244E-02	.1020E-03	.5408E-07	.7477E-04	.657	3.321	12.18
	.1000E-11	.1122E-03	-.3235E-08	.8100E-04	.712	3.597	13.19
65.0	.2244E-02	.1022E-03	.5109E-07	.7494E-04	.587	3.329	12.21
	.1000E-11	.1122E-03	-.7587E-09	.8100E-04	.635	3.597	13.19
70.0	.1000E-11	.1022E-03	-.1571E-09	.7493E-04	.528	3.328	12.20
	.2244E-02	.1124E-03	.4710E-07	.8116E-04	.573	3.605	13.22
75.0	.2244E-02	.1025E-03	.4356E-07	.7508E-04	.481	3.335	12.23
	.2244E-02	.1126E-03	.4349E-07	.8131E-04	.521	3.612	13.24
80.0	.2244E-02	.1027E-03	.4029E-07	.7521E-04	.441	3.341	12.25
	.2244E-02	.1129E-03	.4022E-07	.8144E-04	.478	3.617	13.26
85.0	.2244E-02	.1029E-03	.3767E-07	.7534E-04	.408	3.346	12.27
	.2244E-02	.1131E-03	.3771E-07	.8156E-04	.442	3.623	13.28
90.0	.2244E-02	.1031E-03	.3544E-07	.7545E-04	.380	3.352	12.29
	.2244E-02	.1132E-03	.3537E-07	.8167E-04	.411	3.628	13.30
95.0	.2244E-02	.1032E-03	.3360E-07	.7556E-04	.355	3.356	12.31
	.2244E-02	.1134E-03	.3347E-07	.8178E-04	.385	3.633	13.32
100.0	.2244E-02	.1034E-03	.3189E-07	.7566E-04	.335	3.361	12.32
	.2244E-02	.1136E-03	.3183E-07	.8188E-04	.362	3.637	13.34

Число делений пополам(+) или удвоений(-) нач. шага интегрирования: IHFL= -3

Технико-гигиенические характеристики двигателя

Концентрация NO во влажных продуктах сгорания 378.0 ppm

1. Концентрация оксидов азота на выхлопе, % объемн. RNO= .03780
в пересчете на NO2 и N2O5: RNOX= .03780, RN2O5= .01890
то же в мг/норм.м.куб. CNO= 506.5 в пересчете на NO2 и N2O5
CNOX= 774.9 CN2O5= 911.2

Концентрация NO в сухих продуктах сгорания 394.1 ppm

1. Концентрация оксидов азота на выхлопе, % объемн. RNO= .03941
в пересчете на NO2 и N2O5: RNOX= .03941, RN2O5= .01971
то же в мг/норм.м.куб. CNO= 528.1 в пересчете на NO2 и N2O5
CNOX= 808.0 CN2O5= 950.1
2. Выделение NO, [г/час] ENO= .951E+04
в пересчете на NO2 ENOX= .146E+05
3. Выделение NO, [мг/(цикл*цилиндр)] GNO= 105.65
4. Удельное выделение, [г/(кВт.ч)] EUNO= 5.28 EUNOX= 8.10
5. Относит. выделение, [г/(кг топлива)] E1NO= 28.8 E1NOX= 44.2
6. Нормообъем, [м.куб/ч] VNO= .400E+05
7. Удельный нормообъем [м.куб/(кВт.ч)] UVNO= .222E+02
8. Индекс концентрации NO, ИКР= .169E+02
9. Удельное выделение NO, приведенное к CO, [г/(кВт.ч)] QE= 3.52
10. Часовые выделения отработавших газов:
(влажные ПС) - Vol= .1704E+05 [н.м.куб] Gог= .2199E+05 [кг]
(сухие ПС) - Vol= .1659E+05 [н.м.куб] Gог= .2163E+05 [кг].

С учетом топливных оксидов

Технико-гигиенические характеристики двигателя

Концентрация NO во влажных продуктах сгорания 409.1 ppm

1. Концентрация оксидов азота на выхлопе, % объемн. RNO= .04091
в пересчете на NO2 и N2O5: RNOX= .04091, RN2O5= .02046
то же в мг/норм.м.куб. CNO= 548.2 в пересчете на NO2 и N2O5
CNOX= 838.6 CN2O5= 986.1

Концентрация NO в сухих продуктах сгорания 426.5 ppm

1. Концентрация оксидов азота на выхлопе, % объемн. RNO= .04265
в пересчете на NO2 и N2O5: RNOX= .04266, RN2O5= .02133
то же в мг/норм.м.куб. CNO= 571.6 в пересчете на NO2 и N2O5
CNOX= 874.4 CN2O5= 1028.2
2. Выделение NO, [г/час] ENO= .103E+05
в пересчете на NO2 ENOX= .158E+05
3. Выделение NO, [мг/(цикл*цилиндр)] GNO= 114.34
4. Удельное выделение, [г/(кВт.ч)] EUNO= 5.72 EUNOX= 8.76
5. Относит. выделение, [г/(кг топлива)] E1NO= 31.2 E1NOX= 47.8
6. Нормообъем, [м.куб/ч] VNO= .433E+05
7. Удельный нормообъем [м.куб/(кВт.ч)] UVNO= .241E+02
8. Индекс концентрации NO, ИКР= .183E+02
9. Удельное выделение NO, приведенное к CO, [г/(кВт.ч)] QE= 3.81
10. Часовые выделения отработавших газов:
(влажные ПС) - Vol= .1704E+05 [н.м.куб] Gог= .2199E+05 [кг]
(сухие ПС) - Vol= .1659E+05 [н.м.куб] Gог= .2163E+05 [кг].

Конец варианта

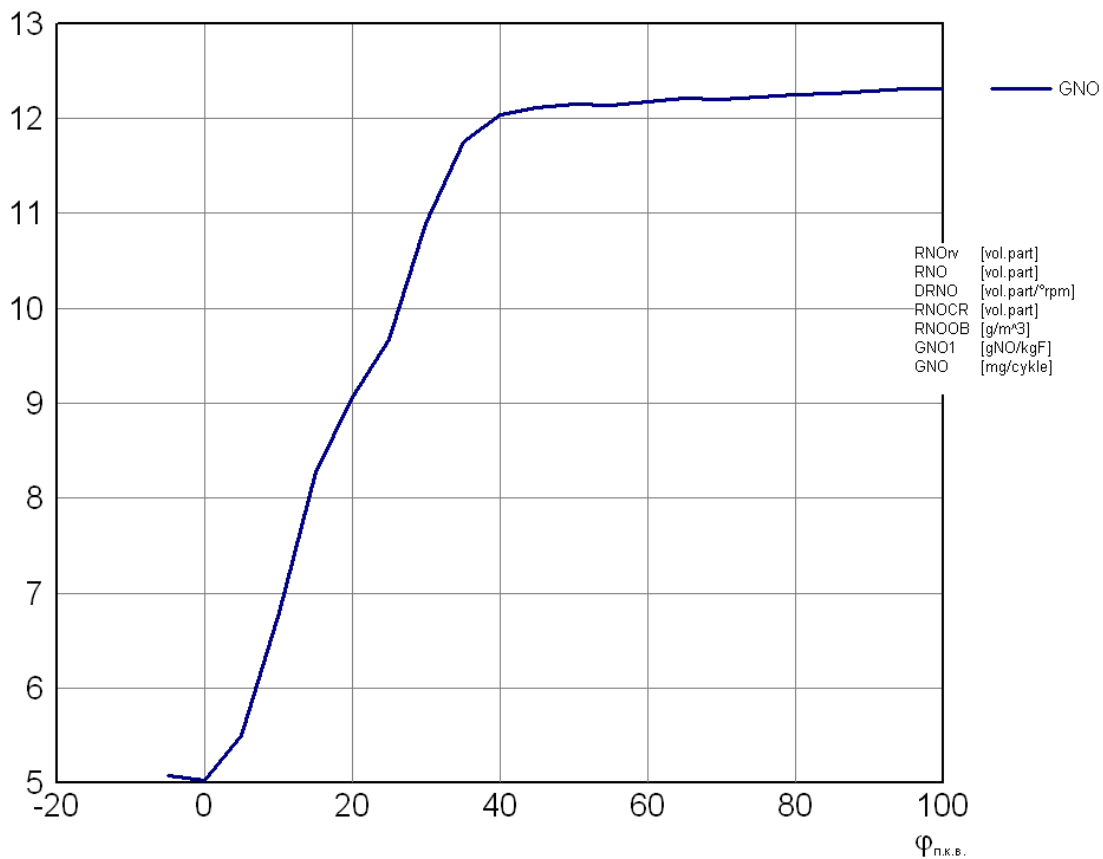


Рис. 4.7. График нарастания концентрации оксидов азота в цилиндре двухтактного судового дизеля, мг/цикл построенный встроенным постпроцессором

Список необходимых дополнительных исходных данных к расчету результирующего сажевыделения, см. таблицу 4.7. Введенные исходные данные записаны препроцессором в файл Szi006.dat. Содержимое файла показано ниже.

Содержимое файла исходных данных Szi006.dat

```

BMZ 6S26MC
*** Variant 006 ***
0.8000 0.1500 0.0500 ! KP, KN, KA
2.500 0.005 0.400 0.550 ! B1, B2, B3, ALC
0.4500 12 2 ! DSOP, ISOP, IGC
-12.00 24.00 11 ! FIHPT, FIBPR, IPF
120.0 260.0 340.0 360.0 380.0
400.0 400.0 400.0 350.0 250.0
140.0 ! PF(I), I=1, IPF

```

```

0.0000 0.1300 0.2600 0.3500 0.4500
0.5500 0.6500 0.7500 0.8500 0.9400
1.0000 ! ZTP(I), I=1,IPF
C:\ALFA\| | RP-TOX 2018_2\Work RP-TOX-2018\!ЁшьхЁv
Ёрёухёр\6_2Е_фшчхы№_26 эр 98_ёефютющ\ind006.dat

```

При выполнении расчета программа выгружает файл протокола расчета типа Szh006.txt и файл типа Szg006.dat, содержащий информацию для построения графиков. Содержимое файла протокола расчета приведено ниже, график изменения концентрации сажи приведен на рис. 4.8.

Содержимое файла протокола расчета Szh006.txt

```

BMZ 6S26MC
*** Variant 006 ***

```

Расчет процесса результирующего сажевыделения в цилиндре дизеля.

Исходные данные

```

D= .260, S= .980 [м]; LAMDA= .2500 Степень сжатия = 18.00
NE= 1800.1 [кВт] Ицил = 6 ТАКТ= 2. N= 250.0 [1/мин]
GT= 55.00 [кг/ч] GC= .3667E-02 [кг] GR= .0341 PROD= 1.577
FI нач.стор.= -10.50 PA= 2.0980 [бар] TA= 334.0 [K] FIA= -120.0
ALFA обр.сажи= .550 ALFA сум.= 2.862 FIB отк.вып. кл-на= 130.0
FI нач.табл.= -10.0 DFIT шаг табл.= 5.00 Шаг печати = 5.0 IT= 28
B1= 2.500 B2= .005 B3= .400
DSOP= .4500 [мм] ISOP= 12 FIPRT=-12.00 FIBPR= 24.00 [град.]
Парафины= .8000 Нафтены= .1500 Ароматики= .0500
C= .8800 H= .1200 O= .0000 N= .0150 QH= 44.5 [мДж/кг] Молек.вес= 190.0

```

Давление газов :

```

69.8110 85.7321 103.1210 118.1134 124.1280 119.2373 106.5550
90.5179 74.5220 60.4026 48.7790 39.5948 32.4740 26.9883
22.7410 19.4248 16.8040 14.7102 13.0190 11.6403 10.5050
9.5636 8.7770 8.1165 7.5590 7.0862 6.6840 6.3412

```

Закон выделения теплоты :

```

.0005 .0265 .0944 .2125 .3661 .5306 .6807
.7993 .8809 .9299 .9555 .9672 .9719 .9735
.9739 .9741 .9741 .9741 .9741 .9741 .9741
.9741 .9741 .9741 .9741 .9741 .9741 .9741

```

Закон подачи топлива :

```

.1025 .3426 .5500 .7584 .9540 1.0000 1.0000
1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000
1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000
1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000

```

Относительная доля испарившегося топлива :

.0615	.2056	.3300	.5806	.7813	.8912	.9738
.9997	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Давление топлива перед форсункой PF(I), [МПа]
 [FI начала таблицы PF(I)= -12.0] Шаг табл.= 2.4

12.2324	26.5036	34.6585	36.6972	38.7360	40.7747	40.7747
40.7747	35.6779	25.4842	14.2712			

Результаты расчета процесса сажеобразования.

FI	P	T обр	T выг	X	NTсум [г/кг]	CMсрo [г/м3]
-5.00	85.73	2071.8	2533.8	.0265	.9138E+01	.1052E+02
.00	103.08	2106.8	2563.8	.0942	.8316E+02	.9962E+02
5.00	118.04	2130.9	2582.2	.2116	.2066E+03	.2380E+03
10.00	124.13	2142.2	2592.4	.3660	.2519E+03	.2599E+03
15.00	119.28	2208.8	2707.4	.5299	.2460E+03	.2168E+03
20.00	106.63	2309.3	2888.5	.6800	.2334E+03	.1709E+03
25.00	90.64	2339.3	2960.7	.7986	.2104E+03	.1271E+03
30.00	74.57	2311.3	2940.1	.8807	.1829E+03	.9117E+02
35.00	60.47	2244.1	2855.2	.9297	.1614E+03	.6701E+02
40.00	48.80	2155.5	2734.7	.9555	.1427E+03	.4983E+02
45.00	39.59	2060.6	2602.8	.9672	.1242E+03	.3698E+02
50.00	32.47	1968.0	2473.9	.9719	.1088E+03	.2793E+02
55.00	26.99	1895.4	2375.0	.9735	.9667E+02	.2166E+02
60.00	22.74	1874.3	2355.0	.9739	.8735E+02	.1728E+02
65.00	19.42	1856.2	2337.9	.9741	.7995E+02	.1410E+02
70.00	16.80	1839.1	2320.8	.9741	.7400E+02	.1175E+02
75.00	14.71	1825.1	2307.4	.9741	.6914E+02	.9972E+01
80.00	13.02	1815.5	2299.7	.9741	.6510E+02	.8598E+01
85.00	11.64	1802.3	2285.6	.9741	.6169E+02	.7518E+01
90.00	10.51	1792.0	2275.0	.9741	.5880E+02	.6658E+01
95.00	9.56	1783.9	2267.4	.9741	.5630E+02	.5962E+01
100.00	8.78	1776.2	2259.7	.9741	.5410E+02	.5391E+01
105.00	8.12	1768.9	2252.1	.9741	.5216E+02	.4918E+01
110.00	7.56	1761.8	2244.4	.9741	.5042E+02	.4522E+01
115.00	7.09	1755.0	2236.8	.9741	.4886E+02	.4188E+01
120.00	6.68	1750.2	2232.1	.9741	.4745E+02	.3905E+01
125.00	6.68	1750.2	2232.1	.9741	.4611E+02	.3659E+01

Концентрация сажи на выхлопе СВХ= 1.3044 [г/м3]
 Дымность отработавших газов [%] по приборам:
 Хартридж= 96.0 Бош= 89.7 ИД-1= 89.7
 По ГОСТ 17.2.2.02-86: N= 81.1 [%] K= 3.874 [1/м]

Технико-гигиенические показатели двигателя.

А. Показатели по выбросам сажи.

1. Относительное выделение сажи E1C, [г/кг]	46.11
2. Массовая концентрация сажи CD, [г/м**3]	1.2629
3. Часовые выделения ЕС, [г/час]	15216.9
4. Цикловое выделение ВС, [мг/цикл]	169.0764

5. Удельное выделение EUD, [г/кВт*ч]	8.45
6. Нормообъем по ПДК.СС=.05 мг/м ³ , [м ³ /ч]	.3043E+09
7. Индекс концентрации по ПДК.СС, КР	.2526E+05
8. Удельный нормообъем UVH, [м ³ /кВт*ч]	.1691E+06
9. Удельн. выделение приведен. к СО, [г/кВт*ч]	.5072E+03

Б. Показатели по выбросам бенз/а/пирена (БАП).

1. Относительное выделение БАП Е1Б, [мкг/кг]	151.51
2. Массовая концентрация БАП СБ, [мкг/м ³]	4.1495
3. Часовое выделение БАП ЕБ, [мг/час]	50.00
4. Цикловое выделение БАП ВБ, [мкг/цикл]	.5555E+00
5. Удельное выделение EUD, [мг/кВт*ч]	27.78
6. Нормообъем по ПДК.СС=1E-6 мг/м ³ , [м ³ /ч]	.5000E+08
7. Индекс концентрации по ПДК.СС, КР	.4150E+04
8. Удельный нормообъем UVH, [м ³ /кВт*ч]	.2778E+05
9. Удельн. выделение приведен. к СО, [г/кВт*ч]	.8333E+02

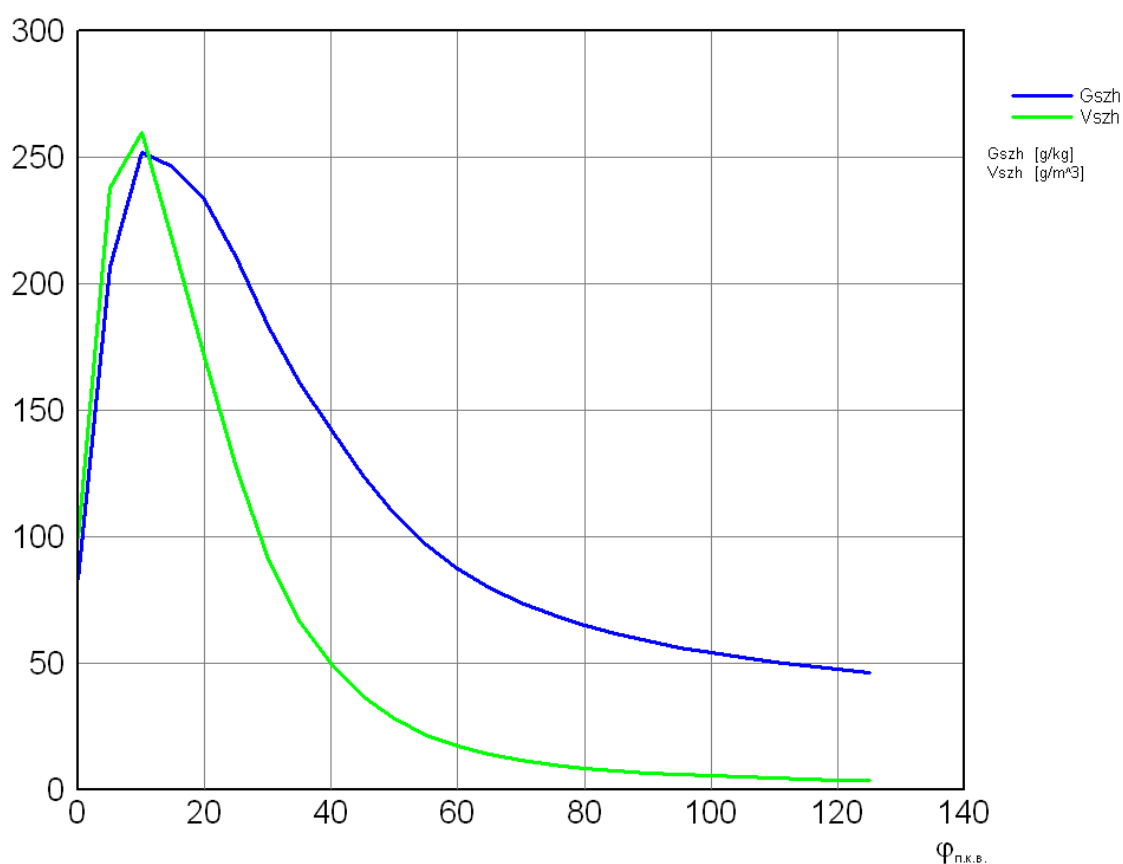


Рис. 4.8. График изменения концентрации сажи, г/кг рабочего тела и в г/м³, построенный встроенным постпроцессором

Основные результаты расчета токсичности ОГ малооборотного двухтактного дизельного двигателя сведены в таблицу 4.9.

Таблица 4.9. Расчетные показатели токсичности ОГ двухтактного судового дизельного двигателя (по протоколам расчета рабочего процесса, оксидов азота и выбросов сажи)

Компоненты ОГ	Удельные выбросы, кг/кВт·ч	Концентрация в сухих ОГ
Углекислый газ CO_2	0,594	5,34 % об.
Угарный газ CO	$0,198 \cdot 10^{-3}$	28 ppm
Диоксид серы SO_2	$1,184 \cdot 10^{-3}$	114 ppm
Углеводороды CH	$0,308 \cdot 10^{-3}$	16 ppm
Оксид азота NO	$5,720 \cdot 10^{-3}$	426 ppm
Сажа C	$8,450 \cdot 10^{-3}$	1,263 г/м ³
Бенз(а)пирен $C_{20}H_{12}$	$2,788 \cdot 10^{-5}$	4,149 мкг/м ³

По результатам расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Расчетные концентрации таких токсичных компонентов ОГ CO_2 , CO , CH и NO находятся на достаточно невысоком уровне при относительно высоком уровне форсирования рабочего процесса, поскольку у двигателя большой коэффициент продувки.

2. Содержание диоксида серы SO_2 получено на относительно высоком уровне, поскольку в расчете использованы параметры мазута, содержание серы в котором 0,5 %.

3. Выбросы сажи и бенз(а)пирена высоки, и соответствуют высоконагруженному режиму работы двигателя с относительно невысоким коэффициентом избытка воздуха (1,81) при работе на тяжелом топливе. Полученное в расчете значение коэффициента ослабления $K = 3,87$ 1/м соответствует оптически малопрозрачной среде, т.е. двигатель фактически «дымит». Если это не совсем так, можно изменить настройку этого режима работы, должным образом подобрав коэффициенты B_1 , B_2 , B_3 , а также ALC.

4. Полученные значения удельных выбросов достаточно высоки, соответствуют номинальному режиму работы судового дизельного двигателя при работе на мазуте.

4.7.4. Малооборотный двухтактный газовый двигатель

Для примера расчета использованы данные рабочего процесса судового двигателя MAN B&W марки S26MC, в предположении перевода его на газ, см. параграф 3.2.7. Для данного двигателя рассчитываются только содержание в ОГ оксидов азота.

Все исходные данные, используемые программой расчета выбросов оксидов азота находятся в файле Ind007.dat. При выполнении расчета программа выгружает файл протокола расчета NOx007.txt, где 007 – номер варианта расчета, и файл eNO007.dat, содержащий информацию для построения графиков. Содержимое файла протокола расчета приведено ниже.

Содержимое файла протокола расчета NOx007.txt

MAN B&WS26MC

*** Variant 007 ***

Расчет процесса образования оксидов азота в цилиндре двигателя

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

D= .260, S= .980 [м];	Lamda= .2500	Степень сжатия = 13.00
Ne= 2381.3 [кВт]	Iцил = 6 Такт= 2.	N= 250.0 [1/мин]
Gt= 70.08 [кг/ч]	Gc= .4672E-02 [кг]	Gr= .0411 Prod= 1.404
Fi нач.стоп.= -20.00	Pa= .1782 [МПа]	Ta= 328.7 [K] Fia= -120.0
Alfa cr.= 1.400	Alfa сум.= 1.965	CNOx0= 2000.0 [мг/м.куб.]
Fi нач.табл.= -25.0	DfiT шаг табл.= 5.00	Шаг печати = 5.0 JT= 26
C= .750 H= .250	O= .000 N= .00020	Qн= 48500.0 Mu= 16.0

FI	P	T	X	FI	P	T	X
-25.00	2.28	687.31	.0000	-20.00	2.82	728.78	.0010
-15.00	3.46	772.63	.0030	-10.00	4.27	839.50	.0131
-5.00	5.34	1917.85	.0436	.00	6.61	1974.39	.1003
5.00	7.87	2003.05	.1863	10.00	8.80	2002.63	.2992
15.00	9.17	1977.55	.4304	20.00	8.98	2191.74	.5667
25.00	8.36	2377.22	.6934	30.00	7.48	2490.74	.7985
35.00	6.51	2533.91	.8761	40.00	5.56	2518.53	.9268
45.00	4.71	2461.88	.9559	50.00	3.98	2381.74	.9704
55.00	3.38	2292.63	.9767	60.00	2.89	2204.03	.9790
65.00	2.50	2120.83	.9798	70.00	2.18	2044.77	.9799
75.00	1.93	1975.94	.9800	80.00	1.72	1913.80	.9800
85.00	1.54	1857.66	.9800	90.00	1.40	1806.89	.9800
95.00	1.28	1760.90	.9800	100.00	1.18	1719.19	.9800

M0= .5952 [кмоль/кг]	L0= 17.24 [кг/кг]	Va= .4583E-01 [м.куб]
MA= PA*VA/(R*TA) = .8656E-01 [кг/цикл]	Alд=MA/(L0*QC) = 1.032	

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Идентификация результатов расчета:

- FI- угол поворота коленчатого вала, град. п.к.в.
- RNOравн- равновесная концентрация NO в зоне ПС, об. доля
- RNO- текущая объемная концентрация NO в зоне ПС, об. доля
- DRNO- скорость изменения концентрации NO в зоне ПС, об. доля/град. п.к.в.
- RNOCR- средняя объемная концентрация NO в цилиндре, об. доля
- RNOOB- средняя массовая концентрация NO в цилиндре, г/м.куб.
- GNO1- относительная масса NO, г NO/кг топлива
- GNO- массовое содержание NO в цилиндре, мг/цикл

Данные во второй строке для процесса образования NO с учетом азота топлива

FI	RNOравн	RNO	DRNO	RNOCR	RNOOB	GNO1	GNO
-15.0	.1000E-11	.0000E+00	.0000E+00	.3835E-04	1.203	1.401	6.55
	.1000E-11	.0000E+00	.0000E+00	.3835E-04	1.203	1.401	6.55
-10.0	.1000E-11	.0000E+00	.0000E+00	.3807E-04	1.346	1.391	6.50
	.1000E-11	.0000E+00	.0000E+00	.3807E-04	1.346	1.391	6.50
-5.0	.1000E-11	.1409E-04	.3357E-05	.3769E-04	1.442	1.377	6.43
	.1000E-11	.2262E-04	.5387E-05	.3795E-04	1.452	1.386	6.48
.0	.9351E-03	.2613E-04	.2005E-05	.3757E-04	1.479	1.372	6.41
	.9351E-03	.3992E-04	.2748E-05	.3853E-04	1.517	1.408	6.58
5.0	.1096E-02	.3734E-04	.2193E-05	.3829E-04	1.465	1.399	6.54
	.1096E-02	.5398E-04	.2594E-05	.4045E-04	1.548	1.478	6.91
10.0	.1183E-02	.4935E-04	.2024E-05	.4071E-04	1.439	1.487	6.95
	.1183E-02	.6759E-04	.2276E-05	.4453E-04	1.574	1.627	7.60
15.0	.1181E-02	.5594E-04	.1269E-05	.4370E-04	1.371	1.596	7.46
	.1181E-02	.7530E-04	.1445E-05	.4952E-04	1.554	1.809	8.45
20.0	.1104E-02	.7367E-04	.9134E-05	.5239E-04	1.423	1.914	8.94
	.1104E-02	.9062E-04	.6754E-05	.5910E-04	1.605	2.159	10.09
25.0	.1880E-02	.4579E-03	.1087E-03	.2418E-03	5.614	8.838	41.29
	.1880E-02	.4204E-03	.7714E-04	.2236E-03	5.191	8.172	38.18
30.0	.2871E-02	.2093E-02	.2144E-03	.1186E-02	23.474	43.395	202.76
	.2871E-02	.1950E-02	.1865E-03	.1106E-02	21.888	40.463	189.06
35.0	.3737E-02	.3559E-02	.6872E-04	.2198E-02	37.172	80.483	376.04
	.3737E-02	.3525E-02	.7223E-04	.2177E-02	36.818	79.715	372.45
40.0	.4167E-02	.4087E-02	.1614E-04	.2666E-02	38.766	97.696	456.47
	.4167E-02	.4088E-02	.1808E-04	.2666E-02	38.774	97.714	456.55
45.0	.4071E-02	.4023E-02	-.2163E-04	.2705E-02	34.078	99.153	463.28
	.4071E-02	.4023E-02	-.2833E-04	.2705E-02	34.071	99.134	463.19
50.0	.3609E-02	.3701E-02	-.2087E-04	.2526E-02	27.795	92.536	432.36
	.3609E-02	.3691E-02	-.2424E-04	.2519E-02	27.718	92.279	431.16
55.0	.3015E-02	.3412E-02	-.2835E-04	.2344E-02	22.735	85.810	400.94
	.3015E-02	.3385E-02	-.3284E-04	.2325E-02	22.554	85.126	397.74
60.0	.2452E-02	.3246E-02	-.1955E-04	.2235E-02	19.280	81.753	381.98
	.2452E-02	.3205E-02	-.2397E-04	.2207E-02	19.037	80.722	377.16
65.0	.1985E-02	.3167E-02	-.9908E-05	.2182E-02	16.895	79.778	372.75
	.1985E-02	.3117E-02	-.1274E-04	.2148E-02	16.632	78.538	366.96
70.0	.1618E-02	.3133E-02	-.4418E-05	.2159E-02	15.131	78.906	368.68
	.1618E-02	.3079E-02	-.5875E-05	.2122E-02	14.873	77.561	362.39
75.0	.1332E-02	.3119E-02	-.1893E-05	.2149E-02	13.744	78.532	366.93
	.1332E-02	.3063E-02	-.2564E-05	.2111E-02	13.500	77.138	360.42
80.0	.1107E-02	.3113E-02	-.8158E-06	.2145E-02	12.610	78.369	366.16
	.1107E-02	.3056E-02	-.1108E-05	.2106E-02	12.383	76.955	359.56
85.0	.1000E-11	.3113E-02	-.9171E-10	.2144E-02	11.671	78.342	366.04
	.1000E-11	.3056E-02	-.8933E-10	.2106E-02	11.460	76.928	359.43
90.0	.7824E-03	.3112E-02	-.1682E-06	.2144E-02	10.874	78.324	365.96
	.7824E-03	.3055E-02	-.2217E-06	.2105E-02	10.677	76.908	359.34

95.0	.6652E-03	.3111E-02	-.8182E-07	.2143E-02	10.192	78.307	365.88
	.6652E-03	.3054E-02	-.1049E-06	.2104E-02	10.008	76.889	359.25
100.0	.1000E-11	.3111E-02	.0000E+00	.2143E-02	9.609	78.298	365.84
	.1000E-11	.3054E-02	.0000E+00	.2104E-02	9.435	76.880	359.21

Число делений пополам(+) или удвоений(-) нач. шага интегрирования: IHFL= -3

Технико-гигиенические характеристики двигателя

Концентрация NO во влажных продуктах сгорания 999.1 ppm

1. Концентрация оксидов азота на выхлопе, % объемн. RNO= .09991
в пересчете на NO2 и N2O5: RNOX= .09996, RN2O5= .05002
то же в мг/норм.м.куб. CNO= 1338.8 в пересчете на NO2 и N2O5
CNOX= 2049.3 CN2O5= 2411.7

Концентрация NO в сухих продуктах сгорания 1115.6 ppm

1. Концентрация оксидов азота на выхлопе, % объемн. RNO= .11156
в пересчете на NO2 и N2O5: RNOX= .11163, RN2O5= .05586
то же в мг/норм.м.куб. CNO= 1495.0 в пересчете на NO2 и N2O5
CNOX= 2288.4 CN2O5= 2693.0
2. Выделение NO, [г/час] ENO= .287E+05
в пересчете на NO2 ENOX= .440E+05
3. Выделение NO, [мг/(цикл*цилиндр)] GNO= 318.77
4. Удельное выделение, [г/(кВт.ч)] EUNO= 12.05 EUNOX= 18.47
5. Относит. выделение, [г/(кг топлива)] E1NO= 68.2 E1NOX= 104.6
6. Нормообъем, [м.куб/ч] VNO= .108E+07
7. Удельный нормообъем [м.куб/(кВт.ч)] UVNO= .453E+03
8. Индекс концентрации NO, ИКР= .446E+02
9. Удельное выделение NO, приведенное к CO, [г/(кВт.ч)] QE= 8.03
10. Часовые выделения отработавших газов:
(влажные ПС) - Vol= .2143E+05 [н.м.куб] Gог= .2725E+05 [кг]
(сухие ПС) - Vol= .2023E+05 [н.м.куб] Gог= .2628E+05 [кг].

С учетом топливных оксидов

Технико-гигиенические характеристики двигателя

Концентрация NO во влажных продуктах сгорания 1009.1 ppm

1. Концентрация оксидов азота на выхлопе, % объемн. RNO= .10091
в пересчете на NO2 и N2O5: RNOX= .10096, RN2O5= .05053
то же в мг/норм.м.куб. CNO= 1352.2 в пересчете на NO2 и N2O5
CNOX= 2069.8 CN2O5= 2435.8

Концентрация NO в сухих продуктах сгорания 1126.8 ppm

1. Концентрация оксидов азота на выхлопе, % объемн. RNO= .11268
в пересчете на NO2 и N2O5: RNOX= .11274, RN2O5= .05642
то же в мг/норм.м.куб. CNO= 1509.9 в пересчете на NO2 и N2O5
CNOX= 2311.2 CN2O5= 2720.0
2. Выделение NO, [г/час] ENO= .290E+05
в пересчете на NO2 ENOX= .444E+05
3. Выделение NO, [мг/(цикл*цилиндр)] GNO= 321.95
4. Удельное выделение, [г/(кВт.ч)] EUNO= 12.17 EUNOX= 18.65
5. Относит. выделение, [г/(кг топлива)] E1NO= 68.9 E1NOX= 105.6
6. Нормообъем, [м.куб/ч] VNO= .109E+07
7. Удельный нормообъем [м.куб/(кВт.ч)] UVNO= .457E+03
8. Индекс концентрации NO, ИКР= .451E+02
9. Удельное выделение NO, приведенное к CO, [г/(кВт.ч)] QE= 8.11

10. Часовые выделения отработавших газов:
 (влажные ПС) - $V_{ог} = .2143E+05$ [н.м.куб] $G_{ог} = .2725E+05$ [кг]
 (сухие ПС) - $V_{ог} = .2023E+05$ [н.м.куб] $G_{ог} = .2628E+05$ [кг].

Конец варианта

Основные результаты расчета токсичности ОГ малооборотного двух-
 тактного газового двигателя сведены в таблицу 4.10.

Таблица 4.10. Расчетные показатели токсичности ОГ
 двухтактного судового газового двигателя
 (по протоколам расчета рабочего процесса и оксидов азота)

Компоненты ОГ	Удельные выбросы, кг/кВт·ч	Концентрация в сухих ОГ
Углекислый газ CO_2	0,351	5,64 % об.
Угарный газ CO	$0,308 \cdot 10^{-3}$	78 <i>ppm</i>
Диоксид серы SO_2	$2,554 \cdot 10^{-6}$	0 <i>ppm</i>
Углеводороды CH	$1,047 \cdot 10^{-3}$	267 <i>ppm</i>
Оксид азота NO	$12,17 \cdot 10^{-3}$	1127 <i>ppm</i>

По результатам расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Удельные выбросы углекислого газа CO_2 в газовом варианте двигателя практически в 2 раза ниже, чем в дизельном (см. таблицу 4.9) при практически том же объемном содержании их в ОГ (что объясняется более низким коэффициентом избытка воздуха при сгорании).

2. Расчетные концентрации токсичных компонентов CO , CH и NO и их удельные выбросы существенно выше, чем в дизельном варианте двигателя, что объясняется особенностями рабочего процесса газового двигателя и связано как с меньшим избытком воздуха при сгорании, так и с более высокими рабочими температурами в цикле.

3. Содержание диоксида серы SO_2 близко к нулевому значению, поскольку содержание серы в газовом топливе задано на уровне 10 *ppm*.

4.7.5. Среднеоборотный четырехтактный газодизель

Для примера расчета использованы данные рабочего процесса судового двигателя MAN 632/40G, в предположении, что двигатель переведен на газодизельный процесс, см. параграф 3.2.8. Для данного двигателя рассчитываются только содержание в ОГ оксидов азота (считается, что доля запального дизельного топлива мала и не дает существенных выбросов сажистых частиц).

Все исходные данные, используемые программой расчета выбросов оксидов азота находятся в файле Ind008.dat. При выполнении расчета программа выгружает файл протокола расчета NOx008.txt, где 008 – номер варианта расчета, и файл eNO008.dat, содержащий информацию для построения графиков. Содержимое файла протокола расчета приведено ниже.

Содержимое файла протокола расчета NOx008.txt

MAN 632/40G Gas-Diesel
*** Variant 008 ***

Расчет процесса образования оксидов азота в цилиндре двигателя

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

D= .320, S= .400 [м];	Lamda= .2300	Степень сжатия = 11.00
Ne= 2766.0 [кВт]	Цилл = 6 Takt= 4.	N= 750.0 [л/мин]
Gt= 85.00 [кг/ч]	Gc= .3778E-02 [кг]	Gr= .0166 Prod= 1.032
Fi нач.стоп.= -18.00	Pa= .2984 [МПа]	Ta= 363.1 [К] Fia= -130.0
Alfa cr.= 1.352	Alfa сум.= 1.395	CNOx0= 2000.0 [мг/м.куб.]
Fi нач.табл.= -20.0	DfiT шаг табл.= 5.00	Шаг печати = 5.0 JT= 25
C= .758 H= .238	O= .005 N= .00000	Qn= 47680.0 Mu= 26.2

FI	P	T	X	FI	P	T	X
-20.00	4.44	752.13	.0000	-15.00	5.27	788.50	.0010
-10.00	6.19	837.77	.0084	-5.00	7.26	2369.26	.0325
.00	8.43	2413.94	.0788	5.00	9.55	2445.83	.1503
10.00	10.40	2462.85	.2459	15.00	10.81	2462.62	.3599
20.00	10.73	2443.48	.4832	25.00	10.23	2414.15	.6048
30.00	9.44	2372.13	.7147	35.00	8.49	2319.29	.8053
40.00	7.50	2276.27	.8735	45.00	6.55	2210.79	.9203
50.00	5.68	2131.33	.9494	55.00	4.93	2077.34	.9657
60.00	4.29	2009.75	.9740	65.00	3.75	1946.09	.9777
70.00	3.31	1887.00	.9792	75.00	2.94	1833.07	.9798
80.00	2.64	1783.90	.9799	85.00	2.38	1739.35	.9800
90.00	2.17	1698.96	.9800	95.00	2.00	1662.44	.9800

M0= .5834 [кмоль/кг]	L0= 16.89 [кг/кг]	Va= .3074E-01 [м.куб]
MA= PA*VA/(R*TA) = .8800E-01 [кг/цикл]	Alд=MA/(L0*QC) = 1.356	

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Идентификация результатов расчета:

FI- угол поворота коленчатого вала, град. п.к.в.
 RNOравн- равновесная концентрация NO в зоне ПС, об. доля
 RNO- текущая объемная концентрация NO в зоне ПС, об. доля
 DRNO- скорость изменения концентрации NO в зоне ПС, об. доля/град. п.к.в.
 RNOCR- средняя объемная концентрация NO в цилиндре, об. доля
 RNOOB- средняя массовая концентрация NO в цилиндре, г/м.куб.
 GNO1- относительная масса NO, г NO/кг топлива
 GNO- массовое содержание NO в цилиндре, мг/цикл

FI	RNOравн	RNO	DRNO	RNOCR	RNOOB	GNO1	GNO
-10.0	.2943E-02	.3626E-05	.1206E-06	.1579E-04	.421	.392	1.48
-5.0	.1653E-02	.3435E-04	.3254E-04	.1649E-04	.470	.409	1.55
.0	.8199E-02	.2301E-02	.2679E-03	.1941E-03	5.667	4.826	18.23
5.0	.8897E-02	.3863E-02	.3324E-03	.5870E-03	16.782	14.625	55.25
12.5	.9412E-02	.6343E-02	.2145E-03	.1890E-02	48.466	47.275	178.60
17.5	.9713E-02	.7224E-02	.1123E-03	.2992E-02	68.696	75.081	283.64
22.5	.9565E-02	.7453E-02	.2712E-04	.3977E-02	80.260	100.124	378.25
27.5	.9153E-02	.7306E-02	-.2241E-04	.4717E-02	82.863	119.101	449.94
32.5	.8601E-02	.6973E-02	-.6696E-04	.5173E-02	78.865	130.937	494.65
37.5	.7837E-02	.6547E-02	-.5983E-04	.5351E-02	70.904	135.695	512.62
42.5	.1000E-11	.6132E-02	-.6337E-04	.5342E-02	61.739	135.517	511.95
47.5	.1000E-11	.5888E-02	-.3618E-04	.5337E-02	54.187	135.517	511.95
52.5	.5438E-02	.5743E-02	-.2040E-04	.5326E-02	47.874	135.396	511.50
57.5	.4661E-02	.5661E-02	-.1112E-04	.5312E-02	42.567	135.077	510.29
62.5	.1000E-11	.5628E-02	-.4203E-05	.5311E-02	38.211	134.986	509.95
67.5	.3363E-02	.5610E-02	-.2330E-05	.5306E-02	34.575	134.936	509.76
72.5	.2828E-02	.5602E-02	-.9449E-06	.5304E-02	31.512	134.867	509.50
77.5	.1000E-11	.5600E-02	-.1866E-06	.5304E-02	28.925	134.806	509.27
82.5	.1000E-11	.5600E-02	-.5282E-07	.5304E-02	26.740	134.806	509.27
87.5	.1730E-02	.5599E-02	-.8900E-07	.5303E-02	24.884	134.845	509.42
92.5	.1639E-02	.5599E-02	-.7476E-07	.5303E-02	23.286	134.835	509.38
97.5	.1655E-02	.5598E-02	-.6762E-07	.5303E-02	21.913	134.827	509.35
102.5	.1639E-02	.5598E-02	-.6843E-07	.5302E-02	20.730	134.819	509.32

Число делений пополам(+) или удвоений(-) нач. шага интегрирования: INFL= -3

Технико-гигиенические характеристики двигателя

Концентрация NO во влажных продуктах сгорания 2561.7 ppm

- Концентрация оксидов азота на выхлопе, % объемн. RNO= .25617
 в пересчете на NO2 и N2O5: RNOX= .25683, RN2O5= .12892
 то же в мг/норм.м.куб. CNO= 3432.7 в пересчете на NO2 и N2O5
 CNOX= 5265.0 CN2O5= 6215.0

Концентрация NO в сухих продуктах сгорания 2985.6 ppm

- Концентрация оксидов азота на выхлопе, % объемн. RNO= .29856
 в пересчете на NO2 и N2O5: RNOX= .29933, RN2O5= .15025
 то же в мг/норм.м.куб. CNO= 4000.7 в пересчете на NO2 и N2O5
 CNOX= 6136.3 CN2O5= 7243.5
- Выделение NO, [г/час] ENO= .342E+05
 в пересчете на NO2 ENOX= .524E+05
- Выделение NO, [мг/(цикл*цилиндр)] GNO= 253.07
- Удельное выделение, [г/(кВт.ч)] EUNO= 12.35 EUNOX= 18.94
- Относит. выделение, [г/(кг топлива)] E1NO= 67.0 E1NOX= 102.7

6. Нормообъем, [м.куб/ч] $V_{NO} = .229E+07$
7. Удельный нормообъем [м.куб/(кВт.ч)] $UV_{NO} = .829E+03$
8. Индекс концентрации NO, ИКР= $.114E+03$
9. Удельное выделение NO, приведенное к CO, [г/(кВт.ч)] $QE = 8.23$
10. Часовые выделения отработавших газов:
(влажные ПС) - $V_{ог} = .9947E+04$ [н.м.куб] $G_{ог} = .1243E+05$ [кг]
(сухие ПС) - $V_{ог} = .8572E+04$ [н.м.куб] $G_{ог} = .1133E+05$ [кг].

Конец варианта

Основные результаты расчета токсичности ОГ среднеоборотного четырехтактного газодизельного двигателя сведены в таблицу 4.11.

Таблица 4.11. Расчетные показатели токсичности ОГ двухтактного судового газового двигателя (по протоколам расчета рабочего процесса и оксидов азота)

Компоненты ОГ	Удельные выбросы, кг/кВт·ч	Концентрация в сухих ОГ
Углекислый газ CO_2	0,512	8,34 % об.
Угарный газ CO	$1,432 \cdot 10^{-3}$	367 ppm
Диоксид серы SO_2	$3,702 \cdot 10^{-6}$	0 ppm
Углеводороды CH	$0,485 \cdot 10^{-3}$	139 ppm
Оксид азота NO	$12,35 \cdot 10^{-3}$	2986 ppm

По результатам расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Удельные выбросы углекислого газа CO_2 в газодизельном варианте двигателя ниже, чем в дизельном, (см. таблицу 4.9) при том, что концентрация этого газа в ОГ существенно выше (что объясняется более относительно низким коэффициентом избытка воздуха при сгорании).

2. Расчетные концентрации токсичных компонентов CO , CH и NO и их удельные выбросы существенно выше, чем в рассмотренных выше дизельных двигателях, что связано с меньшим избытком воздуха при сгорании, и с более высокими рабочими температурами в цикле.

3. Содержание диоксида серы SO_2 в данном расчете также близко к нулевому значению, поскольку содержание серы в газовом топливе задано на уровне 10 ppm.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

К ГЛАВАМ 1-3

1. **Галышев Ю.В.** Системы ДВС. Системы и процессы топливоподачи: учеб. пособие / Ю. В. Галышев, А. Б. Зайцев, А. Ю. Шабанов. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 266 с.
2. **Галышев Ю.В.** Химмотология. Эксплуатационные материалы для двигателей внутреннего сгорания : учеб. пособие / Ю. В. Галышев, А. Б. Зайцев, А. Ю. Шабанов. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 296 с.
3. ГОСТ 14846-81. Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 2003. 41 с.
4. ГОСТ 18509-88. Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1988. 70 с.
5. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей / Д.Н. Вырубов [и др.]; под. ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – М.: Машиностроение, 1983. 372 с.
6. **Колчин А.И.** Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. Пособие для вузов. / А.И. Колчин, В.П. Демидов. – М.: Высш. Школа, 2002. 496 с.: ил.
7. **Петриченко Р.М.** Физические основы внутрицилиндровых процессов в двигателях внутреннего сгорания. / Петриченко Р.М. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1983. 244 с.
8. Работа дизелей в условиях эксплуатации: Справочник / А.К. Костин, Б.П. Пугачев, Ю.Ю. Кочинев; под общ. ред. А.К. Костина. – Л.: Машиностроение, 1989. 284 с.: ил.
9. Расчет рабочего цикла и газообмена в поршневых ДВС: пособие по курсовому проектированию. / Ю.Н. Исаков, А.К. Костин, В.В. Ларионов; под ред. Н.Х. Дьяченко. – Л.: Изд-во ЛПИ, 1977. 82 с.
10. Теория двигателей внутреннего сгорания. Под ред. Н.Х. Дьяченко. – Л.: Машиностроение, 1974. 552 с.
11. Элементы системы автоматизированного проектирования ДВС: Алгоритмы прикладных программ. / Р.М. Петриченко, С.А. Батурин, Ю.Н. Исаков и др.; под общ. ред. Р.М. Петриченко. – Л.: Машиностроение, 1990. 328 с.: ил.

К ГЛАВЕ 4

12. Абаджаев С.С., Шевчук В.У. Кинетика реакций высокотемпературного превращения ацетилена // Газовая промышленность. – 1980, №8, с.33-38.
13. **Алемасов В.Е.** Теория ракетных двигателей. – М.: Оборонгиз, 1962. 476 с.
14. Батурин С.А., Лоскутов А.С., Степанов В.Н. Расчетное определение содержания окислов азота в отработавших газах ДВС: Метод. указания. – Л.: Изд. ЛПИ, 1989. 33 с.
15. Батурин С.А., Лоскутов А.С. Кинетический метод расчета процесса сажевыделения в дизеле // Совершенствование и развитие мобильных энергетических средств в сельском хозяйстве. – Чебоксары, 1983, с.12-15.
16. Введенский А.А. Термодинамические расчеты нефтехимических процессов. – Л.: Гостоптехиздат, 1960. 576 с.
17. **Возницкий И.В.** Судовые двигатели внутреннего сгорания, том 2 / И.В. Возницкий, А.С. Пунда. – М., Моркнига, 2008. – 470 с.
18. Горбунов В.В. Патрахальцев Н.Н. Трксичность двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие. – М.: изд-во РУДН, 1998. – 214 с., ил.
19. **Дьяченко В.Г.** Теория двигателей внутреннего сгорания. Учебник / В.Г. Дьяченко – пер. с укр. – Харьков, ХНАДУ, 2009. – 500 с.
20. Мехтиев Р.И., Повсянский В.С., Багиров Х.Б. К методу расчета равновесных концентраций продуктов сгорания топливо-воздушных смесей в ДВС. – Двигателестроение, 1980, №3, с. 13-15.
21. Мехтиев В.И. Расчет температуры и динамики образования NO в двигателях с неоднородным зарядом. – Двигателестроение, 1981, №4, с. 18-20.
22. Продукты сгорания природного газа / И.К. Карп, Б.С. Сорока, Л.Н. Дашевский, С.Ю. Семерина. – Киев: Техника, 1967. 382 с.
23. **Разлейцев Н.Ф.** Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях. – Харьков, Вища школа, 1980. – 169 с.
24. Свойства газов при высоких температурах / Под ред. А.С. Предводителя. – М.: Наука, 1967. 184 с.
25. Синярев Г.Б., Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. – М.: Оборонгиз, 1957. 580 с.
26. Смайлис В.И. Малотоксичные дизели – Л.: Машиностроение, 1972. 128 с.

27. Снижение Вредных выбросов автомобильных двигателей в атмосферу / Под ред. А.Л. Новоселова. – Барнаул: Изд. АлПИ, 1988. 98 с.
28. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: Справочник в 5-ти томах. Том I. / В.Е. Алемасов, А.Ф. Худяков, В.А. Худяков, А.П. Тишин. Под ред. В.П. Глушко. – М.: Изд-во АН СССР, 1971. 226 с.
29. Теснер П.А., Кнорре В.Г. Аналитическое описание процесса образования сажевых частиц при термическом разложении углеводородов // Физика горения и взрыва. – М., 1980, т.6, с.386-390.
30. Теснер П.А. Образование сажи при горении // Физика горения и взрыва. – М., 1979, т.15, с.3-14.
31. Щетинков Е.С. Физика горения газов. – М.: Наука, 1965. 740 с.
32. **ГОСТ Р 41.83-2004.** (Правила ЕЭК ООН № 83). Единообразные предписания, касающиеся сертификации транспортных средств в отношении выбросов вредных веществ в зависимости от топлива, необходимого для двигателей.
33. **ГОСТ Р 51249-99.** Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения.
34. **ГОСТ Р 51250-99.** Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Дымность отработавших газов. Нормы и методы определения (с изменением №1).
35. **ГОСТ Р 52408–2005** (ИСО 8178–2:1996). Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Часть 2. Измерения в условиях эксплуатации.
36. **ГОСТ ISO 8178-1-2013.** Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Часть 1. Измерение выбросов газов и частиц на испытательных стендах.
37. **Приложение VI** – Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов: Международная Конвенция МАРПОЛ 73/78, книга III. – СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 2005. – 200 с.
38. Руководство по техническому наблюдению за соблюдением технических нормативов выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух при изготовлении и эксплуатации судовых энергетических установок. – СПб.: Российский морской Регистр судоходства, 2010. – 97с.

П Р И Л О Ж Е Н И Е
Документ «Описание применения»
программно-методического комплекса «PR-ТОХ-2018»



УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе
ФГАОУ ВО «СПбПУ»

Сергеев В.В.

«17» декабря 2018 г.

**ПРОГРАММНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
«РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ И ТОКСИЧНОСТЬ ОГ СУДОВЫХ
ДИЗЕЛЬНЫХ И ГАЗОПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ»**

Описание применения

ЛИСТ УТВЕРЖДЕНИЯ

RU.02068574.02018-02 31-ЛУ

Научный руководитель,
зав. кафедрой ИСУТС
ФГАОУ ВО «СПбПУ»

Галышев Ю.В.

Ответственный исполнитель,
к.т.н, доцент

Шабанов А.Ю.

К.т.н., доцент

Зайцев А.Б.

К.т.н., инженер

Яксон И.А.

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата

УТВЕРЖДЕН

RU.02068574.02018-02 31-ЛУ

**ПРОГРАММНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
«РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ И ТОКСИЧНОСТЬ ОГ СУДОВЫХ
ДИЗЕЛЬНЫХ И ГАЗОПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ»**

RP-ТОХ-2018

Описание применения

RU.02068574.02018-02 31

Листов 136

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата

АННОТАЦИЯ

В данном программном документе приведено описание применения программно-методического комплекса «Рабочие процессы и токсичность ОГ судовых дизельных и газопоршневых двигателей» RU.02068574.02018-02 (далее «ПМК», «комплекс», «RP-TOX-2018» или «программа»), предназначенного для моделирования термодинамических процессов в цилиндре и выбросов вредных веществ с отработавшими газами (ОГ) дизельных и газопоршневых двигателей.

ПМК «RP-TOX-2018» разработан в рамках выполнения договоров № 272/17, от 18.12.2017 и № 401/18 от 10.09.2018, заказчик: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского», г. Владивосток; разработчик: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

К настоящему документу прилагаются:

- программно-методический комплекс «RP-TOX-2018» RU.02068574.02018-02, находящийся в каталоге ...\\Work RP-TOX-2018. Программы комплекса рассортированы по папкам: ...\\Work RP-TOX-2018\1_RP, ...\\Work RP-TOX-2018\2_NOx, ...\\Work RP-TOX-2018\3_SAZHA. В папках находятся также файлы исходных данных контрольных примеров расчета.

- база файлов исходных данных к расчетам рабочих процессов и параметров токсичности ОГ судовых дизельных и газопоршневых двигателей (по согласованию с заказчиком), находящаяся в каталоге ...\\MGU-2018.

Важно: в папке ...\\MGU-2018_RP-TOX находятся исполняемые модули комплекса, которые могут быть перенесены (вместе и по отдельности) в любую из имеющихся папок для выполнения расчетов.

СОДЕРЖАНИЕ

АННОТАЦИЯ.....	2
СОДЕРЖАНИЕ	3
1. НАЗНАЧЕНИЕ ПРОГРАММЫ.....	4
1.1. Назначение программы.....	4
1.2. Возможности программы.....	4
1.3. Основные характеристики программы.....	4
1.4. Программное обеспечение, необходимое для функционирования программы.....	5
1.5. Языки программирования, на которых написана программа	5
1.6. Ограничения, накладываемые на область применения программы.....	5
2. УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ.....	6
2.1. Требования к техническим (аппаратным) средствам	6
2.2. Требования к программным средствам (другим программам).....	6
2.3. Общие характеристики входной информации	6
2.4. Общие характеристики выходной информации.....	7
2.5. Требования и условия организационного характера	9
2.6. Требования и условия технического характера	9
2.7. Требования и условия технологического характера.....	9
3. ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ	10
3.1. Определение задачи	10
3.2. Методы решения задачи	12
4. ЗАПУСК И ВЫПОЛНЕНИЕ ПРОГРАММЫ.....	13
4.1. Загрузка и запуск.....	13
4.2. Выполнение программы расчета рабочего процесса.....	15
4.2.1. Общий ход подготовки данных и выполнения расчета.....	15
4.2.2. Выполнение функции моделирования рабочего процесса.....	40
4.3. Выполнение программы расчета процесса образования оксидов азота	52
4.4. Выполнение программы расчета процесса результирующего сажевыделения.....	56
4.5. Завершение работы программы	66
4.6. Сообщения о нештатной работе программы	66
4.7. Общие рекомендации по работе с программами комплекса	67
5. ВХОДНЫЕ И ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ	68
5.1. Сведения о входных данных	68
5.1.1. Исходные данные к расчету рабочих процессов.....	68
5.1.2. Исходные данные к расчету выбросов оксидов азота	84
5.1.3. Исходные данные к расчету результирующего сажевыделения	84
5.2. Организация используемой выходной информации.....	90
5.2.1. Выходные данные расчета рабочих процессов	90
5.2.2. Выходные данные расчета выбросов оксидов азота.....	119
5.2.3. Выходные данные расчета результирующего сажевыделения.....	128
ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ	136

1. НАЗНАЧЕНИЕ ПРОГРАММЫ

1.1. Назначение программы

Программный комплекс «RP-TOX-2018» предназначен для определения мгновенных значений термодинамических параметров рабочего тела (давления, температуры и массы) в объеме цилиндра, индикаторных и эффективных показателей рабочего цикла и выбросов вредных веществ (угарного газа CO, несгоревших углеводородов CН_x, двуокиси углерода CO₂ оксида серы SO₂, оксидов азота NO_x и сажистых частиц) с отработавшими газами дизельными и газопоршневыми двигателями.

1.2. Возможности программы

Программный комплекс «RP-TOX-2018» позволяет выполнять расчеты рабочих процессов поршневых двигателей произвольной размерности и типа смесеобразования. Расчет может производиться для любого скоростного и нагрузочного режима двигателя. Путем интегрирования мгновенных значений давлений и температур в цилиндре производится расчет полного комплекса индикаторных и эффективных показателей двигателя, средних и результирующих температур цикла, необходимых для задания граничных условий термического нагружения, максимальных давлений сгорания, необходимых для задания условий силового нагружения конструкции головки цилиндра, определяются составляющие теплового баланса.

Расчет параметров токсичности производится на основе рассчитанной индикаторной диаграммы. В случае расчета выбросов сажи требуется задание параметров топливоподачи.

Каждая отдельная программа-компонент комплекса для выполнения своих функций может быть использована как в составе ПМК, так и в автономном режиме.

1.3. Основные характеристики программы

Программный комплекс «RP-TOX-2018» состоит из семи программ-компонент:

- программы-препроцессора ПМК «RpTox2018.exe»;
- программы-препроцессора «Rp2018.exe»;
- программы-препроцессора «NOx2018.exe»;
- программы-препроцессора «Sazha2018.exe»;
- программы синтеза индикаторных диаграмм «Rp_2018.exe»;
- программы расчета процесса образования оксидов азота «NOx_2018.exe».
- программы расчета результирующего сажевыделения «SAZ_2018.exe».

Программа-препроцессор ПМК «RpTox2018.exe» при поставке находится в корневом каталоге папки ...\\Work RP-TOX-2018. Программы-солверы и препроцессоры к ним в соответствии со своим назначением находятся в папках: ...\\Work RP-TOX-2018\\1_RP, ...\\Work RP-TOX-2018\\2_NOx, ...\\Work RP-TOX-2018\\3_SAZHA.

1.4. Программное обеспечение, необходимое для функционирования программы

Системные программные средства, используемые программой, должны быть представлены локализованной версией операционной системы Windows (32 или 64 бит) (Windows XP, Windows Vista, Windows 7 и выше). Программа использует стандартный набор функций и сервисов ОС Windows, для корректного ее функционирования не требуется установка дополнительного программного обеспечения.

1.5. Языки программирования, на которых написана программа

Исходным языком для программ-препроцессоров является объектно-ориентированный язык программирования Delphi. Среда разработки, компилятор – Embarcadero Delphi XE2.

Исходным языком программ-солверов является алгоритмический язык высокого уровня MS Fortran. Среда разработки, компилятор – Microsoft Fortran Power Station 4.0.

1.6. Ограничения, накладываемые на область применения программы

Применение программного комплекса ограничивается классами двух- и четырехтактных дизельных и газопоршневых двигателей внутреннего сгорания с кривошипно-шатунным механизмом классической схемы и клапанным, клапанно-щелевым и щелевым механизмом газообмена, с наддувом и без него. Ограничений по размерности цилиндра двигателя, количеству цилиндров, компоновке двигателя, режимам работы нет. ПМК позволяет рассчитывать рабочие процессы бензиновых двигателей. Тип двигателя 4 «газовый» доступен только для 4-х тактных ДВС. Двухтактный газовый двигатель может быть рассчитан как «бензиновый».

Расчет результирующего сажевыделения производится только для дизельных двигателей.

2. УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ

2.1. Требования к техническим (аппаратным) средствам

В состав используемых технических средств входит компьютерная техника (персональный компьютер – ПК) со следующими характеристиками (рекомендательно):

- тип процессора Intel(R) Core(TM) i7, не хуже;
- модель процессора: 3770, не хуже;
- частота процессора: 3,7 ГГц, не менее;
- тип оперативной памяти: DDR3 DIMM, не хуже;
- объем оперативной памяти: 4,00 ГБ, не менее;
- виртуальная память: 7,00 ГБ, не менее;
- объём накопителя HDD: 1 Тб, не менее;
- видео карта: NVIDIA GeForce GT 640, не хуже;
- объем видеопамяти: 2,00 ГБ, не менее.

2.2. Требования к программным средствам (другим программам)

Системные программные средства, используемые программой, должны быть представлены локализованной версией операционной системы Windows (32 или 64 бит). Программа использует стандартный набор функций и сервисов ОС Windows, для корректного ее функционирования не требуется установка дополнительного программного обеспечения.

Программный комплекс «RP-ТОХ-2018» должен быть установлен в любой рабочий каталог (желательно ближе к корневому, чтобы избежать длинных имен файлов в совокупности с путем). Для установки программы достаточно скопировать исполняемые модули комплекса папку на компьютере пользователя. Каких-либо настроек после копирования программы не требуется.

2.3. Общие характеристики входной информации

Входная информация, необходимая для программ-солверов ПМК «RP-ТОХ-2018» формируется при помощи программ-препроцессоров и далее записывается и хранится в файлах данных. Принятая структура именований файлов следующая: XXX**.dat, где XXX – идентификационное имя файла, ** – номер файла (от 000 до 999). Программы-препроцессоры работают в режиме интерактивного диалога с

пользователем. Программы-солверы используют имеющиеся файлы исходных данных и имеют интерактивный диалог только в рамках процесса расчета.

Для удобства пользователя, во избежание путаницы при работе с файловой структурой комплекса, рекомендуется присваивать номер файлу данных в соответствии с заданным номером варианта расчета! Программы-солверы используют этот принцип напрямую.

Входная информация для программы синтеза индикаторных диаграмм «Rp_2018.exe» содержится в файлах типа RPI***.dat, где *** – номер файла, создаваемых программой-препроцессором «Rp2018.exe».

Входная информация для программы расчета процесса образования оксидов азота «NOx_2018.exe» содержится в файлах типа IND***.dat, где *** – номер файла, создаваемых программой-солвером синтеза индикаторных диаграмм «Rp_2018.exe». Программа-препроцессор «NOx2018.exe» позволяет только выбрать нужный файл.

Входная информация для программы расчета результирующего сажевыделения «SAZ_2018.exe» содержится в файлах типа SZI***.dat, где *** – номер файла, создаваемых программой-препроцессором «Sazha2018.exe» а также в файлах типа IND***.dat, где *** – номер файла, создаваемых программой-солвером синтеза индикаторных диаграмм «Rp_2018.exe».

2.4. Общие характеристики выходной информации

В общем случае в результате своей работы программы-солверы формируют итоговые протоколы расчета (листинги), файлы, используемые встроенным графическим постпроцессором и передаточные файлы данных для других программ.

Программа-солвер синтеза индикаторных диаграмм «Rp_2018.exe» формирует следующие файлы:

- итоговый листинг выходной информации IPR***.txt, который просматривается любым текстовым редактором. Файл содержит полный комплекс информации по индикаторным и эффективным показателям рассчитываемого двигателя, результаты расчета показателей газообмена, максимальных значений давлений, скоростей нарастания давлений, температур, показателей газообмена двигателя, теплового баланса двигателя и состава ОГ на выпуске.

По запросам программы формируются:

- файл индикаторной диаграммы Ind***.dat, содержащий массивы давлений, температур, параметров тепловыделения в цилиндре двигателя (в интегральной и дифференциальной формах), интенсивности конвективного теплообмена в цилиндре в привязке к углам поворота коленчатого вала. Этот файл используется в качестве

основного исходного файла данных во всех последующих программах-солверах ПМК «RP-ТОХ-2018».

- файлы для формирования графической формы представления результатов расчета в следующем составе:

а) файл Rbh***.dat – массив информации по давлениям, температурам, характеристикам тепловыделения, средним по поверхности коэффициентам теплоотдачи на тактах сжатия и сгорания-расширения;

б) файл Gzo***.dat – массив информации по давлениям, температурам, массе рабочего тела, средним по поверхности коэффициентам теплоотдачи на тактах газообмена;

в) файл Dgc***.dat – массив интегральной и дифференциальной характеристик топливоподачи (выгружается при использовании 5-ой динамики тепловыделения);

г) файл Ptf***.dat – массив информации по давлениям, температурам, массе рабочего тела и средним по поверхности коэффициентам теплоотдачи в целом за цикл;

д) файл Ptv***.dat – массив информации по давлениям и температурам рабочего тела в цикле для построения «свернутых» P-V и T-V диаграмм.

Во всех записываемых файлах *** – соответствует номеру варианта расчета, заданному в файле RPI***.dat.

Программа-солвер расчета процесса образования оксидов азота «NOx_2018.exe» формирует следующие файлы:

- итоговый листинг выходной информации NOX***.txt, который просматривается любым текстовым редактором. Файл содержит технико-гигиенические показатели рассчитываемого двигателя по выбросам оксидов азота;

- по запросу программы формируется файлы графической формы представления результатов расчета eNO***.dat – массив информации по текущим и конечным концентрациям оксидов азота в рабочей среде.

Программа-солвер расчета результирующего сажевыделения «SAZ_2018.exe» формирует следующие файлы:

- итоговый листинг выходной информации SZH***.txt, который просматривается любым текстовым редактором. Файл содержит технико-гигиенические показатели рассчитываемого двигателя по выбросам сажистых частиц;

- по запросу программы формируется файлы графической формы представления результатов расчета SZG***.dat – массив информации по текущим и конечным концентрациям сажистых частиц в рабочей среде.

2.5. Требования и условия организационного характера

Персонал, осуществляющий работу с программой, должен иметь высшее техническое образование (или находиться в процессе обучения) и должен быть аттестован минимум на II квалификационную группу по электробезопасности (для работы с конторским оборудованием).

В перечень задач, выполняемых персоналом, должны входить:

- а) задача поддержания работоспособности технических средств;
- б) задача поддержания работоспособности системных программных средств – операционной системы;
- в) задача поддержания работоспособности ПМК «RP-ТОХ-2018».

2.6. Требования и условия технического характера

Каких-либо особых требований технического характера, в том числе к составу и параметрам периферийных устройств ПК ПМК «RP-ТОХ-2018» не предъявляет.

2.7. Требования и условия технологического характера

Время выполнения программами комплекса своих функций при использовании технических средств уровня, обозначенного выше, несущественно. Расчет проходит в режиме реального времени. Определенное замедление процесса расчета возможно лишь при увеличении количества итераций для проверки сходимости численного процесса. Однако такое количество итераций может быть востребовано лишь в частных случаях расчета – например, при расчете рабочего процесса газопоршневого двигателя на режимах холостого хода, при малом открытии дроссельной заслонки и пр.

3. ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ

3.1. Определение задачи

Задача моделирования рабочего процесса в цилиндре является ключевой в любом комплексе расчетов процессов в поршневых ДВС. Точность определения индикаторной диаграммы (кривой изменения давления в цилиндре) задает итоговую погрешность расчета индикаторных и эффективных показателей двигателя, граничных условий теплового и механического нагружения рабочих поверхностей ГЦД и тем самым определяет точность и достоверность выводов о работоспособности и степени оптимальности принятых конструктивных решений.

Рабочий процесс, протекающий в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания, определяется совокупностью сложных физико-химических процессов – газодинамических, термодинамических, термокинетических и др. В своей основной массе эти процессы являются нестационарными, неравновесными, стохастическими, и в силу этого сложно поддающимися точному описанию.

В практике моделирования рабочих процессов ДВС (синтеза индикаторных диаграмм) широкое распространение имеют термодинамические модели, построенные на основе первого начала термодинамики. Такие модели обычно называют “нульмерными”, поскольку предполагают идентичность протекания процессов во всех точках пространства камеры сгорания (т.е. процесс не имеет линейной протяженности и уподобляется процессу в точке нулевой величины).

Тем не менее, математическая модель должна отражать принципиальную возможность подачи топлива, в том числе газового, во впускной тракт, а также в цилиндр. Основываясь на том, что газоздушные каналы головок цилиндров быстроходных двигателей достаточно коротки, в первом приближении изменением параметров газа в каналах головки можно пренебречь, (рисунок 1). Будем считать также, что температура в каждый момент времени выровнена по объему цилиндра.

Для принятой модели можно записать первое начало термодинамики для объема цилиндра:

$$dQ \pm \sum_1^n i_j dM_j = d(Mu) + pdV,$$

где dQ – элементарное количество теплоты, подведенное к рабочему телу в выделенном объеме; $i_j dM_j$ – потоки энтальпии (внесенный (+) и вынесенный (-) с элементарными массами dM_j); M – масса рабочего тела; u – удельная внутренняя энергия; p – давление в цилиндре; dV – элементарное изменение объема.

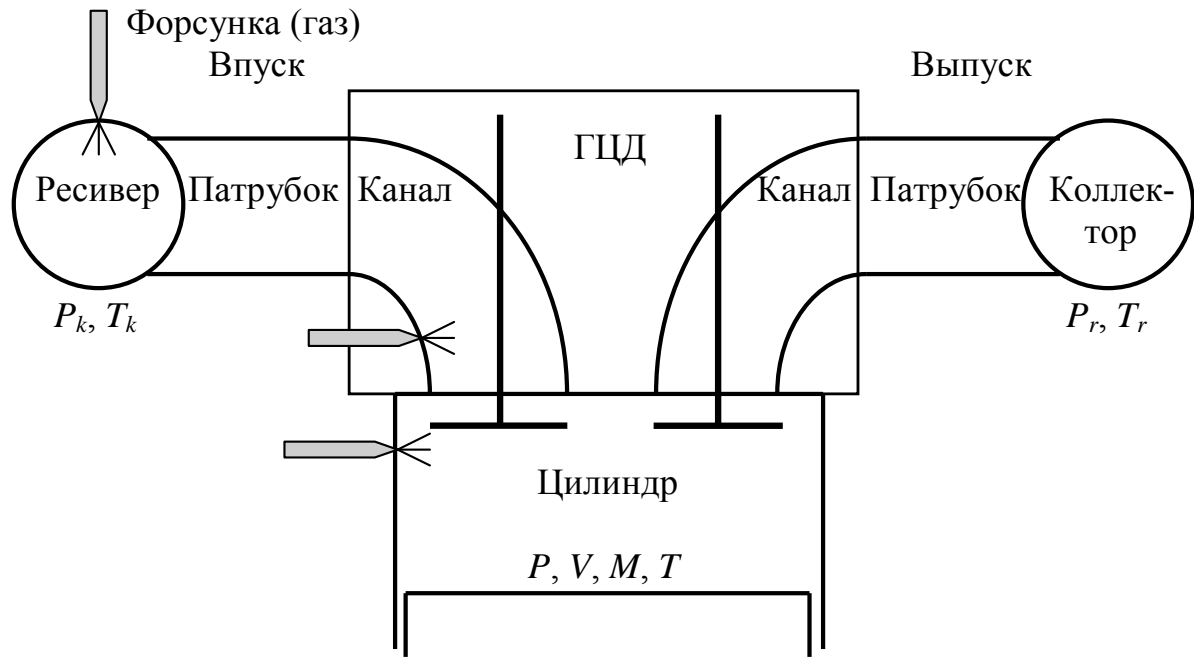


Рисунок 1 – Схематизация системы цилиндр-газовоздушные каналы

Решая термодинамическую задачу, можно определить текущие параметры газа в цилиндре. Помимо определения энергетических характеристик рабочего цикла при том или ином способе подачи топлива (в частности газового), математическая модель предоставляет достаточные возможности по определению граничных условий теплообмена в цилиндре, необходимых для дальнейшего определения уровня теплонапряженности головки и гильзы цилиндров, поршня, клапанов.

Расчет параметров токсичности отработавших газов в основном строится на схеме цепных реакций, предложенной Я.Б. Зельдовичем. Для решения системы уравнений, описывающих эти процессы, необходимо в любой момент времени знать мгновенные температуры и концентрации реагирующих компонент, включая неравновесные. Учитывая неравномерность полей температур и концентраций в цилиндре, необходимо принять ту или иную модель сгорания. В данном случае для расчета выбросов оксидов азота принята «модель стехиометрического слоя», хорошо подтвержденная опытом расчетов.

Обобщенная физико-химическая модель процесса результирующего сажевыделения, основанная на высокотемпературных многостадийных механизмах образования сажистых частиц и их одновременного выгорания реализует «ацетиленовый» механизм. Для решения указанных задач используется также методика расчета равновесного состава газовой смеси.

3.2. Методы решения задачи

Подробное описание методик моделирования рабочего процесса дизельного и газопоршневого двигателя, а также параметров токсичности ОГ содержится в учебно-методическом пособии «Рабочие процессы и токсичность отработавших газов судовых дизельных и газопоршневых двигателей» (Ю. В. Галышев, А. Б. Зайцев, А. А. Сидоров, А. Ю. Шабанов. – СПб. : СПбПУ, 2018).

Общим для всех методик является применение метода Рунге-Кутты для интегрирования основных уравнений по углу коленчатого вала.

В частности, описание процессов, происходящих в цилиндре двигателя на различных стадиях рабочего цикла, сводится к системе уравнений:

$$\frac{dp}{d\varphi} = f_1 \left(p, T, M, V, \frac{dx}{d\varphi}, \frac{dM_k}{d\varphi}, \frac{dV}{d\varphi}, \frac{dQ_w}{d\varphi} \dots \right),$$

$$\frac{dM}{d\varphi} = f_2 \left(\frac{dM_k}{d\varphi} \right) = \sum \frac{dM_k}{d\varphi},$$

$$\frac{dx}{d\varphi} = f_3(\varphi),$$

где: f_1 – функция скорости изменения давления в цилиндре; f_2 – функция изменения массы рабочего тела, равная сумме втекающих (вытекающих) элементарных масс dM_k за промежуток $d\varphi$; f_3 – функция скорости тепловыделения.

Выписанная система состоит из обыкновенных дифференциальных уравнений вида $y' = f(\varphi, y)$, которая наиболее эффективно решается методом Рунге-Кутты 4-го порядка, обеспечивающим высокую точность и сходимость решения, согласно которому вычисление функции в последующей точке проходит в четыре стадии:

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)\Delta\varphi, \text{ где:}$$

$$k_1 = f(\varphi_i, y_i),$$

$$k_2 = f(\varphi_i + \Delta\varphi/2, y_i + k_1/2),$$

$$k_3 = f(\varphi_i + \Delta\varphi/2, y_i + k_2/2),$$

$$k_4 = f(\varphi_i + \Delta\varphi, y_i + k_3).$$

При выборе шага интегрирования $\Delta\varphi$ учитываются относительно малые значения приращения массы газа в цилиндре, поэтому в процедуре расчета его значение принимается в диапазоне 0,01...0,1 °п.к.в. В расчетах параметров токсичности шаг интегрирования обычно находится в тех же пределах.

4. ЗАПУСК И ВЫПОЛНЕНИЕ ПРОГРАММЫ

4.1. Загрузка и запуск

ПМК «RP-TOX-2018» запускается путем прямого обращения к программе «RpTox2018.exe», находящейся в корневом каталоге папки ...\\Work RP-TOX-2018. Другие программы-препроцессоры запускаются программой «RpTox2018.exe» аппаратными средствами. Программы-солверы также запускаются соответствующими программами-препроцессорами при помощи аппаратных средств. Стартовое окно ПМК «RP-TOX-2018» показано на рисунках 2 и 3.

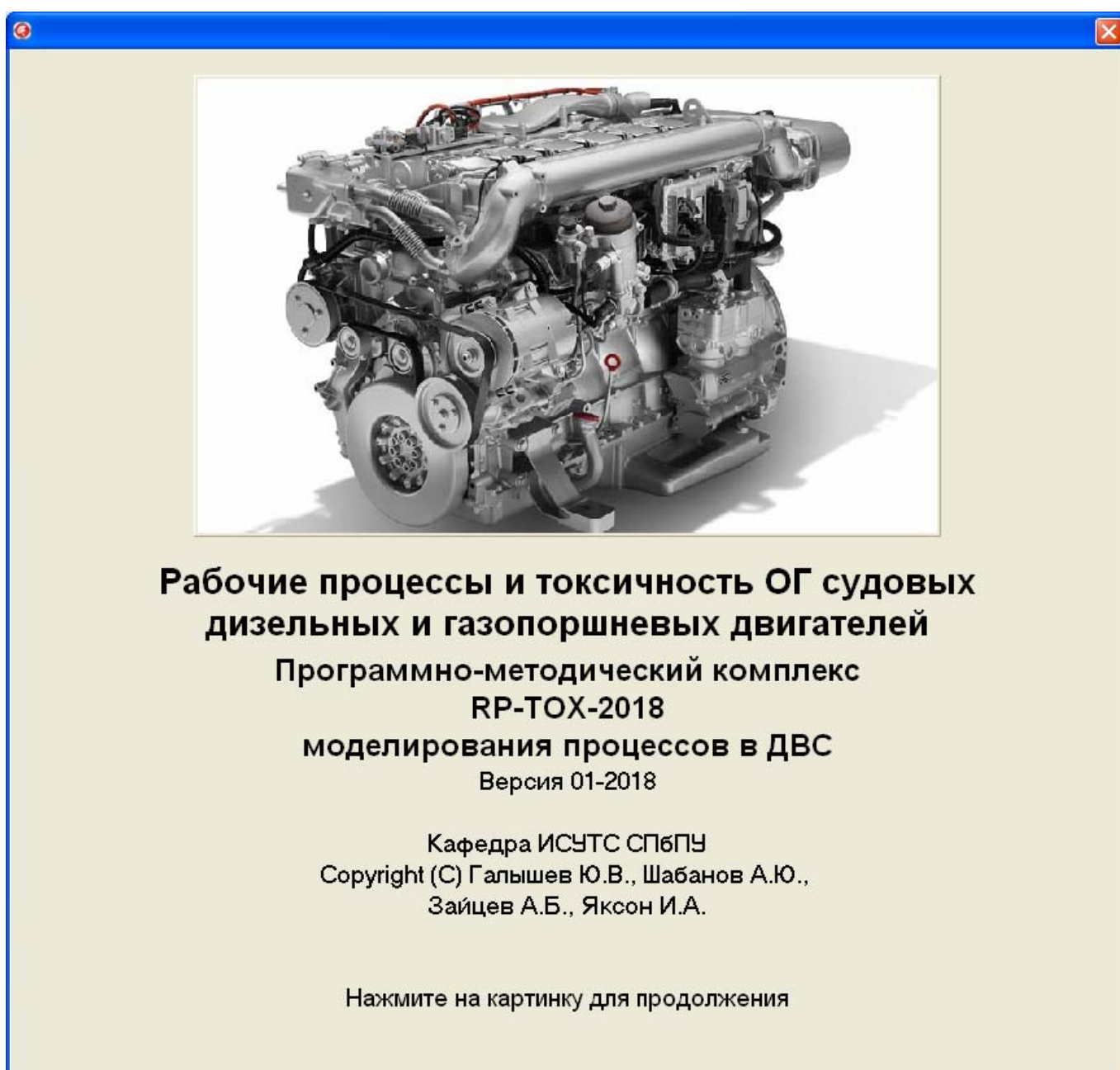


Рисунок 2 – Стартовое окно ПМК «RP-TOX-2018»



Рисунок 3 – Стартовое окно ПМК «RP-TOX-2018» после «нажатия на картинку»

Важно: каждая программа комплекса может быть запущена и осуществлять работу автономно!

При автономной работе загрузка и запуск программ ПМК осуществляется стандартными средствами ОС Windows (проводник Windows, файловый менеджер) при непосредственном обращении оператора к исполняемым модулям и нажатием клавиши ENTER. Каких-либо дополнительных параметров или действий пользователя для загрузки не требуется.

При запуске программ-солверов ОС Windows автоматически создает DOS-окно, внутри которого отображаются события, происходящие при работе программ.

4.2. Выполнение программы расчета рабочего процесса

4.2.1. Общий ход подготовки данных и выполнения расчета

При нажатии клавиши «Синтез индикаторного процесса» стартового окна ПМК на экран выводится меню «Общие» подготовки исходных данных для расчета рабочего процесса двигателя, рисунок 4.

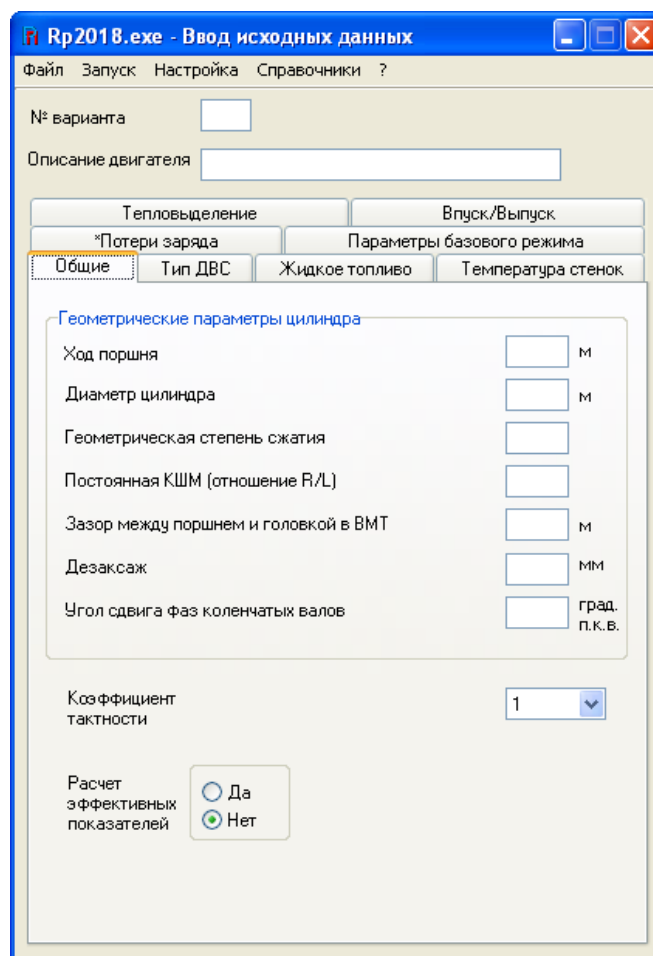


Рисунок 4 – Стартовое меню подготовки исходных данных

Ввод исходных данных может быть осуществлен путем ручного заполнения всех форм ввода программы-препроцессора, разделительным знаком для дробных десятичных чисел является точка. Однако это неудобно. Проще выбрать имеющийся файл двигателя-прототипа и осуществить корректировку данных.

Для загрузки данных с диска выберите в меню «Файл» функцию «Загрузить» и выберите имя имеющегося файла и его расположение с использованием стандартных процедур Windows.

После корректировки данных запишите исправленный файл либо с тем же именем (Функция «Сохранить»), либо с новым именем (Функция «Сохранить как») в меню «Файл».

16
RU.02068574.02018-02 31

Внимание! При вводе или корректировке большинства исходных данных работает система «Оперативная помощь» в виде подсказок, выводимых на экран при установке указателя мыши на соответствующую позицию. Помимо этого, в Главном меню имеется клавиша системы «Справочники», где находится необходимая информация по основным видам топлив, используемых в двигателестроении. Для использования справочника следует нажать меню «Справочники», далее «Топлива» после открытия меню «Выбор топлива» следует нажать клавишу «Топлива», выбрать его, и нажать клавишу «Заполнить» внизу окна, после чего окно можно закрыть.

Далее рассмотрим содержимое экранных меню для ввода исходных данных. Первое из них – меню «Общие», рисунок 5.

Рисунок 5 – Меню «Общие»

В меню «**Общие**» задаются следующие исходные данные (см. рисунок 5):

- номер варианта расчета – произвольное трехзначное число от 000 до 999, принципиально возможно использование также букв английского алфавита;

- описание двигателя – произвольная текстовая информация. Однако есть нюанс: при вводе информации русским шрифтом на экране препроцессора он будет отражаться правильно, но в файле протокола, выгружаемом программой-солвером нет. Есть и «обратный эффект»: если файл исходных данных правился DOS-редактором с использованием кириллицы, то текст в окне препроцессора будет отражаться некорректно (проблема не решаема). Поэтому есть **рекомендация** вводить текст на **английском языке** без использования кириллицы.

- ход поршня, [м];

- диаметр цилиндра, [м];

- степень сжатия (геометрическая вне зависимости от тактности двигателя);

- постоянная КШМ – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна;

- зазор, [м], между головкой и поршнем в ВМТ на радиусе цилиндра;

- дезаксаж, [мм] – расстояние между осью цилиндра и осью поршневого пальца по ходу вращения к/вала – положительный, если нет – отрицательный;

- коэффициент тактности (1 или 2);

- признак «Расчет эффективных показателей», если выбирается “Да”, то на экран выводятся дополнительные окна:

- количество цилиндров;

- мощность механических потерь;

- механический к.п.д. на режиме.

Следует отметить, что все необходимые пояснения к выбору исходных данных приведены в учебно-методическом пособии «Рабочие процессы и токсичность отработавших газов судовых дизельных и газопоршневых двигателей» (Ю. В. Галышев, А. Б. Зайцев, А. А. Сидоров, А. Ю. Шабанов. – СПб. : СПбПУ, 2018.) и в разделе 5 настоящего «Описания», здесь и далее возможный диапазон числовых значений параметров приводится исключительно ради удобства пользования настоящей инструкцией.

В меню «**Тип ДВС**», программа предоставляет возможность выбора четырех вариантов расчета, рисунок 6.

18
RU.02068574.02018-02 31

№ варианта

Описание двигателя

*Тепловыделение *Впуск/Выпуск

*Потери заряда *Параметры базового режима

*Общие *Тип ДВС *Жидкое топливо *Температура стенок

Тип двигателя

Параметры режима работы

Частота вращения коленчатого вала об/мин

Расход топлива кг/час

Относительная доля открытия дроссельной заслонки

Наличие предварительной фазы впрыска Да Нет

Рисунок 6 – Меню «Тип ДВС»

- «**Дизельный**» – моделируется двигатель с воспламенением от сжатия при внутреннем смесеобразовании с качественным способом управления мощностью двигателя. Для расчета задаются:

- частота вращения коленчатого вала на расчетном режиме, [об/мин];
- расход топлива **на один цилиндр** [кг/час].
- относительная доля открытия дроссельной заслонки (1 – всегда, но можно и дросселировать, если нужно моделировать особые условия);
- наличие предварительной фазы впрыска для «двухфазного впрыска». Если «Да», то дополнительно задаются: угол опережения впрыска для «пилотной» фазы (-50...0) °п.к.в. и объем подаваемого топлива в предварительной фазе, обычно 1...5 мм³, но можно и больше, в зависимости от размерности двигателя.

- «**Бензиновый (задан коэффициент избытка воздуха)**» – моделируется двигатель с искровым зажиганием, с внешним и внутренним смесеобразованием и количественным способом управления двигателем, состав смеси выбирается по известным настройкам на различных режимах работы. Для расчета задаются:

- частота вращения коленчатого вала на расчетном режиме, [об/мин];
- величина действительного коэффициента избытка воздуха;
- относительная доля открытия дроссельной заслонки (1 – на внешней характеристике, на частичных режимах подбирается по величине расхода воздуха или мощности двигателя и обычно находится в диапазоне 0,01...1,00).

- «**Бензиновый (задан расход и дроссель)**» – моделируется двигатель с искровым зажиганием, с внешним и внутренним смесеобразованием и смешанным способом управления двигателем. Для расчета задаются:

- частота вращения коленчатого вала на расчетном режиме, [об/мин];
- расход топлива **на один цилиндр** [кг/час];
- относительная доля открытия дроссельной заслонки.

- «**Газовый/газодизельный**» двигатель – моделируется двигатель с искровым зажиганием или от запальной дозы дизельного топлива, с внешним и внутренним смесеобразованием и смешанным способом управления двигателем. Для расчета задаются:

- частота вращения коленчатого вала на расчетном режиме, [об/мин];
- расход (дизельного) топлива **на один цилиндр** [кг/час], параметры газового топлива, в том числе его расход, задаются на вкладке «Газовое топливо»;
- относительная доля открытия дроссельной заслонки.

Задание параметров жидкого топлива осуществляется через меню «**Топливо**», здесь вводят (рисунок 7):

- низшую теплотворную способность топлива, [МДж/кг];
- молярную массу топлива, [кг/кмоль];
- октановое число топлива;
- цетановое число топлива;
- плотность топлива, [кг/м³];
- содержание углерода С, водорода Н, кислорода О в топливе (в долях от 1);
- содержание серы S, азота N и воды в топливе, в %.

20
RU.02068574.02018-02 31

№ варианта: 002

Описание двигателя: ЛЬ -ТЪ±-7403. К@-Ё- «м- п -@й-@бвм. 4 ь.

Меню: *Тепловыделение, *Впуск/Выпуск, *Потери заряда, *Параметры базового режима, *Общие, *Тип ДВС, *Жидкое топливо, *Температура стенок

Параметры топлива

Низшая теплотворная способность	42.5	МДж/кг	Qn
Молярная масса углеводородов	190	кг/кмоль	
Октановое число топлива	0		
Цетановое число топлива	50		
Плотность топлива	810	кг/м3	

Состав топлива (в долях от 1)

Углерод С	0.87
Водород Н	0.126
Кислород О	0.004

Примеси (в % по массе)

Сера S	0.2
Азот N	0.015
Вода	0.005

Рисунок 7 – Меню «Жидкое топливо»

При вводе данных в меню «Топливо» действует система оперативной подсказки, вызываемая установкой курсора указателя мыши на окно ввода.

Для заполнения данного меню можно воспользоваться меню «Справочники» в верхней части вкладки.

При нажатии клавиши **Qn** выполняется расчет низшей теплотворной способности топлива по его заданному элементарному составу (по формуле Д.И. Менделеева).

Если во вкладке «Тип ДВС» выбран «газовый/газодизельный» двигатель в меню появляется вкладка «Газовое топливо», здесь вводят (рисунок 8):

- низшую теплотворную способность газового топлива, [МДж/кг];
- молярную массу топлива, [кг/кмоль];
- температуру подаваемого газа, [К];
- тип задачи – любые соотношения жидкое топливо/газ – задается расход газа, [кг/ч] на один цилиндр, или подгонка под заданную альфу (коэффициент избытка воздуха) – задается доля замещения расхода жидкого топлива;
- содержание углерода С, водорода Н, кислорода О в газовом топливе (в долях от 1);
- параметры подачи (впрыска) газового топлива – начало подачи, конец подачи, °п.к.в. в привязке к ВМТ рабочего хода, базовый расход воздуха на двигатель, [кг/ч].

The screenshot shows a software window titled "Rp 2018.exe - Ввод исходных данных". The menu bar includes "Файл", "Запуск", "Настройка", and "Справочники?". The main area contains several input fields and tabs. The "Газовое топливо" tab is selected and highlighted in orange. The "Параметры топлива" section includes input fields for "Низшая теплотворная способность" (MДж/кг), "Молярная масса" (кг/кмоль), "Температура подаваемого газа" (К), and a dropdown for "Тип задачи". The "Состав топлива (в долях от 1)" section has input fields for "Углерод С", "Водород Н", and "Кислород О". The "Параметры подачи топлива" section has input fields for "Начало подачи" (град. п.к.в.), "Конец подачи" (град. п.к.в.), and "Базовый расход воздуха на двигатель" (кг/час).

Рисунок 8 – Меню «Газовое топливо»

В меню «Температура стенок», рисунок 9, задаются температуры стенок камеры сгорания на расчетном режиме работы двигателя:

- температура огневой поверхности поршня, [K];
- температура огневой поверхности крышки (головки) цилиндра, [K].
- температура рабочей поверхности гильзы цилиндра, [K] задается в трех поясах – верхнем, среднем и нижнем;

Эти данные задаются приближенно, исходя из аналогов и теплофизических свойств материалов деталей. Для поршней, выполненных из алюминиевых сплавов – порядка 520...560 [K], головок цилиндра – порядка 500..570 [K]. Для чугунных или стальных поршней (головок поршней) – порядка 550...700 [K].

Температуры гильзы цилиндра для двигателя жидкостного охлаждения может быть определена как температура охлаждающей жидкости плюс (15...70 K).

Рисунок 9 – Меню «Температура стенок»

Через меню «Тепловыделение», рисунок 10, задаются параметры выделения теплоты сгорающего топлива:

- с использованием динамики тепловыделения по формуле И.И. Вибе – для бензиновых и газового двигателей;

- с использованием «двугорбой» динамики тепловыделения по формуле Б.П. Пугачева – для дизельного двигателя с открытой КС;

- с использованием «трехгорбой» динамики Б.П Пугачева – для дизелей с объемно-пленочным способом смесеобразования;

- с использованием «двугорбой» (модифицированной) динамики тепловыделения с автоматическим определением коэффициентов формулы Б.П Пугачева для дизелей с открытой камерой сгорания;

- с использованием табличной формы характеристики топливоподачи.

Рисунок 10 – Меню «Тепловыделение»

Для задания тепловыделения по формуле И.И. Вибе необходимо задать следующие данные, рисунок 11:

- условную длительность сгорания топлива φ_z , °п.к.в. Параметр задается исходя из анализа динамик тепловыделения двигателей-аналогов. Ориентировочное значение – 50...90 °п.к.в.;
- показатель характера сгорания m . Ориентировочное значение параметра – 1,8...2,5;
- угол начала сгорания, °п.к.в. – угол опережения зажигания плюс 1,0...3,0 °п.к.в. (период индукции);
- максимальную долю выгоревшего топлива x_{\max} при сгорании смеси (в зависимости от типа камеры сгорания и способа смесеобразования – 0,92...0,98). Этот параметр не включает в себя потери, связанные с недогоранием богатых смесей!

Рисунок 11 – Задание тепловыделения по формуле И.И. Вибе

Рисунок 11 – Задание тепловыделения по формуле И.И. Вибе

Для задания тепловыделения по формуле Б.П. Пугачева для открытой КС необходимо задать следующие исходные данные, рисунок 12:

- долю теплоты, выделившуюся в фазе кинетического сгорания x_1 (0,15...0,35);
- долю теплоты, выделившуюся в фазе диффузионного сгорания x_2 . Определяется как $x_2 = 1 - x_1$;
- угол достижения максимума скорости тепловыделения в кинетической фазе φ_1 , °п.к.в. (ориентировочно – 3...5 °п.к.в.);
- угол достижения максимума скорости сгорания в диффузионной фазе φ_2 , °п.к.в. (ориентировочно равен полной продолжительности подачи топлива);
- параметры жесткости сгорания в кинетической фазе k_1 (ориентировочно равен 2,0...2,3) и в диффузионной фазе k_2 (1,6...2,2);
- угол начала видимого сгорания топлива, °п.к.в.

Рисунок 12 – Задание тепловыделения по «двугорбой» формуле Б.П. Пугачева

Рисунок 12 – Задание тепловыделения по «двугорбой» формуле Б.П. Пугачева

Для задания тепловыделения по формуле объемно-пленочного смесеобразования задаются следующие исходные данные, рисунок 13:

- доля теплоты, выделившаяся в фазе кинетического сгорания x_1 0,10...0,30;
- доля теплоты, выделившаяся в фазе пристеночного сгорания x_3 Определяется по формуле $x_3 = 1 - (\varphi_{ст} / \varphi_{впр})$, где $\varphi_{ст}$ – угол п.к.в., соответствующий времени достижения топливным факелом стенки камеры сгорания; $\varphi_{впр}$ – полная продолжительность впрыска;
- доля теплоты, выделившаяся в фазе диффузионного сгорания x_2 (определяется по формуле $x_2 = 1 - x_1 - x_3$);
- угол достижения максимума скорости тепловыделения в кинетической фазе φ_1 , °п.к.в. (ориентировочно – 3...5 °п.к.в.);
- угол достижения максимума скорости тепловыделения в диффузионной фазе φ_2 , °п.к.в. (ориентировочно равен продолжительности подачи топлива);

Рисунок 13 – Задание тепловыделения по «трехгорбой» формуле Б.П. Пугачева

- угол достижения максимума скорости сгорания в диффузионной фазе φ_3 , °п.к.в. Ориентировочно равен 35...45 °п.к.в.;
- параметры жесткости сгорания в кинетической фазе k_1 (2,0...2,3), в диффузионной фазе k_2 (1,6...2,2), пристеночной фазе k_3 (1,3...1,6);
- угол начала видимого сгорания топлива, °п.к.в.;
- угол начала сгорания пристеночной фазы (равен углу начала видимого сгорания плюс $\varphi_{ст}$).

Для задания тепловыделения по модифицированной формуле Б.П. Пугачева с автоматическим расчетом коэффициентов тепловыделения задаются следующие параметры, рисунок 14:

Рисунок 14 – Задание тепловыделения по модифицированной формуле Б.П. Пугачева

- угол опережения впрыска топлива, °п.к.в., с учетом знака относительно ВМТ рабочего хода;
- полная продолжительность впрыска топлива, °п.к.в.;
- эквивалентный диаметр камеры сгорания, [м] (диаметр камеры в поршне);
- коэффициент уменьшения (увеличения) доли выгорания топлива в кинетической фазе (ориентируясь на форму дифференциальной характеристики впрыска);
- угол «оттяжки» максимума скорости тепловыделения в диффузионной фазе (при попадании топлива на стенки КС).

Для задания тепловыделения с использованием табличной формы характеристики топливоподачи задаются следующие параметры, рисунок 15:

- те же, что и в предыдущем случае, см. рисунок 14;

№ варианта: 002

Описание двигателя: Ль - Ът-7403. К®-Е- «м- п -®й-®бвм. 4 ...

Таблица параметров:

номер точки	1	2	3	4	5	6
значение						

Рисунок 15 – К заданию характеристики топливоподачи в табличной форме

- признак характеристики топливоподачи (дифференциальная/интегральная);
- количество точек таблицы характеристики топливоподачи (минимум 4);
- таблица характеристики топливоподачи.

Прим.:

1. Интегральная характеристика изменяется (т.е. нарастает) на отрезке продолжительности впрыска в пределах от 0 до 1.

2. Дифференциальная характеристика изменяется на отрезке продолжительности впрыска в пределах от 0 до 0 (т.е. нарастает, достигает максимума и падает в 0).

3. Как дифференциальная, так и интегральная характеристики топливоподачи могут быть «нарисованы от руки» и заданы в любых единицах. В программе обе кривые масштабируются по цикловой подаче топлива.

Таким образом, в программе реализована **прямая связь** между характеристикой топливоподачи и характеристикой тепловыделения в дизельном двигателе!

В меню «**Впуск-выпуск**» задаются следующие исходные данные, рисунок 16:

- температура свежего заряда на впуске в цилиндры двигателя (после фильтра, компрессора и охладителя с учетом подогрева от стенок воздушного тракта), [K];
- давление наддува (перед впускным клапаном), [бар];
- температура отработавших газов в выпускном коллекторе, [K];
- давление отработавших газов в выпускном коллекторе, [бар];
- фазы газораспределения:
 - угол открытия впускных клапанов/окон, °п.к.в.;
 - угол закрытия впускных клапанов/окон, °п.к.в.;
 - угол открытия выпускных клапанов/окон, °п.к.в.;
 - угол закрытия выпускных клапанов/окон, °п.к.в.

Внимание! Углы фаз газораспределения задаются по шкале градусов п.к.в., относительно ВМТ такта сгорания-расширения, принимаемого за 0°п.к.в.

Кроме этого, в меню «**Впуск-выпуск**» задаются:

- относительная скорость закрутки потока свежего заряда на впуске – c_u/c_m , где c_u – тангенциальная скорость закрутки, c_m – средняя скорость поршня (учитывается в расчете теплообмена со стенками, согласно методикам Г. Вошни);
- объемная доля кислорода в воздухе (можно менять в зависимости от условий применения двигателя);
- объемная доля рециркуляции ОГ;
- количество клапанов/окон впускных и выпускных.

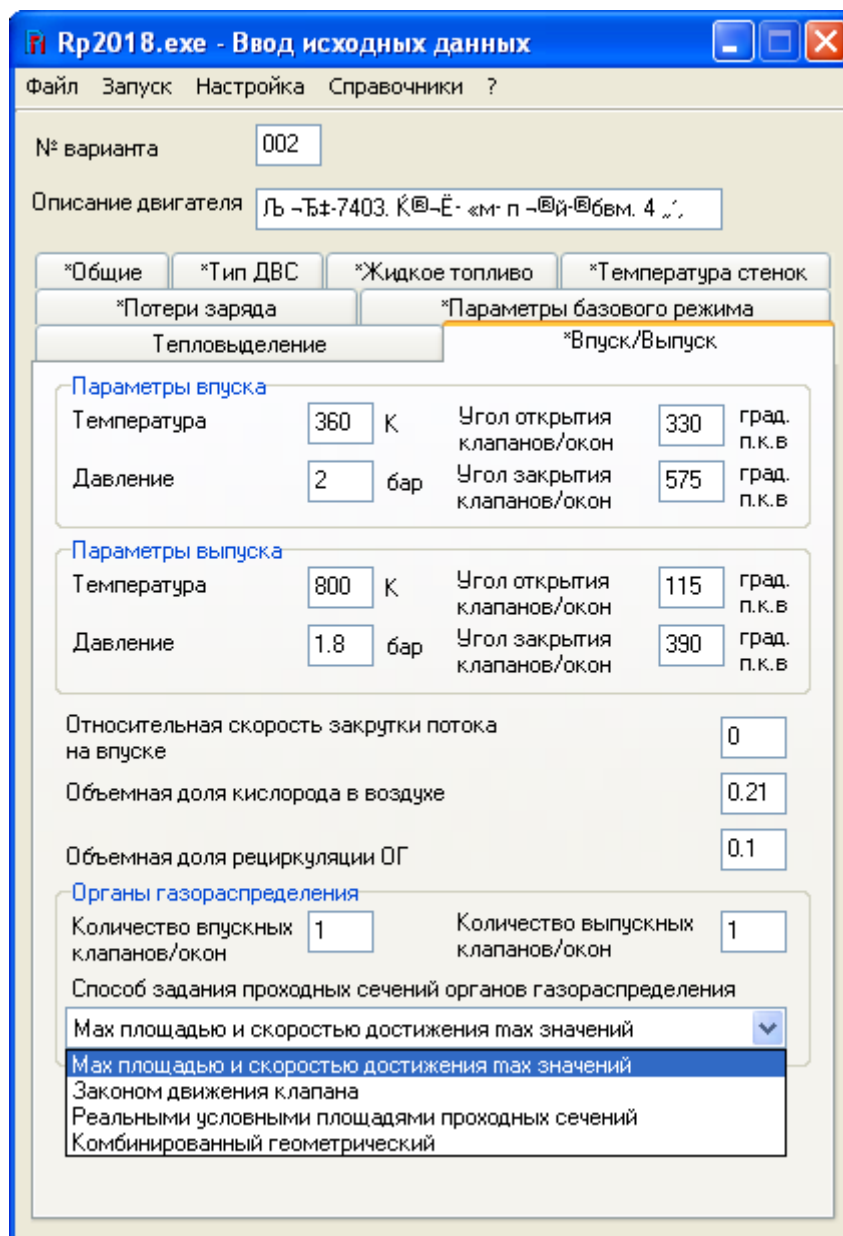


Рисунок 16 – Меню «Впуск-выпуск»

Площади проходных сечений органов газораспределения могут быть заданы четырьмя способами, см. рисунок 16:

1. путем задания трапециевидной косинусоидальной аппроксимации закона изменения площадей открытия органов газораспределения, рисунок 17;

2. заданием геометрических параметров клапанов и законов подъема клапанов, согласно профилям кулачков распределительных валов, рисунок 18;

3. реальным законом изменения условной площади сечения органов газораспределения, полученным методом статической продувки головки цилиндра, рисунок 19;

4. заданием геометрических параметров продувочных окон или клапанов (введено в основном для 2-х тактных ДВС, но подходит и для 4-х тактных).

По **первому** способу, для впускных и выпускных клапанов (или окон) задается максимальная условная площадь открытия органа (с учетом коэффициента расхода), [см²], а также угол достижения максимального значения площади от момента открытия клапана/окна, °п.к.в.. Изменение площади во время открытия и закрытия органов газораспределения задаются косинусоидальными кривыми. Участок диаграммы при закрытии органа симметричен его открытию.

Внимание! Если клапанов/окон несколько, задается суммарная площадь.

Рисунок 17 – Задание проходных сечений трапецевидной аппроксимацией

По **второму** способу для впускного и выпускного органа задаются, рисунок 18:

- диаметр тарелки клапана по седлу (середине притирочного пояса), [мм];
- угол скоса тарелки клапана по посадочному поясу, °;
- коэффициент расхода клапанной щели на расчетном режиме (0,7...0,9);
- количество точек в таблице задания подъема клапана;
- таблица подъема клапана, [мм].

По **третьему** способу для впускного и выпускного органов задаются, рисунок 19:

- количество точек в таблице проходных сечений;
- расчетные или измеренные площади проходного сечения с учетом коэффициента расхода клапанных щелей, [см²]. Для нескольких клапанов задается суммарная площадь проходного сечения.

Внимание! Углы, при которых задаются значения таблиц движения клапанов и условных площадей, рассчитываются автоматически, исходя из заданных фаз газораспределения и количества точек таблиц.

32
RU.02068574.02018-02 31

Rp2018.exe - Ввод параметров клапанов

Впускной клапан

Диаметр клапана по седлу мм

Угол скоса тарелки клапана град.

Коэффициент расхода

Выпускной клапан

Диаметр клапана по седлу мм

Угол скоса тарелки клапана град.

Коэффициент расхода

Закон движения клапанов

Количество точек таблицы для впускного клапана

угол п.к.в.	343	353	363	373	383	393	403	413
поднятие клапана, мм	0	0.2	1.1	3	5	7.2	9.2	11

Количество точек таблицы для выпускного клапана

угол п.к.в.	118	128	138	148	158	168	178	188
поднятие клапана, мм	0	0.3	1.1	2.6	4.3	7.1	9.3	11.3

Рисунок 18 – Задание проходных сечений
 законом движения клапана

Rp2018.exe - Ввод параметров клапанов

Площади условных проходных сечений клапанов

Количество точек таблицы для впускного клапана

угол п.к.в.	343	353	363	373	383	393	403	413
площадь сечения, см ²	0	0.2	1.1	3	5	7.2	9.2	11

Количество точек таблицы для выпускного клапана

угол п.к.в.	118	128	138	148	158	168	178	188
площадь сечения, см ²	0	0.3	1.1	2.6	4.3	7.1	9.3	11.3

Рисунок 19 – Задание реального закона
 изменения проходных сечений клапанов

По четвертому способу, если рассчитывается **четырёхтактный двигатель**, для впускного и выпускного органов (клапанов) задаются, рисунок 20:

- базовый диаметр клапана, [мм];
- максимальная высота подъёма клапана, [мм];
- угол скоса тарелки клапана, [°];
- коэффициент расхода клапана;
- количество клапанов;
- угол от начала открытия клапана до достижения условной максимальной площади проходного сечения, 50...120 [° п.к.в.].

Рисунок 20 – Задание площадей органов газораспределения геометрическими параметрами клапанного механизма

По четвертому способу, если рассчитывается **двухтактный двигатель**, для впускного и выпускного органов газораспределения могут быть заданы, либо параметры окон, либо параметры клапанов (для двигателей с прямоточно-клапанной продувкой обычно используется выпускной клапан), рисунок 21.

Для параметров **клапанов** задаются:

- базовый диаметр клапана, [мм];
- максимальная высота подъёма клапана, [мм];
- угол скоса тарелки клапана, [°];
- коэффициент расхода клапана;

- количество клапанов;
- угол от начала открытия клапана до достижения условной максимальной площади проходного сечения, 50...120 [° п.к.в.].

Для параметров **продувочных окон** задаются:

- ширина окна, [мм];
- высота окна, [мм];
- тип окон: (1 – трапециевидные, 2 – эллипсоидные);
- коэффициент расхода;
- количество окон;
- для **впускных** окон: угол полного открытия золотника на впуске: 0 – золотника нет, а фаза впуска симметрична относительно ВМТ; не 0 – золотник есть, фаза впуска несимметрична в начале процесса впуска, золотник открывается от начала фазы впуска до угла FIM2, большего, чем угол открытия впуска FOVP, площадь сечения изменяется линейно от нуля до текущей площади окна;
- для **выпускных** окон: угол начала закрытия золотника на выпуске: 0 – золотника нет, а фаза выпуска симметрична относительно ВМТ; не 0 – золотник есть, фаза выпуска несимметрична в конце выпуска, золотник закрывается от угла FIM1, меньшего, чем угол закрытия выпуска FZVIP, площадь сечения изменяется линейно от текущей площади окна до нуля.

Рисунок 21 – Задание площадей органов газораспределения геометрическими параметрами клапанного механизма и продувочных окон

В меню «Потери заряда» задаются параметры, которые определяют влияние на характеристики рабочего процесса протечек рабочего тела через зазоры уплотнения цилиндропоршневой группы. Это может быть важно при расчете сильно изношенных двигателей.

Рис. 22. Меню «Потери заряда»

Рисунок 22 – Меню «Потери заряда»

В программе предусмотрены три режима расчета, см. рисунок 22:

1. без учета протечек;
2. заданием усредненной условной площади проходного сечения зазоров в ЦПГ;
3. заданием массовой доли потери рабочего тела за счет протечек через ЦПГ.

В **первом** случае в расчет не задается ничего.

Во **втором** случае для расчета задаются:

- величина условной площади проходного сечения зазора в ЦПГ, открытого для протечки рабочего тела, [мм²];
- давление картерных газов, [бар];
- температура картерных газов, [К].

В **третьем** случае задаются:

- доля потери рабочего тела за счет протечки через неплотности ЦПГ;
- начальная величина условной площади проходного сечения зазора в ЦПГ, открытого для протечки рабочего тела, [мм²], которая уточняется в расчете;
- давление картерных газов, [бар];
- температура картерных газов, [К].

В меню **«Параметры базового режима»**, рисунки 23 и 24, задаются следующие параметры:

- способ задания базового режима: 1 – размерный; 2 – относительный (выбирается путем нажатия соответствующей «кнопочки»);
- измеренное значение остаточных (несгоревших) углеводородов на базовом режиме (топливные+масляные), CH_0 , ppm. Если текущий (т.е. рассчитываемый в настоящее время) режим задается как «базовый», то данная величина напрямую воспринимается как измеренное значение на режиме и не корректируется. Если текущий режим отличается от базового по оборотам/нагрузке как в большую, так и в меньшую сторону, заданная величина CH_0 подвергается корректировке по эмпирическим зависимостям. Если задается $CH_0=0$, осуществляется его приближенный расчет в зависимости от типа двигателя (бензин/газ/дизель), тактности и коэффициента избытка воздуха по эмпирическим зависимостям с учетом угара смазки;
- средняя (измеренная) молярная масса несгоревших углеводородов $SMUCH$, [кг/кмоль]. Если задается $SMUCH=0$, осуществляется приближенный расчет в зависимости от молярной массы топлива и типа двигателя (бензин/газ/дизель) по эмпирическим зависимостям с учетом угара смазки;
- расход масла на угар, $UGAR$, в % к расходу топлива на номинальном режиме. Если задается $UGAR=0$, то масляная составляющая CH не учитывается;
- средняя молярная масса компонентов моторного масла, $SMUMC$, [кг/кмоль]. Если задается $SMUMC=0$, молярная масса масла выбирается автоматически.

Рисунок 23 – Меню «Параметры базового режима».

Размерный способ задания базового режима

Далее, в зависимости от выбранного способа задания базового режима, для **размерного способа** задаются:

- скорость вращения коленчатого вала двигателя на базовом режиме, об/мин.
- эффективный момент на базовом режиме, н·м.

Для **относительного способа**:

- относительная скорость вращения коленчатого вала двигателя на текущем режиме, %. Для номинального режима принимается 100%. Если известно измеренное значение СН для любого другого скоростного режима, за 100% может быть принят именно он.

- относительная нагрузка (по M_e или P_e) на текущем режиме, %. Для номинального режима принимается 100%. Если известно измеренное значение СН для любого другого нагрузочного режима, за 100% может быть принят именно он.

За **базовый** рекомендуется принимать **номинальный** режим работы двигателя.

Рисунок 24 – Меню «Параметры базового режима». Относительный способ задания текущего режима

Рисунок 24 – Меню «Параметры базового режима».

Относительный способ задания текущего режима

Общее замечание! Следите, чтобы при вводе дробных чисел, разделитель между целой и дробной частью был бы «точкой», а не «запятой»!

Перед выгрузкой файла исходных данных необходимо определить объем выгружаемого файла протокола. Для этого необходимо в Главном меню выбрать функцию «**Настройка**», далее «**Протокол**» и поставить флажок для требуемого объема:

- минимальный;
- полный;
- полный с тепловым балансом рабочего цикла;
- полный с тепловым балансом рабочего цикла и составом ОГ на выпуске;
- полный с тепловым балансом, составом ОГ на выпуске и таблицей параметров по углу п.к.в.

После ввода исходных данных, их необходимо **сохранить** на диске в виде файла фиксированной структуры. Для этого в Главном меню необходимо выбрать функцию «**Сохранить как**» для первоначальной записи или «**Сохранить**» для любых выполненных корректировок исходных данных.

Выбор директории и имени файла для сохранения производится в соответствии со стандартными процедурами Windows. Рекомендуемое имя файлов для сохранения – rpi***.dat (например, rpi001.dat, rpi005.dat и т.п.).

4.2.2. Выполнение функции моделирования рабочего процесса

Для выполнения расчета рабочего процесса после ввода или корректировки исходных данных в Главном меню следует выбрать функцию «Запуск» и далее, в выпавшем подменю – функцию «Расчет». Так будет запущена программа-солвер расчета рабочего процесса «Rp_2018.exe».

При запуске программы «Rp_2018.exe» ОС Windows автоматически создает DOS-окно, внутри которого отображаются события, происходящие при работе программы. Стартовое окно программы показано на рисунке 25.

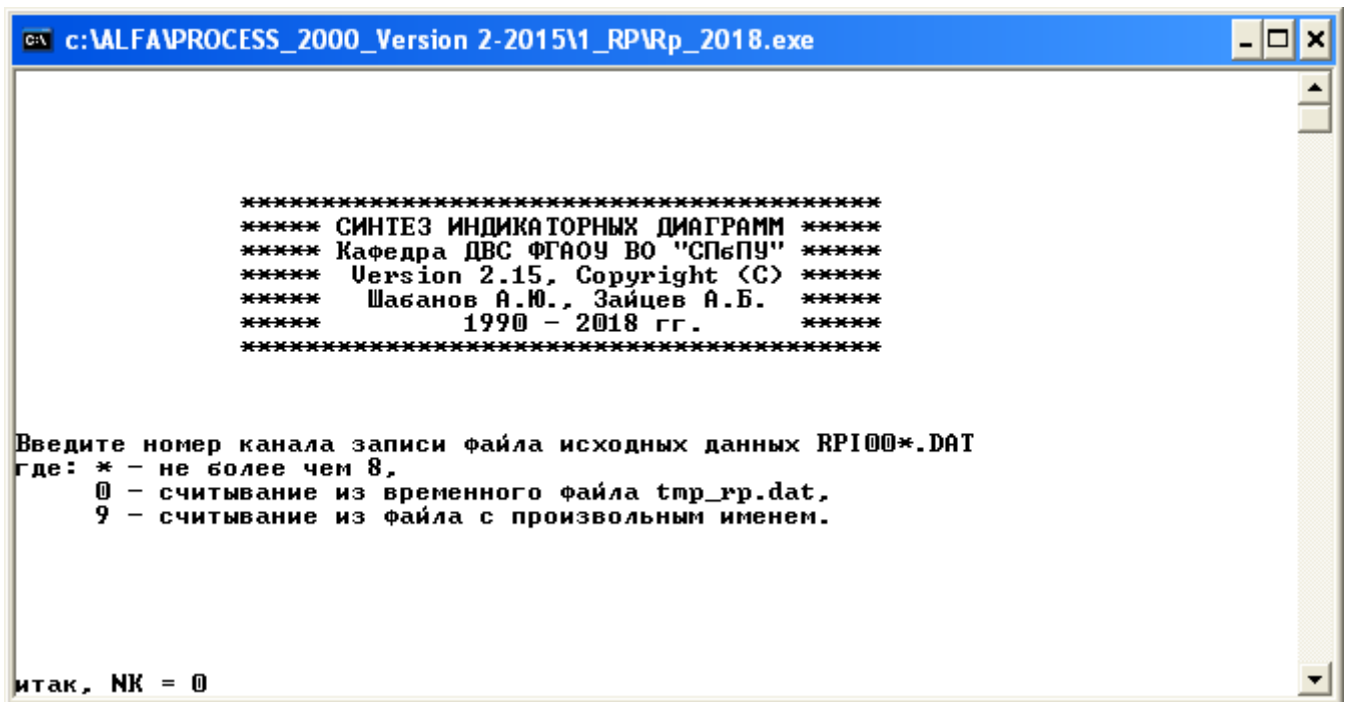


Рисунок 25 – Стартовое окно программы «Rp_2018.exe»

Параметры DOS-окна (размер окна, шрифт, цвет экрана и шрифта и пр.) могут быть настроены индивидуально при помощи средств самого окна, для чего следует навести курсор на заголовок окна, нажать правую клавишу мыши, и из выпавшего меню выбрать строку «свойства». Далее следует воспользоваться вкладками открывшегося окна. Рекомендуемый размер шрифта – точечный 8×12, текст на экране – черный, фон – белый, другие рекомендуемые настройки показаны на рисунке 26.

Прим.: чтобы иметь возможность полного просмотра хода расчета в окне «Размер буфера экрана», окно «Высота» можно вместо 26 выставить, например, 750. Тогда в окне появится полоса прокрутки, с помощью которой можно просмотреть все стадии выполнения расчета.

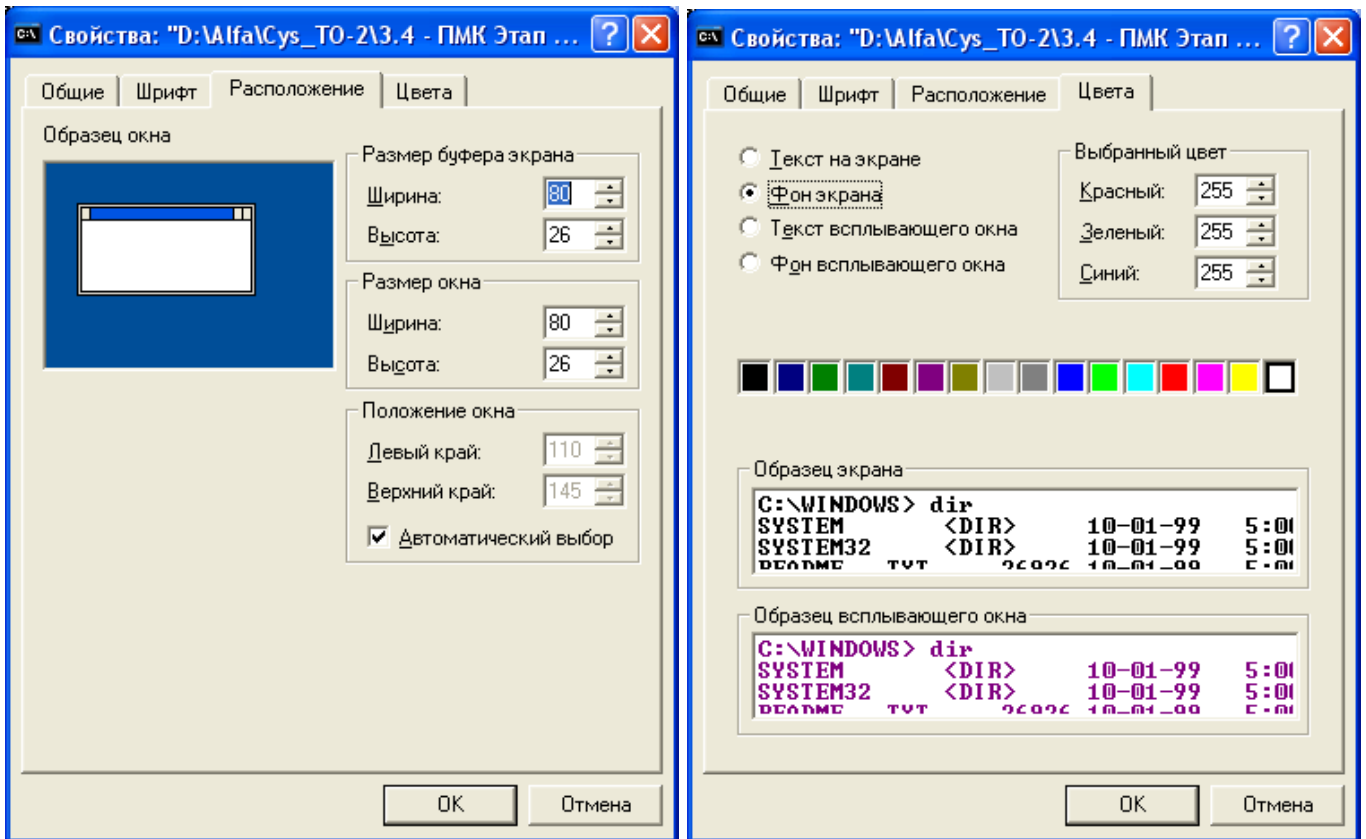


Рисунок 26 – Рекомендуемые настройки DOS-окна

Ввод данных в программу-солвер «Rp_2018.exe» осуществляется из файлов типа gr1***.dat (где *** – номер файла от 1 до 999), создаваемых программой-препроцессором «Rp2018.exe», путем выбора номера файла, если используется “стандартная” нумерация в виде gr100*.dat, где * – числа от 1 до 8, см. рисунок 25. При вводе канала записи “9” ввод осуществляется путем ввода полного имени файла (без расширения), в этом случае имя файла может отличаться от “стандартного”. При вводе канала записи “0” ввод осуществляется из файла с фиксированным именем tmp_gr.dat, автоматически выгружаемого программой-препроцессором при запуске программы «Rp_2018.exe» из меню “Запуск”. Данную функцию удобно использовать при многократном изменении исходных данных и запуске программы-солвера без предварительной записи файла типа gr1***.dat.

При корректном вводе исходных данных на экране появляется сообщение об успешном вводе данных и рассчитанном значении коэффициента избытка воздуха, рисунок 27.

Если был выбран вариант расчета, предусматривающий задание расхода топлива, а не фиксированного состава смеси, то контрольная информация будет предварительной, она будет уточняться при выполнении итераций расчета. В этом случае программа позволяет прямо с экрана задать новое значение расхода топлива на один цилиндр.

Важно! Скорректированное значение расхода топлива в файле исходных данных автоматически не корректируется! Это можно осуществить только путем возврата к коррекции исходных данных на соответствующей вкладке препроцессора с последующей перезаписью файла исходных данных типа `gr1***.dat`.

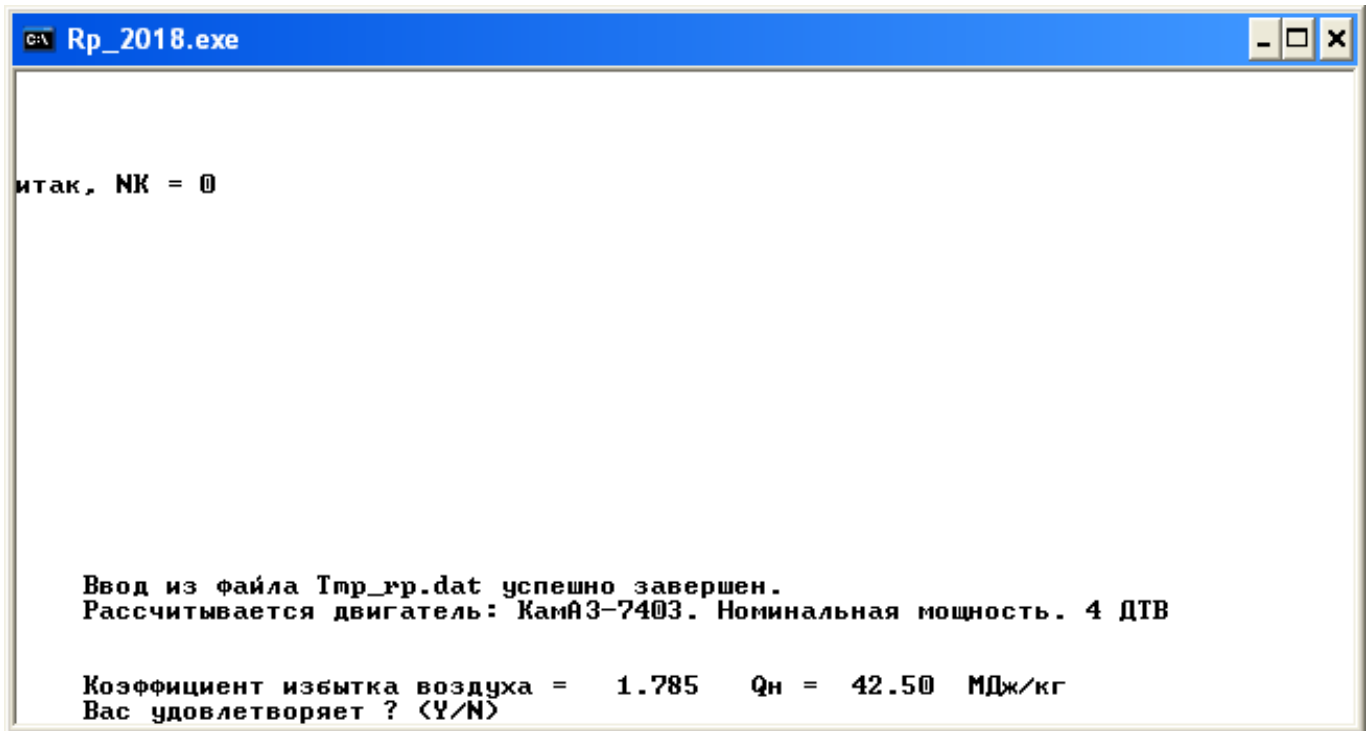


Рисунок 27 – Сообщение программы «Rp_2018.exe» об успешном вводе данных

Если полученное значение коэффициента избытка воздуха устраивает оператора-расчетчика, с полученным значением следует согласиться, введя в поле, указанное курсором букву “Y” или “y” (англ. “Yes”), после чего программа выполняет первые пять проходов расчета на сходимость по давлению и массе рабочего тела в цилиндре в начале сжатия. В процессе расчета программа выводит на экран сообщения о номере прохода, рассчитываемом такте, угле начала сгорания и давлении и температуре в конце такта сгорания-расширения, а также текущих значениях давления, температуры, массы рабочего тела и некоторых других, рисунок 28. После выполнения первых пяти проходов на экране отображается таблица индикаторных показателей рабочего цикла, и далее, при нажатии клавиши ENTER – эффективные показатели, рисунки 29, 30.

Проход 5

ПРОЦЕСС СЖАТИЯ - РАСШИРЕНИЯ

Fi	P	dP/dFi	X	dX/dFi	T	dU/dFi
-145.0	2.16	.01	.0000	.0000	392.7	-5.3
-143.0	2.19	.01	.0000	.0000	394.0	-5.6
-141.0	2.22	.01	.0000	.0000	395.4	-5.9
-139.0	2.25	.01	.0000	.0000	396.8	-6.2
-137.0	2.28	.02	.0000	.0000	398.4	-6.5
-135.0	2.31	.02	.0000	.0000	400.0	-6.8
-133.0	2.34	.02	.0000	.0000	401.8	-7.1
-131.0	2.38	.02	.0000	.0000	403.6	-7.4
-129.0	2.42	.02	.0000	.0000	405.5	-7.7
-127.0	2.47	.02	.0000	.0000	407.5	-7.9
-125.0	2.51	.02	.0000	.0000	409.7	-8.2
-123.0	2.56	.03	.0000	.0000	411.9	-8.5
-121.0	2.61	.03	.0000	.0000	414.3	-8.8
-119.0	2.67	.03	.0000	.0000	416.7	-9.0
-117.0	2.73	.03	.0000	.0000	419.3	-9.3

Рисунок 28 – Сообщение программы «Rp_2018.exe» в процессе расчета

*** ИНДИКАТОРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЦИКЛА ***

Мощность	32.00 [кВт]	43.47 [л.с.]
Расход топлива	203.14 [г/кВт*ч]	149.51 [г/л.с.*ч]
Действительный коэффициент избытка воздуха	1.472	
Действительный расход воздуха на цилиндр	167.53 [кг/ч]	
Инд. КПД	.417	Индикаторное давление
Инд. момент цилиндра	138.89 [Н*м]	14.16 [кг*м]
Максимальные значения по циклу:		
Макс. давление сгорания	109.91 [бар]	при Fi= 6.0
Макс. температура цикла	1734.0 [K]	при Fi= 35.6
Макс. жесткость процесса	3.830 [бар/град]	при Fi= -4
Среднецикловая температура	769.89 [K]	
Результирующая температура	1092.70 [K]	
Средний коэфф-т теплоотдачи	530.54 [Вт/м^2*K]	
Коэффициент остаточных газов	.149	Заброс .00 %
Коэффициент наполнения	.807	
Коэффициент продувки	1.151	
Мощность насосных ходов	3.345 [кВт]	(4.55 [л.с.])

Для продолжения введите "ENTER"

Рисунок 29 – Сообщение программы «Rp_2018.exe» об индикаторных показателях

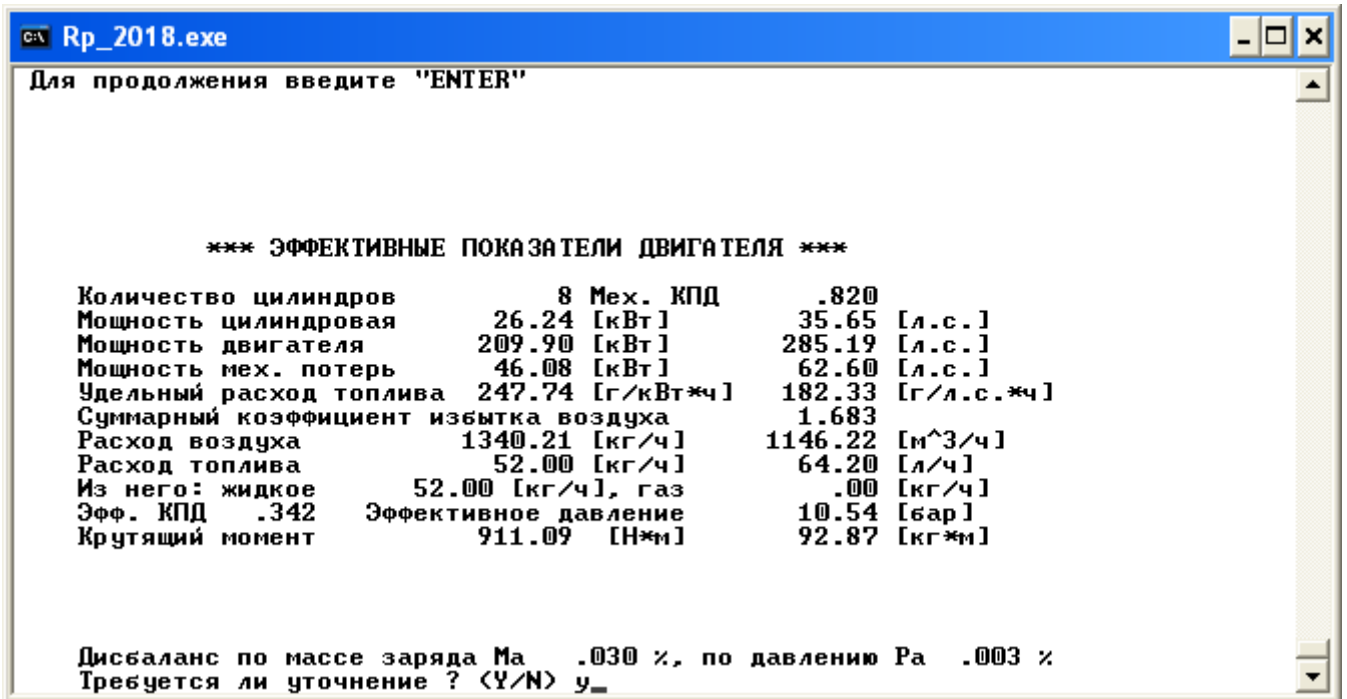


Рисунок 30 – Сообщение программы «Rp_2018.exe» об эффективных показателях

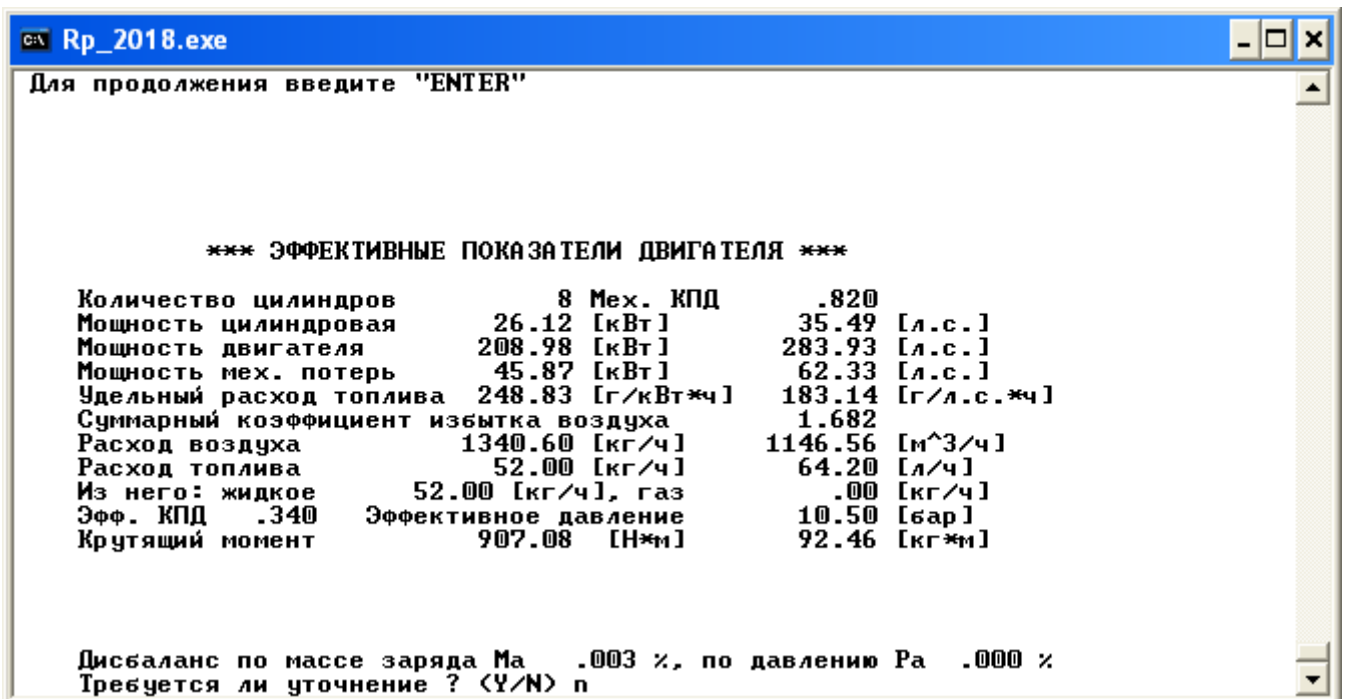


Рисунок 31 – Сообщение программы «Rp_2018.exe» об эффективных показателях после выполнения дополнительных проходов расчета

При выводе эффективных показателей внизу экрана также отображаются значения невязок (в %) по давлению и массе заряда в начале такта сжатия. На экране также отображается запрос о выполнении дополнительных проходов расчета для повышения точности сходимости расчетных данных. Желательно выполнить допол-

нительные проходы до достижения сходимости по массе заряда и давлению в цилиндре не хуже 0,02 % (еще 2-3 прохода). Выполнение последующих проходов не приводит к повышению точности результата. Для отказа от выполнения дальнейших проходов расчета, в поле, указанное курсором, необходимо ввести букву “N” или “n” (англ. “No”), см. рисунок 31. За этим следует запрос на запись файла индикаторной диаграммы. При необходимости записи следует ввести “Y” или “y”, рисунок 32, тогда будет записан файл индикаторной диаграммы типа ind***.dat.

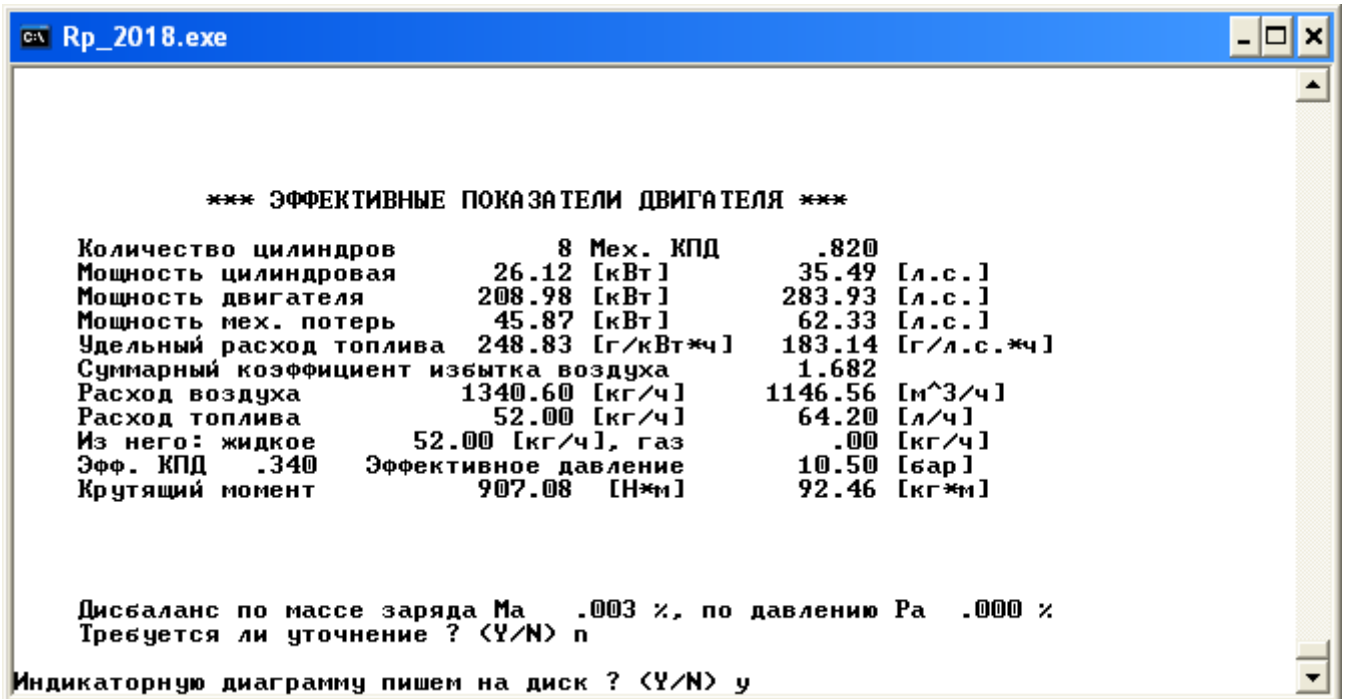


Рисунок 32 – Согласие на вывод индикаторной диаграммы



Рисунок 33 – Запрос на вывод файлов графической информации к расчету

Далее следует запрос на вывод файлов графического представления результатов. При необходимости записи следует ввести “Y” или “y”, см. рисунок 33. После этого программа-солвер завершает свою работу. Если программа «Rp_2018.exe» была запущена программой-препроцессором, то управление возвращается последней, рисунок 34.

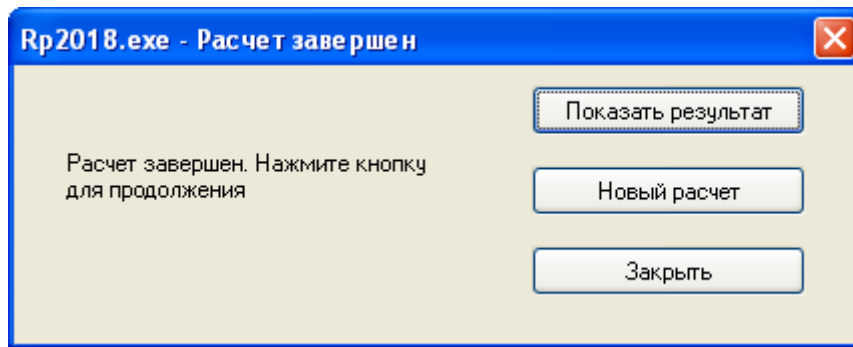


Рисунок 34 – окно программы-препроцессора после завершения работы программы-солвера «Rp_2018.exe»

При завершении расчета в рабочей директории должны быть сформированы: итоговый листинг выходной информации IPR***.txt, файл индикаторной диаграммы Ind***.dat. Также выгружаются файлы графической информации к результатам расчета: файл параметров рабочего процесса на рабочих ходах Rbh***.dat, файл параметров рабочего процесса на тактах газообмена Gzo***.dat, файл Dgc***.dat – массив интегральной и дифференциальной характеристик впрыска топлива (если использовалась 5-я динамика тепловыделения; файл Ptf***.dat – массив информации по давлениям, температурам, массе рабочего тела и средним по поверхности коэффициентам теплоотдачи в целом за цикл; файл Ptv***.dat – массив информации по давлениям и температурам рабочего тела в цикле для построения «свернутых» P-V и T-V диаграмм. Во всех записываемых файлах *** – соответствует номеру варианта расчета, заданному в файле RPI***.dat.

После появления окна программы-препроцессора оператор может выбрать три продолжения работы:

1. «Показать результат» – выход на графический постпроцессор;
2. «Новый расчет» – выход на форму ввода данных препроцессора;
3. «Закреть» – выход из программы-препроцессора рабочего процесса с передачей управления программе-препроцессору ПМК «RpTox2018.exe», т.е. на экране ПК должно появиться стартовое окно ПМК, см. рисунок 3.

Прим.: стартовое окно ПМК может оказаться «за» окнами открытых приложений и оказаться «невидимым». **Ищите его за ними!**

Для начала работы с системой визуализации можно нажать кнопку «Показать результат», см. рисунок 34. Если было выбрано «Новый расчет» можно обратиться к меню «Запуск» Главного меню, где выбрать функцию «Графика». Даже если было выбрано «Закрывать», можно вновь запустить программу-препроцессор рабочего процесса и обратиться к функции запуска графического постпроцессора.

При нажатии кнопки «Показать результат» окна завершения расчета запускается программа-постпроцессор и на экране появляется окно выбора файла, рисунок 35. Оно же появляется при выборе пункта «Загрузить» меню «Файл» графического постпроцессора. Оператор имеет возможность выбора файла для вывода графической информации.

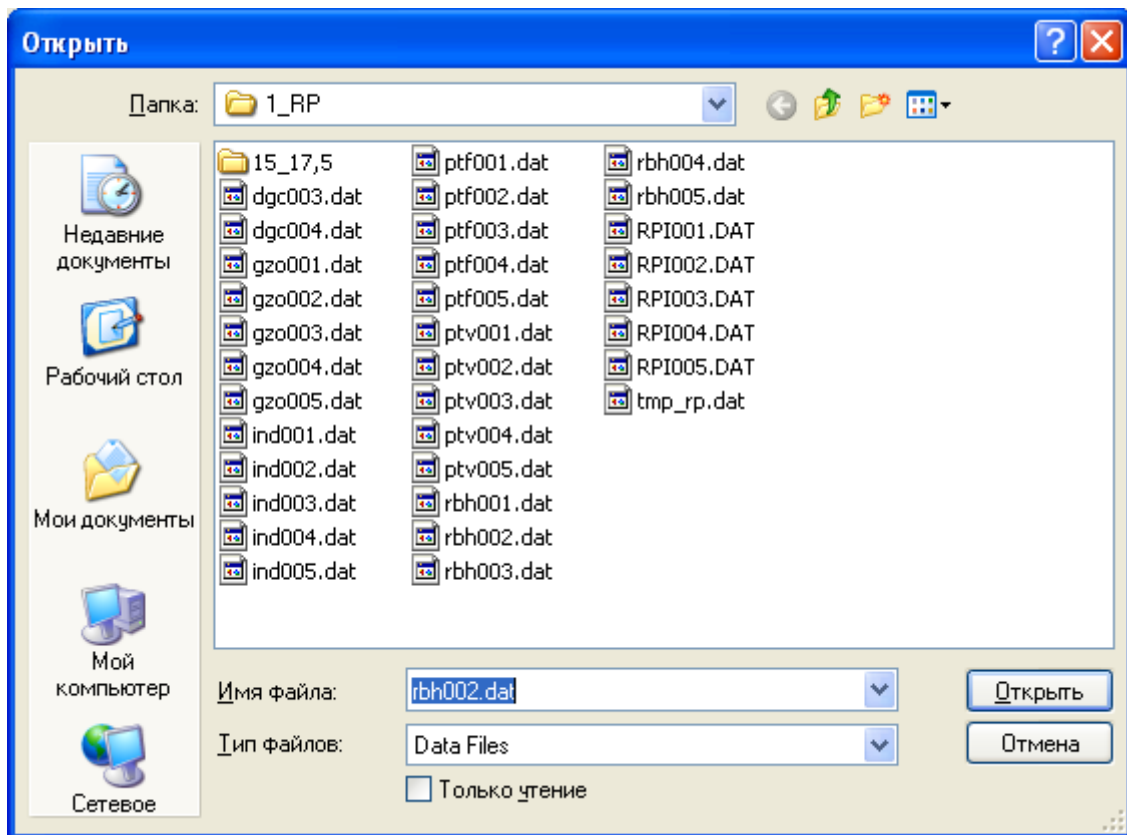


Рисунок 35 – Меню выбора файла графического постпроцессора

Прим.: при помощи встроенного графического постпроцессора можно выполнить построение любых графиков. Для этого достаточно создать файлы данных со структурой, используемой постпроцессором, см. раздел «Входные и выходные данные».

Данные, считанные из файла, трактуются следующим образом: данные первого столбца воспринимаются как значения оси абсцисс, каждый последующий столбец воспринимается как соответствующие значения ординат для каждой из кривых.

Текстовые данные, расположенные в файле после числовых и отделенные от них пустой строкой, воспринимаются программой как подписи к оси абсцисс и графикам.

Данные, расположенные после подписей и отделенные от них пустой строкой, определяют размерности данных.

Данные, расположенные после размерностей (если они есть) и отделенные от них пустой строкой, определяют масштабы отображения соответствующих кривых.

Каждая кривая отображается своим цветом (своим типом линии при монохромном отображении). В правом верхнем углу области отображения выводится легенда графика. Под легендой отображаются размерности и масштабы кривых.

Примеры выгружаемых графических изображений приведены на рисунках 36...41.

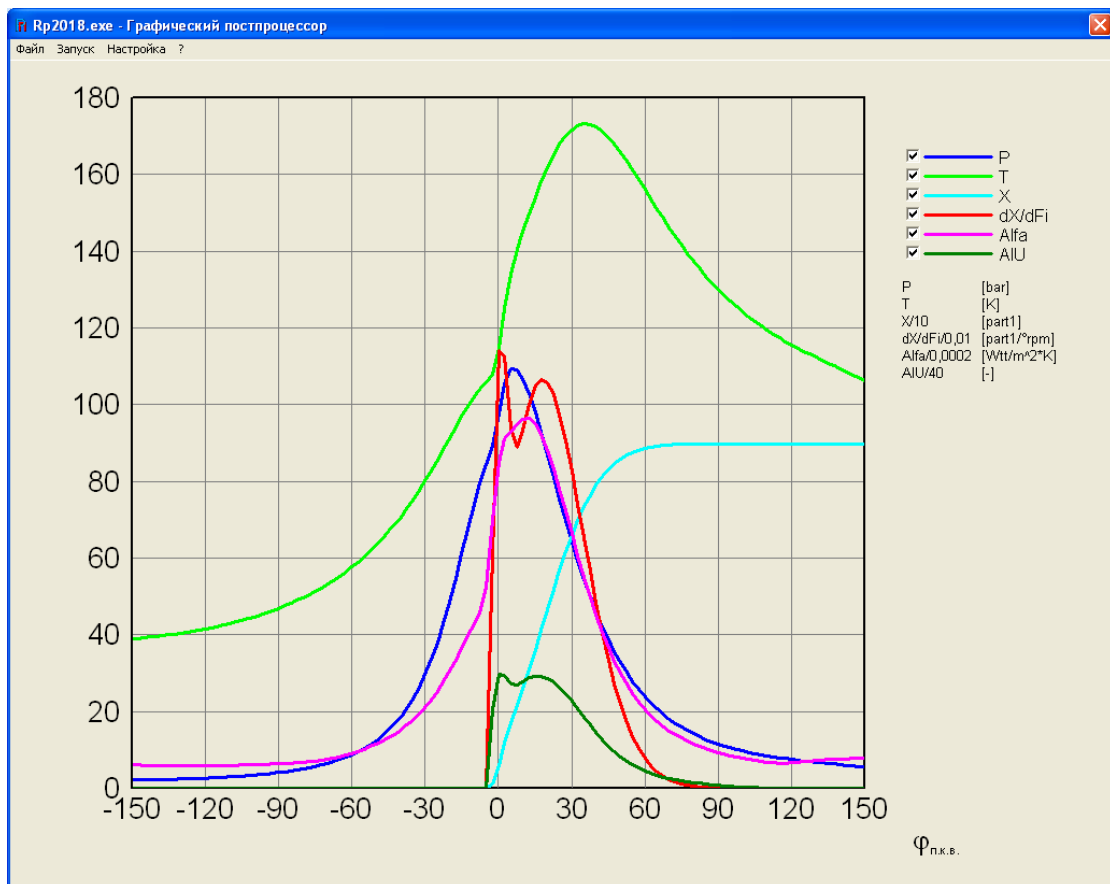
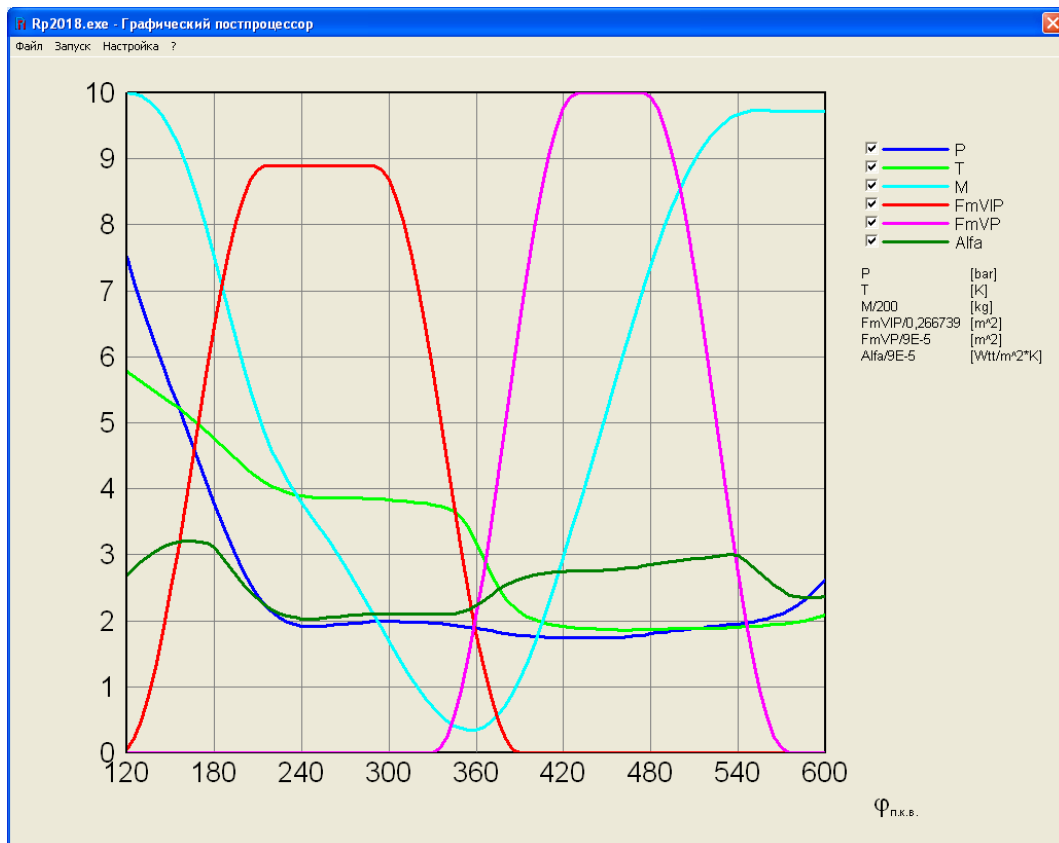
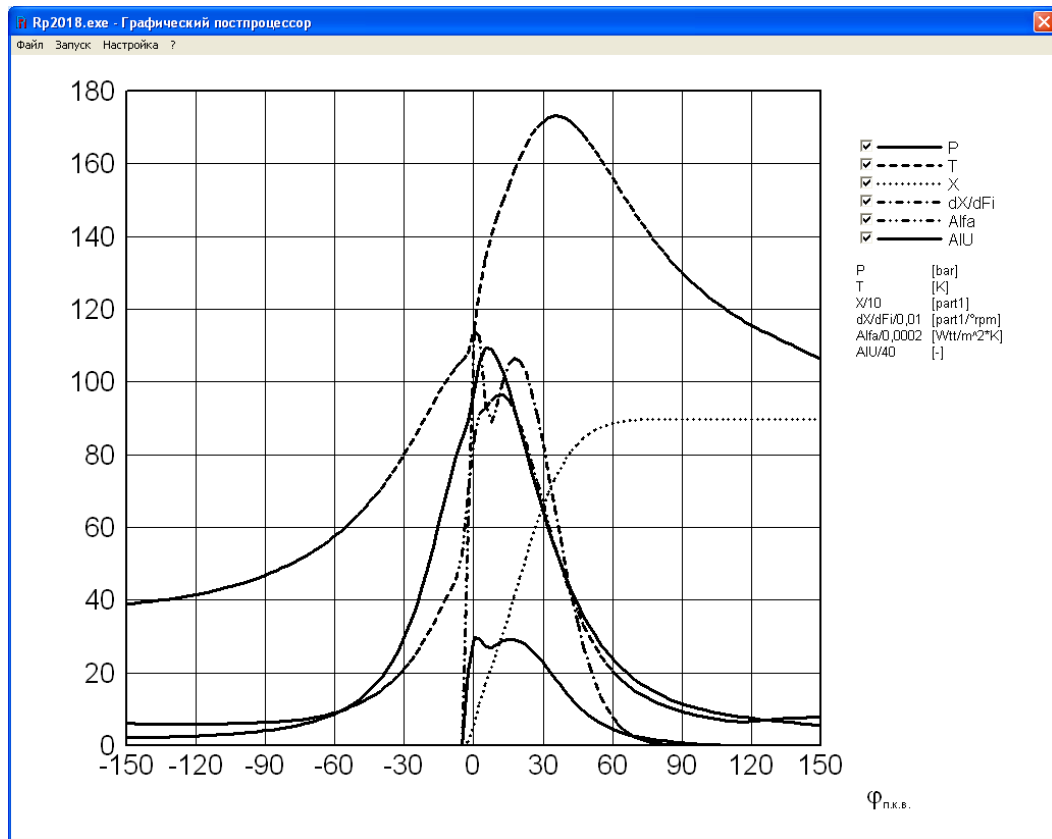
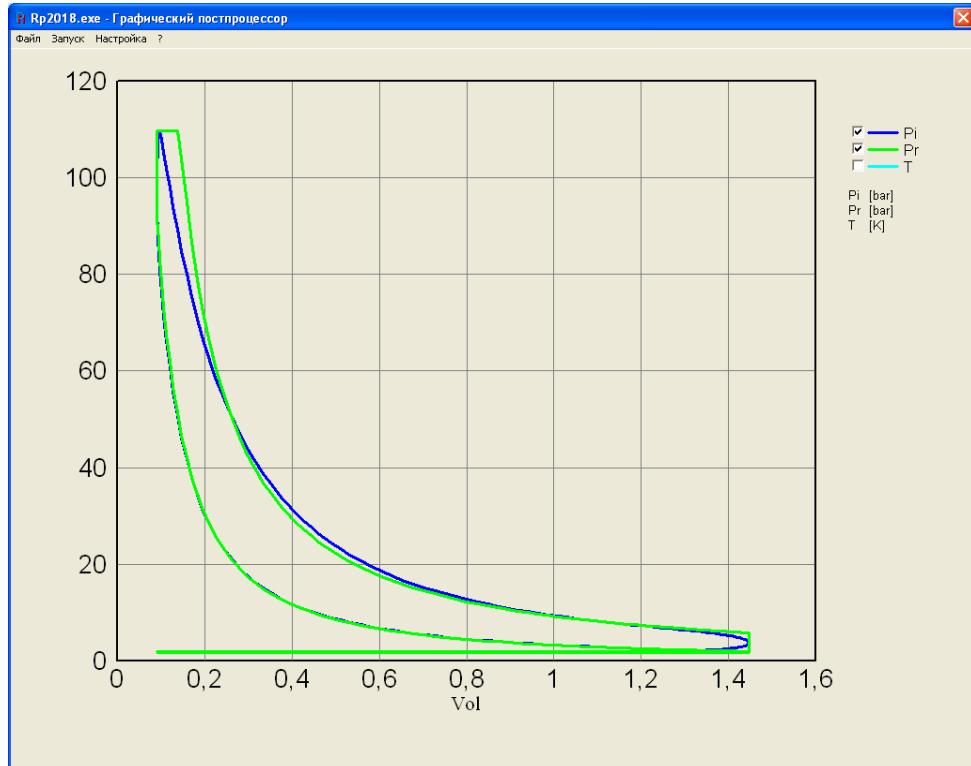
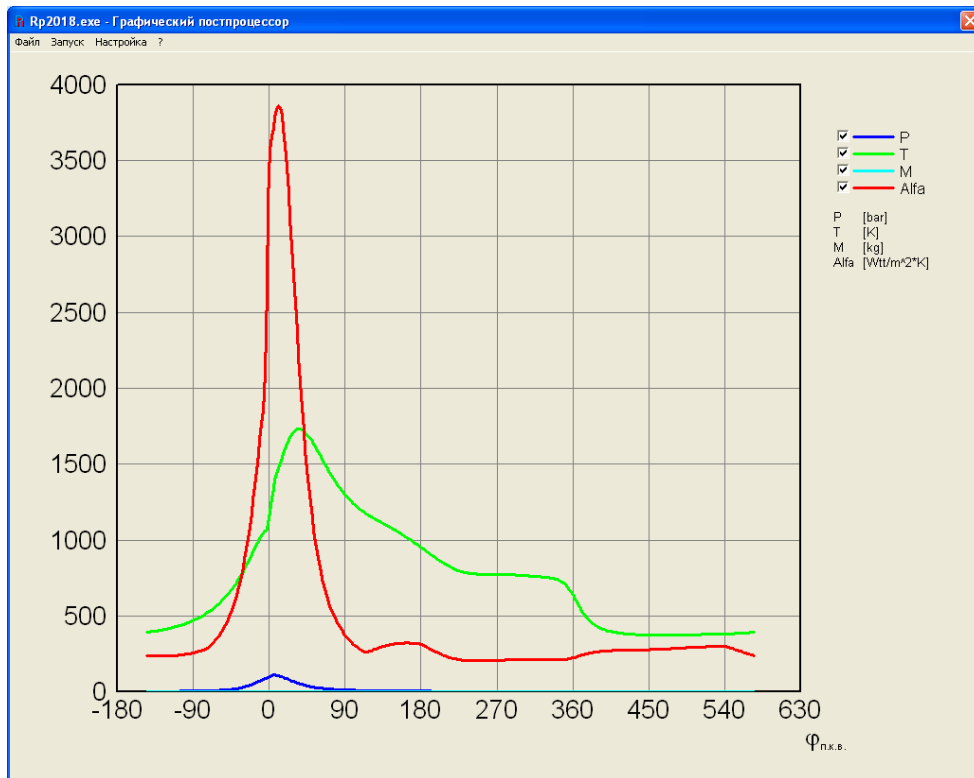


Рисунок 36 – Изменение параметров рабочего процесса на рабочих ходах, файл Rbh***.dat



50
RU.02068574.02018-02 31



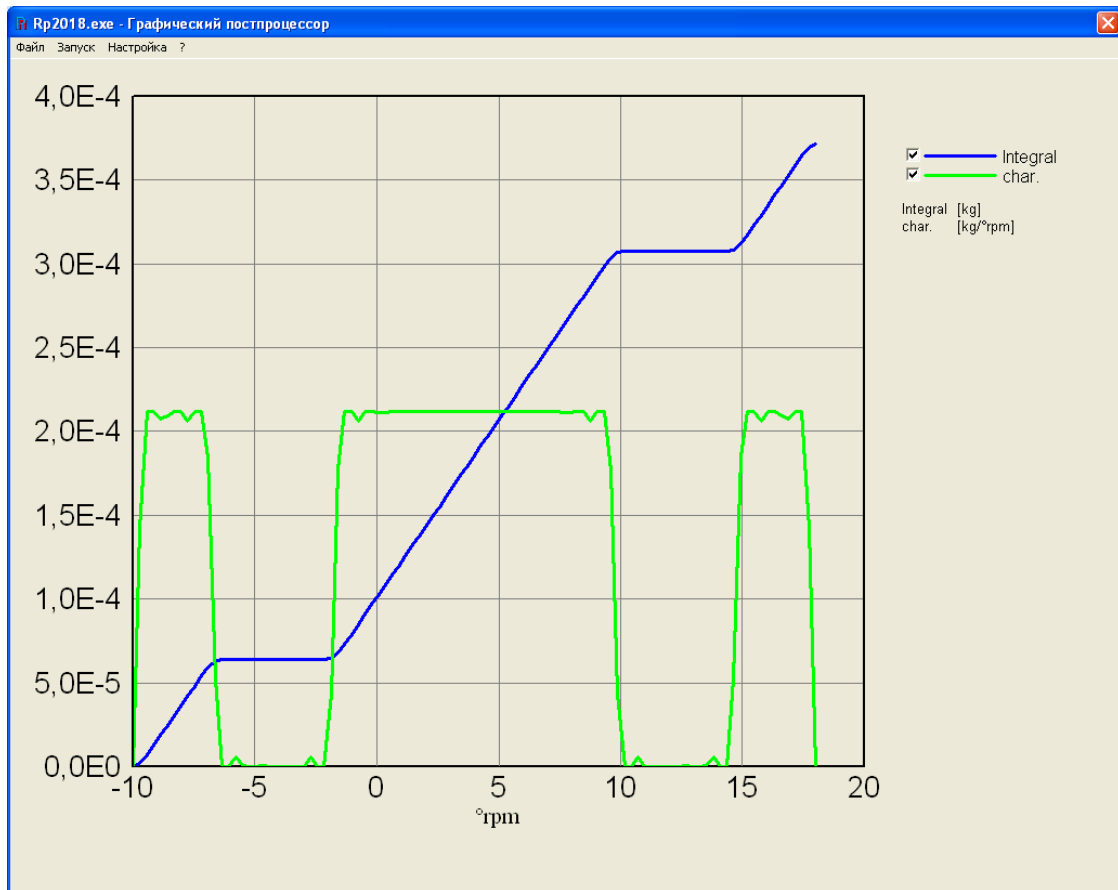


Рисунок 41 – Интегральная и дифференциальная характеристики топливоподачи, файл Dgc***.dat

На экран можно вывести кривые изменения:

- давления, [бар] и температуры в цилиндре, [K];
- массы рабочего тела в цилиндре, [кг];
- среднего по поверхности КС мгновенного суммарного коэффициента теплоотдачи, [Вт/м²·K], а также в отдельности – лучистого теплообмена;
- дифференциальной и интегральной характеристик тепловыделения;
- дифференциальной и интегральной характеристик топливоподачи;
- площадей проходного сечения органов газораспределения.

Кривые на поле графика могут быть выведены как вместе, так и по отдельности. Вывод каждой требуемой кривой на экран осуществляется установкой маркера в соответствующее окно экрана.

Все полученные рисунки могут быть сохранены на компьютере в формате .bmp функцией «Сохранить изображение» в меню «Файл» постпроцессора или выведены на печать. После просмотра графиков и сохранения изображений, через меню «Запуск» можно вернуться в Главное меню комплекса «RP-TOX-2018», см. рисунок 3.

4.3. Выполнение программы расчета процесса образования оксидов азота

При нажатии клавиши «Расчет NOx» Главного меню комплекса «RP-TOX-2018», см. рисунок 3, на экран ПК выводится меню программы-препроцессора расчета оксидов азота, рисунок 42, которое не имеет форм ввода данных, поскольку все исходные данные, используемые программой-солвером находятся в файлах индикаторных диаграмм, выгружаемый программой синтеза рабочего процесса.



Рисунок 42 – Меню программы-препроцессора «NOx2018.exe»

Меню программы-препроцессора расчета оксидов азота имеет всего два подменю: «Файл» и «Запуск». Если оператор уверен, что в рабочей директории расчета оксидов азота находится нужный файл индикаторной диаграммы (т.е. он туда перезаписан из рабочей директории расчета рабочего процесса), то он может непосредственно использовать меню «Запуск» и выполнить расчет с использованием известного ему

файла. Если такой уверенности нет, можно воспользоваться меню «Файл» и через него выбрать файл индикаторной диаграммы, рисунок 43. После выбора файла и нажатия клавиши «Открыть» программа-препроцессор формирует файл TmpNox.dat, содержащий сведения о пути к выбранному файлу индикаторной диаграммы. Чтобы им воспользоваться, после запуска программы-солвера «NOx_2018.exe» через меню «Запуск» в качестве номера файла данных следует ввести «0», рисунок 44.

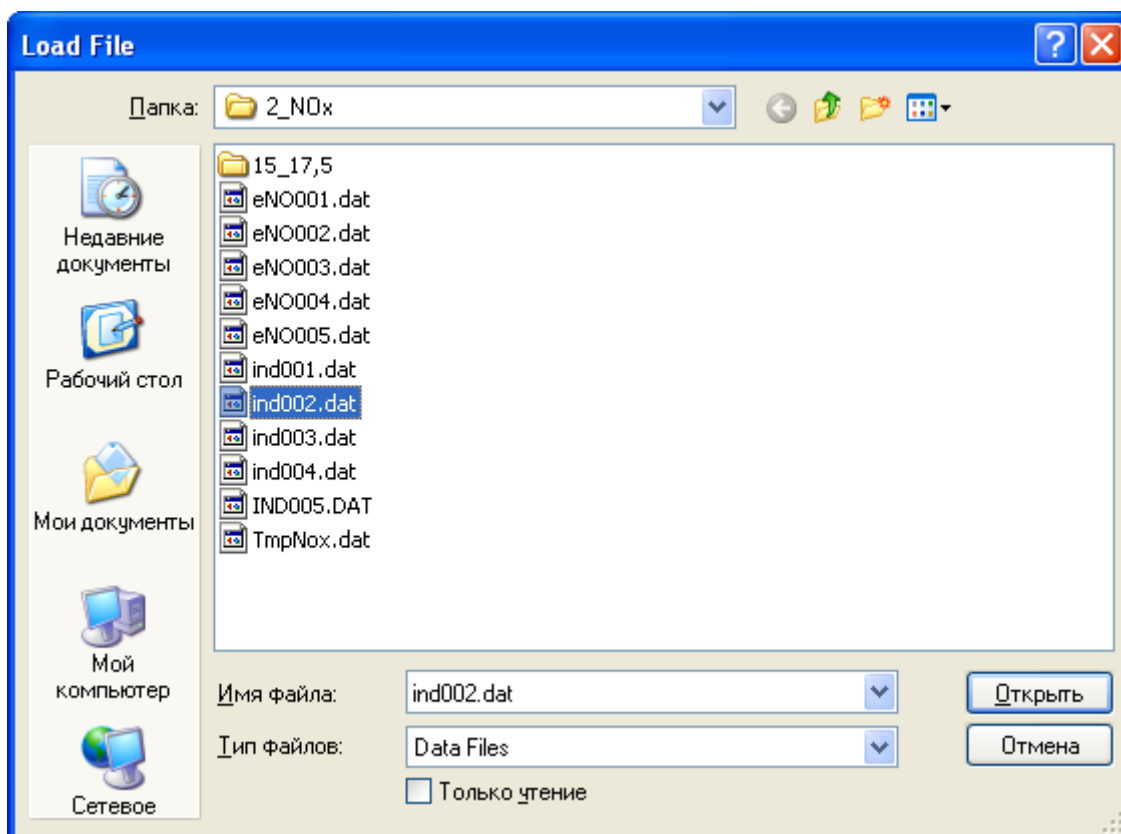


Рисунок 43 – Выбор файла индикаторной диаграммы через меню «Файл»

После считывания файла индикаторной диаграммы (TmpNox.dat или Ind***.dat) программа-солвер «NOx_2018.exe» выполняет расчет, по окончании которого на экран выводятся текущие расчетные данные и сообщение об удачном окончании расчета, рисунок 45. Для окончания работы программы-солвера необходимо нажать клавишу «Enter». Если программа «NOx_2018.exe» была запущена программой-препроцессором «NOx2018.exe» (а не автономно), то управление возвращается последней, рисунок 46.

При завершении расчета в рабочей директории должны быть сформированы: итоговый листинг выходной информации NOX***.txt и файл графической информации к результатам расчета eNO***.dat, где *** – соответствует номеру варианта расчета, заданному в файле Ind***.dat.

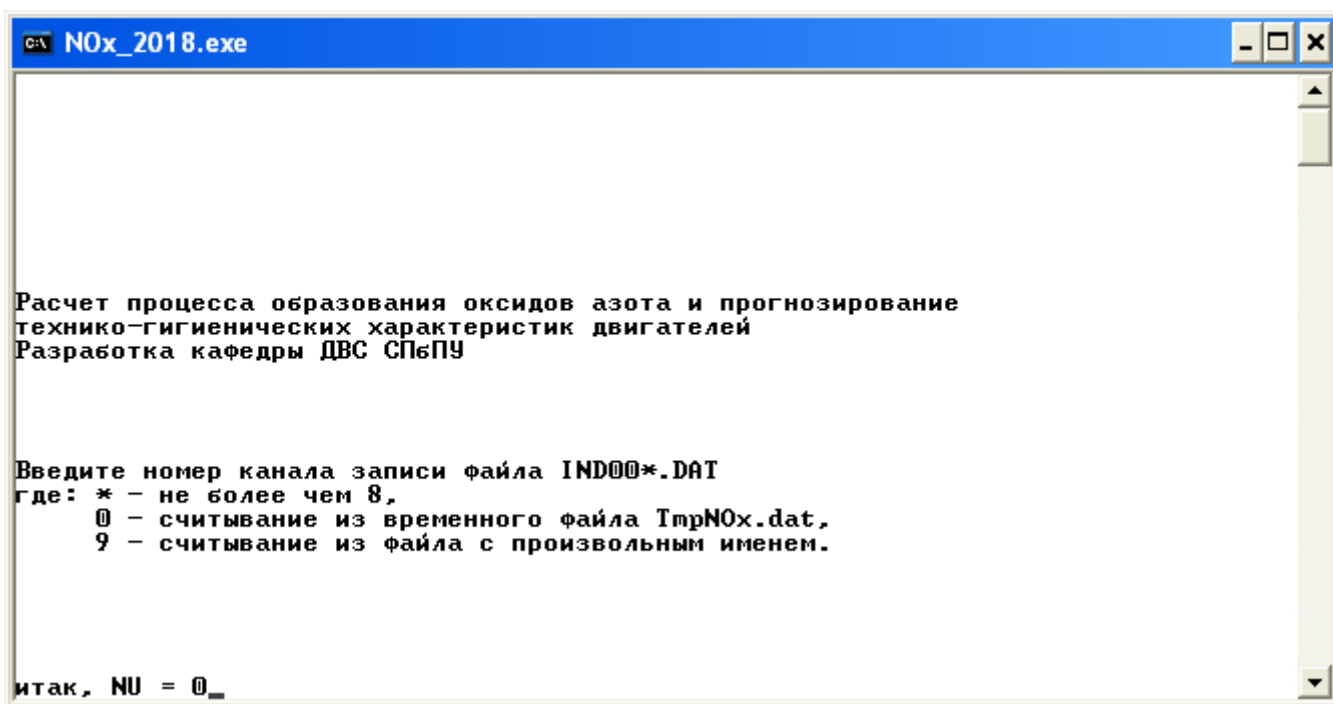


Рисунок 44 – Выбор файла индикаторной диаграммы после запуска программы-солвера «NOx_2018.exe»

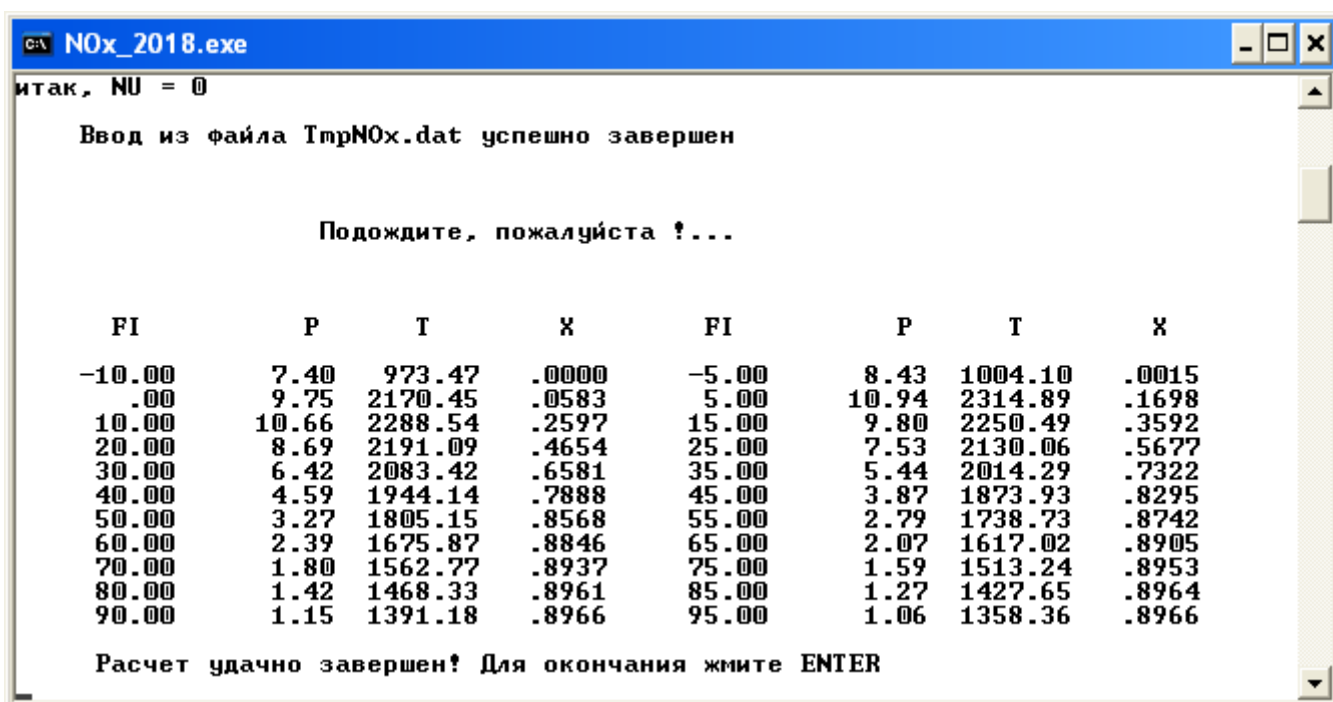


Рисунок 45 – Программа «NOx_2018.exe»: расчет выполнен

После появления окна программы-препроцессора оператор может выбрать три продолжения работы:

1. «Показать результат» – выход на графический постпроцессор;
2. «Новый расчет» – выход на форму ввода данных препроцессора;

3. «Закрывать» – выход из программы-препроцессора рабочего процесса с передачей управления программе-препроцессору ПМК «RpTox2018.exe», т.е. на экране ПК должно появиться стартовое окно ПМК, см. рисунок 3.

Прим.: окно завершения расчета и стартовое окно ПМК могут оказаться «за» окнами открытых приложений и оказаться «невидимыми». **Ищите их там!**

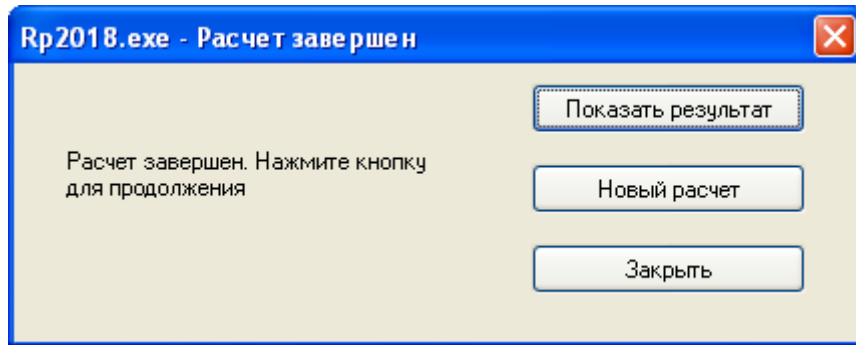


Рисунок 46 – окно программы-препроцессора после завершения работы программы-солвера «NOx_2018.exe»

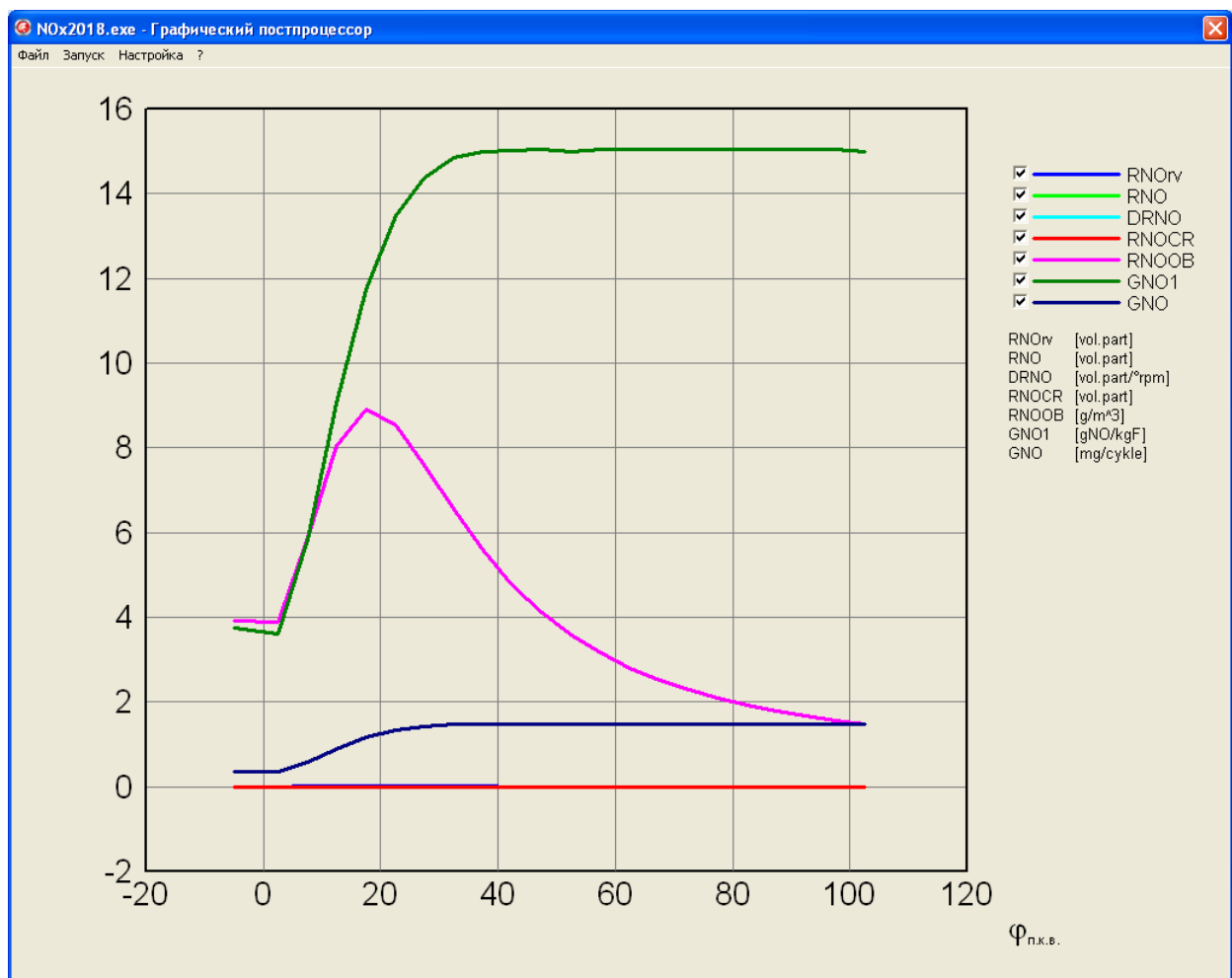


Рисунок 47 – Изменение параметров токсичности в рабочем цикле

Принципы работы с графическим постпроцессором в целом те же, что и в расчете рабочих процессов. При нажатии кнопки «Показать результат» окна завершения расчета запускается программа-постпроцессор и на экране появляется окно выбора файла, аналогичное показанному на рисунке 35. Оно же появляется при выборе пункта «Загрузить» меню «Файл» графического постпроцессора. Оператор имеет возможность выбора файла для вывода графической информации. Пример графического представления результатов расчета показан на рисунке 47.

4.4. Выполнение программы расчета процесса результирующего сажевыделения

При нажатии клавиши «Сажа» Главного меню комплекса «RP-ТОХ-2018», см. рисунок 3, на экран ПК выводится меню программы-препроцессора расчета результирующего сажевыделения «Sazha2018.exe», рисунок 48.

The screenshot shows a Windows application window titled "Sazha2018.exe - Ввод исходных данных". The window has a menu bar with "Файл", "Запуск", and "?". Below the menu bar are three input fields: "№ варианта" (a small box), "Описание двигателя" (a wide text box), and "Файл индикаторной диаграммы" (a wide text box). Below these fields are three tabs: "Групповой состав топлива" (selected), "Кoeffициенты", and "Топливоподача". Under the "Групповой состав топлива" tab, there is a section titled "Массовые доли компонентов топлива" containing three rows: "Парафины" with a text box, "Нафтенy" with a text box, and "Ароматики" with a text box. At the bottom of the window, a red box contains the text "Сумма должна быть равна 1".

Рисунок 48 – Меню программы-препроцессора «Sazha2018.exe»

Меню программы-препроцессора расчета результирующего сажевыделения имеет три вкладки, требующие ввода дополнительных исходных данных и два подменю: «Файл» и «Запуск».

Для выполнения расчета требуется загрузить файл индикаторной диаграммы, который **предварительно должен быть перенесен из рабочей директории расчета рабочего процесса в директорию расчета выбросов сажи**. Загрузка осуществляется путем обращения к меню «Файл» и далее – «Выбрать файл индикаторной диаграммы», после чего откроется меню выбора файла, рисунок 49. После выбора файла и нажатия клавиши «Открыть» подгрузку индикаторной диаграммы можно считать выполненной (т.е. в записываемом программой-препроцессором файле TmpSaz.dat будет ссылка на выбранный файл),

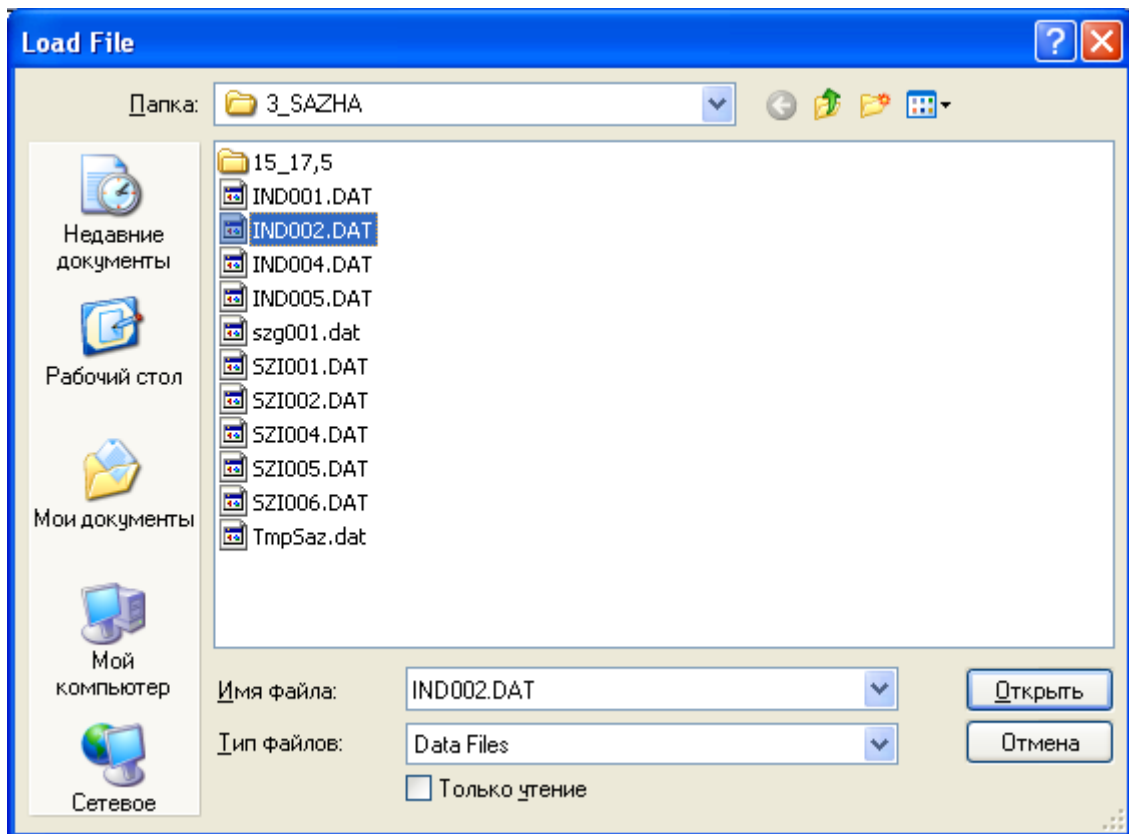


Рисунок 49 – Выбор файла индикаторной диаграммы через меню «Файл»

Ввод исходных данных на формах ввода может быть осуществлен путем ручного их заполнения. Разделительным знаком для дробных десятичных чисел является точка. Однако проще выбрать имеющийся файл двигателя-прототипа и осуществить корректировку данных.

Для **загрузки** данных с диска выберите в меню «Файл» функцию «Загрузить» и выберете имя имеющегося файла с использованием стандартных процедур Windows, рисунок 50.

После **корректировки** данных запишите исправленный файл либо с тем же именем (Функция «Сохранить»), либо с новым именем (Функция «Сохранить как») в меню «Файл».

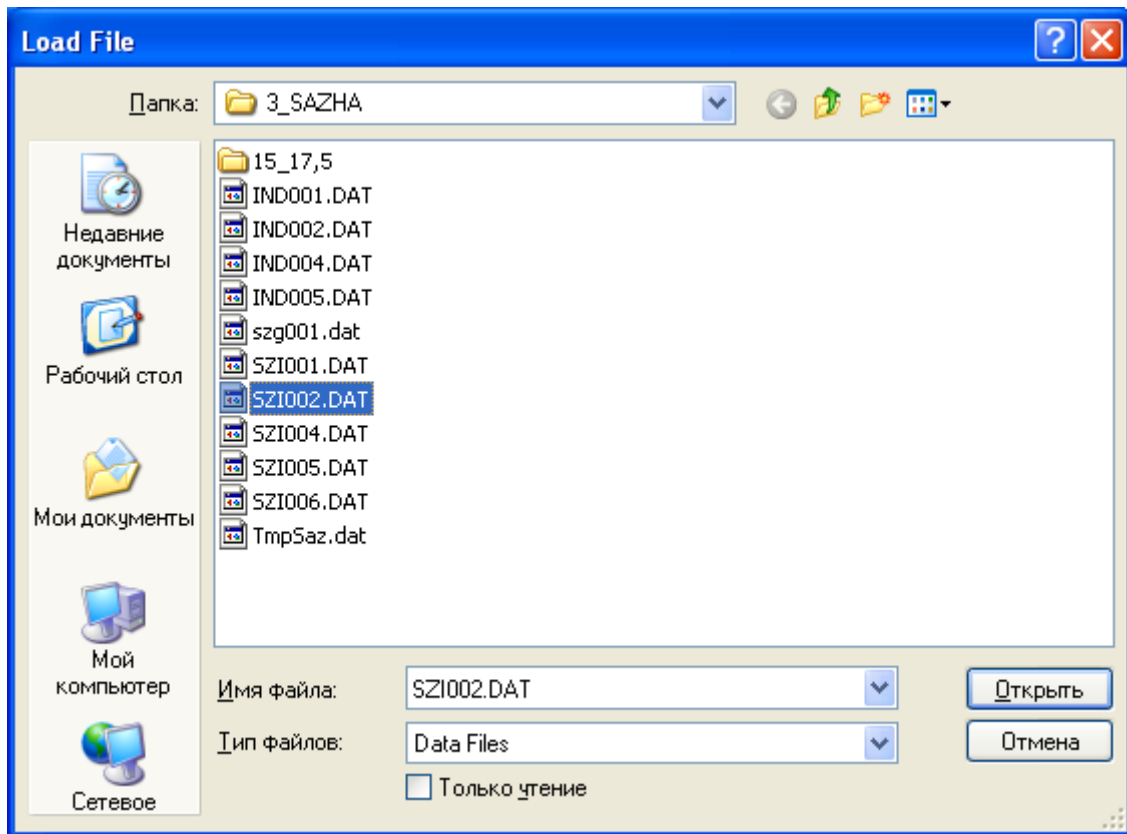


Рисунок 50 – Выбор файла-прототипа исходных данных к расчету сажи

Далее рассмотрим содержимое экранных меню (вкладок) для ввода исходных данных. Первое из них – меню «**Групповой состав топлива**», рисунок 51.

Однако перед тем как ее заполнять рекомендуется заполнить три поля ввода в верхней части вкладки:

- номер варианта расчета – произвольное трехзначное число от 000 до 999, принципиально возможно использование букв английского алфавита;
- описание двигателя – произвольная текстовая информация;
- файл индикаторной диаграммы (имя файла появляется в поле ввода автоматически при подгрузке индикаторной диаграммы).

В меню «Групповой состав топлива» задаются массовые доли компонентов топлива (рисунок 51) – парафинов, нафтенов и ароматиков, которые в сумме должны составлять единицу. Если это не так, будет сообщение, см. рисунок 50.

Массовые доли компонентов топлива	
Парафины	0.815
Нафтены	0.166
Ароматики	0.019

Рисунок 51 – Заполнение вкладки «Групповой состав топлива»

При заполнении данной вкладки следует опираться на статистические, литературные или опытные данные по конкретным видам топлива. Приблизительно можно считать, что в дизельном топливе доля парафинов (т.е. алканов, в том числе непредельных) обычно составляет 70...90%, нафтенов – 5...20%, ароматических и их производных – 0...10%.

В меню «**Коэффициенты**» задаются «опытные» настроечные коэффициенты, и локальный коэффициент избытка воздуха в зоне образования сажи (0,4...0,6), рисунок 52.

The screenshot shows a software window titled "Sazha2018.exe - Ввод исходных данных". It has a menu bar with "Файл", "Запуск", and "?". Below the menu are three input fields: "№ варианта" with the value "002", "Описание двигателя" with the value "ГБ -ГБ± 7403 N=2200", and "Файл индикаторной диаграммы" with the value "ind002.dat". There are three tabs: "Групповой состав топлива", "Коэффициенты" (which is selected), and "Топливоподача". The "Коэффициенты" tab contains a table of coefficients:

Коэффициент B1	-1.5
Коэффициент B2	-0.06
Коэффициент B3	-1
Локальный Alfa	0.5

Рисунок 52 – Заполнение вкладки «Коэффициенты»

Следует отметить, что подбор коэффициентов является наиболее сложной и трудоемкой работой при расчете результирующего сажевыделения. В первом приближении, если эти данные неизвестны, все они могут быть заданы отрицательными величинами, см. рисунок 52. В этом случае расчетная программа сама их назначит из «имеющегося опыта», однако это не гарантирует адекватного конечного результата расчета. Некоторые подборки коэффициентов присутствуют в прилагаемых файлах примеров расчета.

В меню «Топливоподача» задаются параметры топливной аппаратуры и впрыска топлива, рисунок 53.

Скриншот окна «Sazha2018.exe - Ввод исходных данных». Вкладка «Топливоподача» содержит следующие параметры:

- № варианта: 002
- Описание двигателя: Лб -Ъ± 7403 N=2200
- Файл индикаторной диаграммы: ind002.dat
- Диаметр сопловых отверстий форсунки: 0.32 мм
- Количество отверстий: 4
- Тип характеристики впрыска:
 - Дифференциальная
 - Интегральная
- Угол начала подачи топлива: -12 град п.к.в.
- Продолжительность подачи топлива: 26 град п.к.в.
- Число точек таблицы давлений и характеристики впрыска: 14

Угол п.к.в.	-12	-10	-8	-6
Давление [бар]	80	140	220	320
Закон подачи топлива	0.0001	0.03	0.06	0.11

Рисунок 53 – Заполнение вкладки «Топливоподача»

На вкладке задаются:

- диаметр сопловых отверстий форсунки, [мм] (0.06...1,05);
- количество сопловых отверстий (4...22);
- тип характеристики впрыска дифференциальная/интегральная;
- углы начала и продолжительности подачи топлива, [°п.к.в.];
- количество точек таблицы давлений и характеристики впрыска;
- таблица давлений и характеристики впрыска.

Прим.: для того, чтобы корректно подготовить исходные данные, необходимо иметь сведения о применяемой топливной аппаратуре и владение методиками расчета (или экспериментального определения) параметров топливной аппаратуры. В первом приближении могут быть использованы литературные данные.

После ввода исходных данных, их необходимо **сохранить** на диске в виде файла фиксированной структуры. Для этого в Главном меню необходимо выбрать функцию «Сохранить как» для первоначальной записи или «Сохранить» для любых выполненных корректировок исходных данных. Файл должен быть сохранен в рабочей директории расчета сажи. Выбор имени файла для сохранения производится в соответствии со стандартными процедурами Windows. Рекомендуемое имя файлов для сохранения – `szi***.dat` (например, `szi001.dat`, `szi005.dat` и т.п.).

Для выполнения расчета следует воспользоваться меню «Запуск» и далее «Расчет». Программа препроцессор формирует файл `TmpSaz.dat`, по структуре совпадающий с файлом `szi***.dat`. Чтобы им воспользоваться, после запуска программы-солвера «SAZ_2018.exe» в качестве номера файла данных следует ввести «0», рисунок 54. Исходные данные также можно считывать непосредственно из файлов типа `szi***.dat` с известным оператору номером.

После считывания исходных данных из файла `TmpSaz.dat` или `szi***.dat`, а также индикаторной диаграммы из файла типа `Ind***.dat` программа-солвер «SAZ_2018.exe» выдает сообщение об их успешном считывании и выдает запрос на выполнение расчета. При вводе «Y» или «y» программа выполняет расчет, рисунок 55. При вводе «N» или «n» программа-солвер прерывает свою работу и управление передается программе-препроцессору.

В ходе выполнения расчета программа выводит на экран текущие значения угла поворота коленчатого вала, давления, температур образования и выгорания сажи, доли выгоревшего топлива, концентраций сажистых частиц, рисунок 56. По окончании расчета на экран выводятся расчетные данные по концентрации сажи на выхлопе и сообщение об удачном окончании расчета, рисунок 57. Для окончания работы программы-солвера необходимо нажать клавишу «Enter». Если программа «SAZ_2018.exe» была запущена программой-препроцессором «Sazha2018.exe» (а не автономно), то управление возвращается последней, рисунок 58.

При завершении расчета в рабочей директории должны быть сформированы: итоговый листинг выходной информации `SZH***.txt` и файл графической информации к результатам расчета `szg***.dat`, где *** – соответствует номеру варианта расчета, заданному в файле `szi***.dat`.

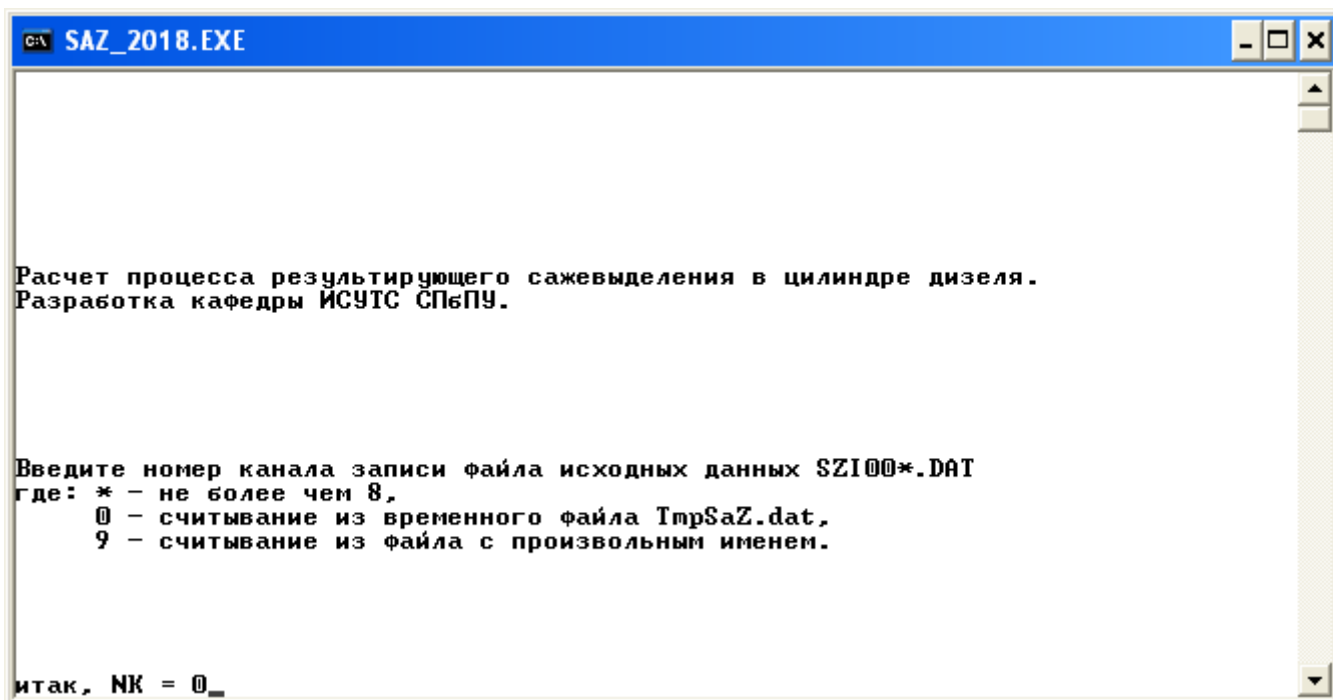


Рисунок 54 – Выбор файла исходных данных
после запуска программы-солвера «SAZ_2018.exe»

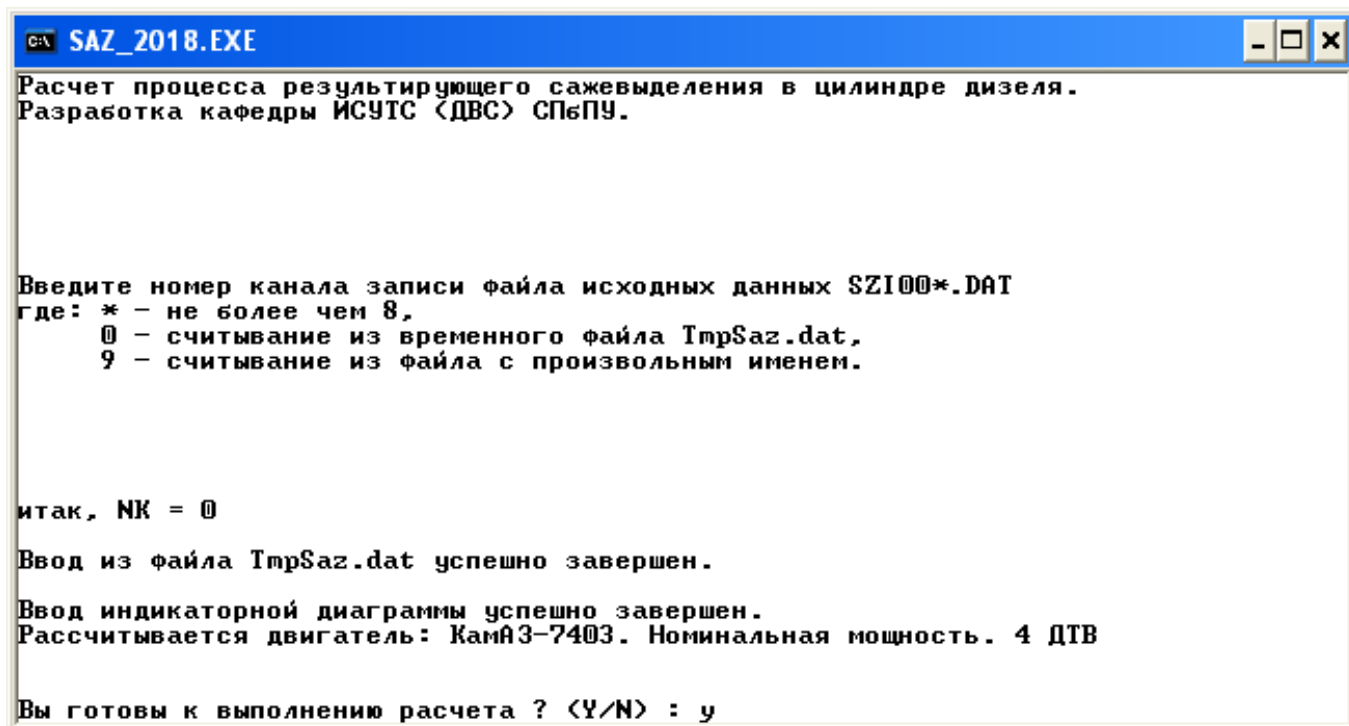


Рисунок 55 – Программа «SAZ_2018.exe»: исходные данные успешно введены

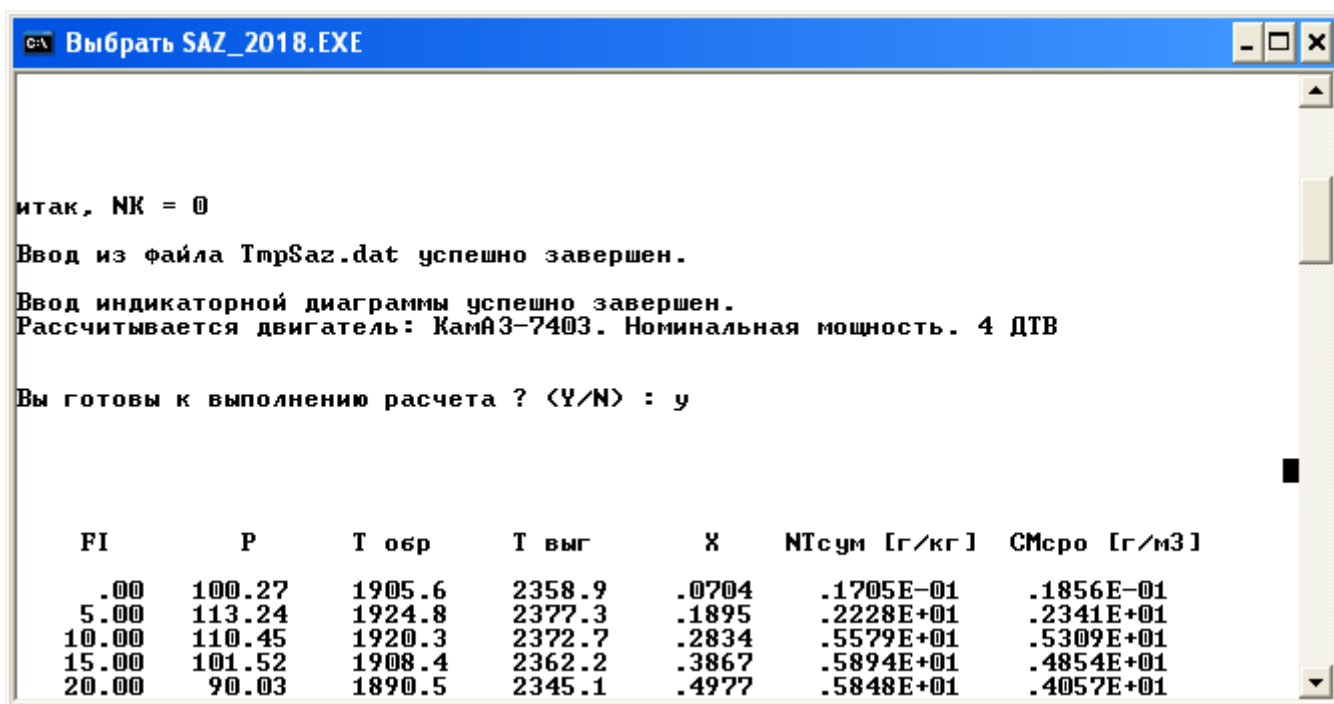


Рисунок 56 – Программа «SAZ_2018.exe»: ход выполнения расчета

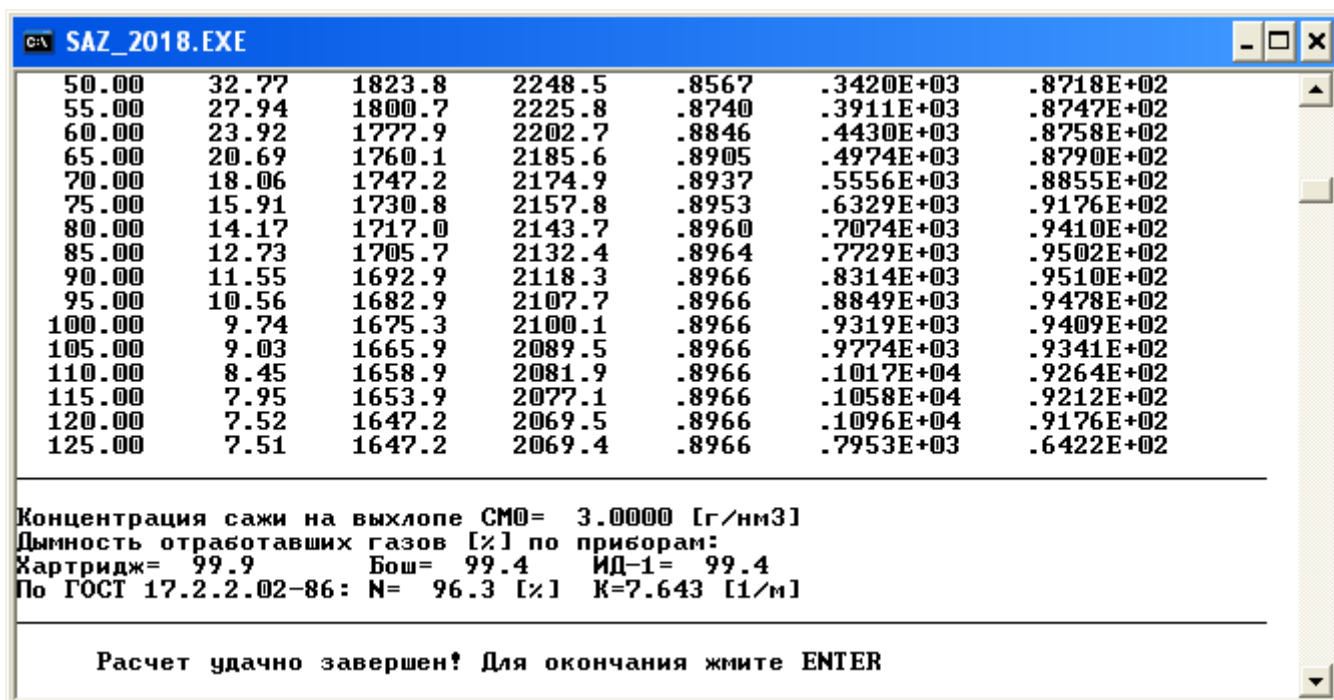


Рисунок 57 – Программа «SAZ_2018.exe»: расчет выполнен

После появления окна программы-препроцессора оператор может выбрать три продолжения работы:

1. «Показать результат» – выход на графический постпроцессор;
2. «Новый расчет» – выход на форму ввода данных препроцессора;

3. «Закрывать» – выход из программы-препроцессора рабочего процесса с передачей управления программе-препроцессору ПМК «RpTox2018.exe», т.е. на экране ПК должно появиться стартовое окно ПМК, см. рисунок 3.

Прим.: окно завершения расчета и стартовое окно ПМК могут оказаться «за» окнами открытых приложений и оказаться «невидимыми». **Найдите их за ними!**

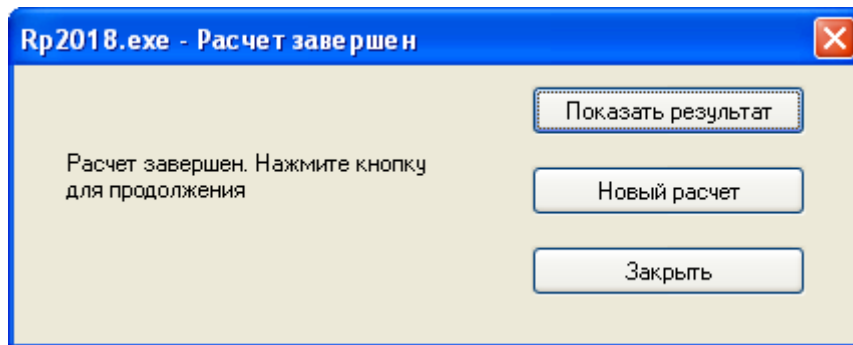


Рисунок 58 – окно программы-препроцессора после завершения работы программы-солвера «NOx_2018.exe»

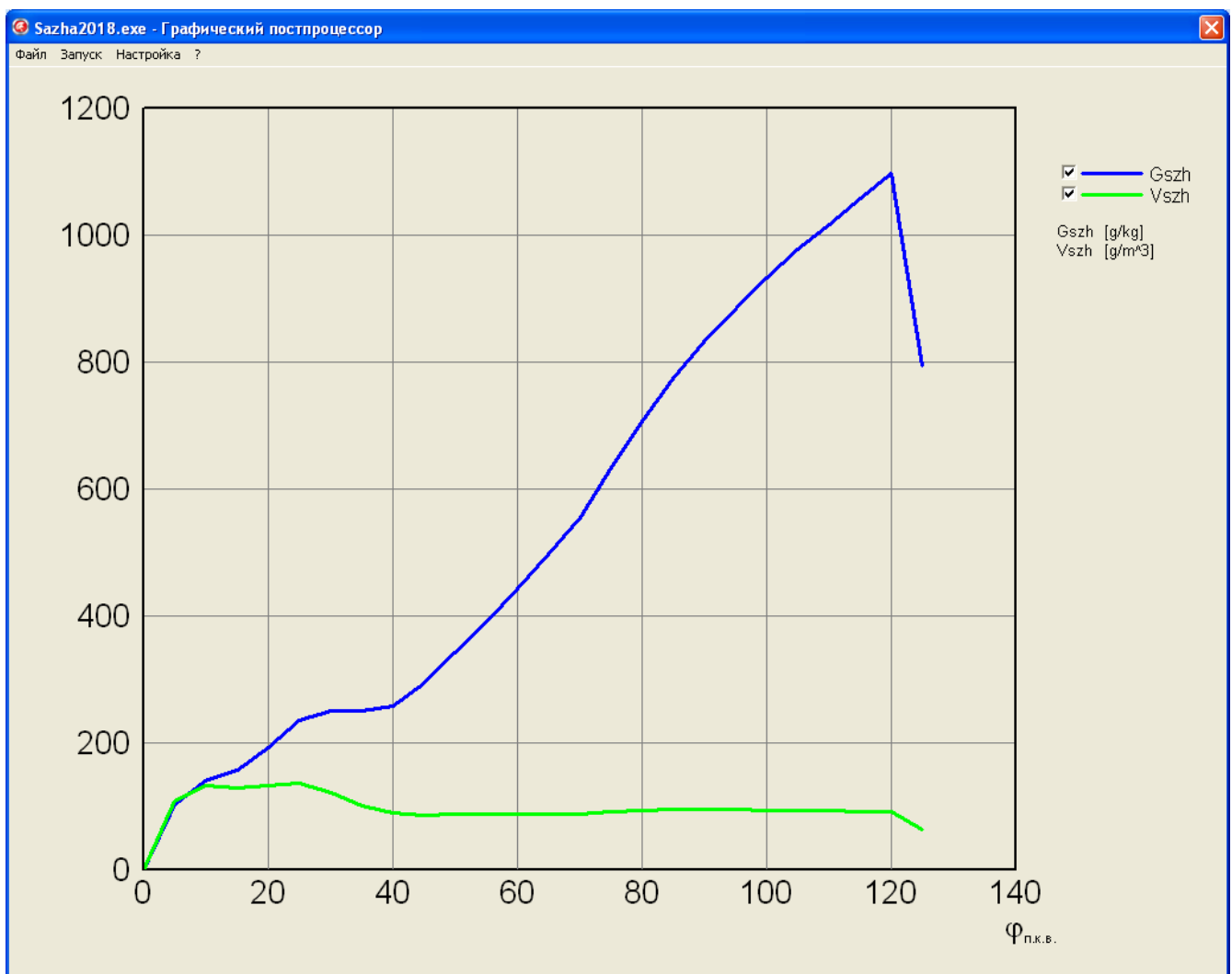


Рисунок 59 – Изменение параметров концентрации сажи в рабочем цикле

Принципы работы с графическим постпроцессором в целом те же, что и в расчете рабочих процессов. При нажатии кнопки «Показать результат» окна завершения расчета запускается программа-постпроцессор и на экране появляется окно выбора файла, аналогичное показанному на рисунке 35. Оно же появляется при выборе пункта «Загрузить» меню «Файл» графического постпроцессора. Оператор имеет возможность выбора файла для вывода графической информации. Пример графического представления результатов расчета показан на рисунке 59.

4.5. Завершение работы программы

При выборе пункта «Закрыть» меню «Файл» программ-препроцессоров, кнопки «Закрыть» системного меню форм ввода данных (крестик в правом верхнем углу окон препроцессоров), кнопки «Закрыть» формы завершения расчета, а также кнопки «Закрыть» системного меню формы завершения расчета (крестик в правом верхнем углу формы), программа выполняет следующие действия:

1. Выдает запрос на завершение работы «Вы действительно хотите выйти из программы?».
2. При нажатии кнопки «Нет» управление возвращается той форме программы, из которой была осуществлена попытка закрытия.
3. При нажатии кнопки «Да» программа закрывается.

4.6. Сообщения о нештатной работе программы

При нормальном ходе выполнения расчетов, программы-солверы выдают сообщения, описанные в п.п. 4.2-4.4. При возникновении нештатных ситуаций, программы-солверы могут дать ряд сообщений об ошибках, описанных ниже.

При формальной проверке содержимого файлов исходных данных по типам и составу данных при их считывании могут возникнуть формальные ошибки, в результате возникновения которых программы-солверы выдают сообщение вида:

«Ошибка в файле Rpi00*.dat !» или «Ошибка в файле Szi00*.dat !».

При последующем нажатии клавиши ENTER программа-солвер прекращает свою работу и DOS-окно закрывается.

При возникновении данной ситуации следует проверить содержимое файлов исходных данных на предмет наличия формальных ошибок (появление букв вместо цифр, изменение типа данных, состава данных для выбранного типа двигателя, выбранной динамики тепловыделения и т.п.). Для выполнения проверки следует руководствоваться данными таблиц исходных данных, см. следующий раздел.

При выполнении расчета могут возникнуть ошибки, индицируемые компилятором Фортрана (деление на нуль, потеря значимости и т.п.). При этом DOS-окно закрывается. Само сообщение об ошибке может быть прочитано при запуске программы из режима MS-DOS.

Данный вид ошибок встречается достаточно редко и, как правило, связан с грубыми ошибками при формировании исходных данных, вызывающих несоответствие изменения интегрируемых величин шагу интегрирования. При возникновении таких ошибок необходимо, в первую очередь, проверить входные данные по размерности (см. раздел 5) и соразмерности задаваемых величин, в частности размерности двигателя и площадей проходного сечения органов газораспределения. Если ошибку устранить не удастся, следует обратиться к разработчику ПМК.

4.7. Общие рекомендации по работе с программами комплекса

Работа с программами комплекса может осуществляться в трех режимах:

1. После установки комплекса пользователь обращается к программе «RpTox2018.exe», находящейся в корневом каталоге папки ...\\Work RP-TOX-2018. Другие программы-препроцессоры запускаются программой «RpTox2018.exe» аппаратными средствами. Программы-солверы также запускаются соответствующими программами-препроцессорами при помощи аппаратных средств. Пользователь самостоятельно формирует файловую структуру исходных данных и хранит их либо в имеющихся папках комплекса, либо вне их.

2. При желании пользователя для выполнения расчетов программы-препроцессоры и программы-солверы в полном составе, либо частично, могут быть перенесены в любую рабочую папку пользователя. В этом случае пользователь запускает программы-препроцессоры, работает через них с файлами данных и запускает программы-солверы. Вся файловая структура при этом формируется в этой рабочей папке.

3. Аналогично п.2, в пользовательскую рабочую папку могут быть перенесены только программы-солверы. В этом случае пользователь сам запускает солверы и формирует файловую структуру данных. Для корректировки файлов данных можно использовать любой текстовый редактор. Главное – не нарушать структуру файлов данных и тип данных. Воспользоваться графическими возможностями комплекса в этом случае нельзя. Этот вариант можно посоветовать «продвинутым» пользователям, ознакомившимся в совершенстве со структурой файлов данных при выполнении многовариантных расчетов, например рабочего процесса.

5. ВХОДНЫЕ И ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ

5.1. Сведения о входных данных

5.1.1. Исходные данные к расчету рабочих процессов

Входными данными Программы-препроцессора «Rp2018.exe» и, соответственно, программы синтеза индикаторных диаграмм «Rp_2018.exe» являются:

- данные, вводимые пользователем с помощью экранных форм ввода;
- файл исходных данных, загружаемый при выборе файла в диалоговом окне открытия файла. Пример файла исходных данных приведен на рисунке 60.

Чистый Gas 15/17,5. Тип задачи 1									
*** Вариант 004 ***									
2	1	1	4	12	3	! MT, NDTV, NPF, KDV, ICIL, KPR			
.175	.150	11.50	.275	.00	.0	! S, D, EPS, LAM, EXD, UGOL			
1900	.00	1.0	.000	125.0		! N, GT, DROS, ETAM, ENMEX			
42.74	180.0	.870	.126	.004		! QT, SMT, C, H, OT			
		.200	.015	.005		! ST, ANT, H2OT			
.0	50.0	810.0				! OCHI, CCHM, ROT			
48.00	.750	.250	.0			! Газ: QN_G2, C_G2, H_G2, O_G2			
	16	15.960	300.0	1		! Газ: SMUGAZ, DG_G2, T_G2, IT			
400.0	520.0		0.00			! Газ: FH21, FH22, GVBAZ			
650.0	550.0	1.305	1.000			! TPP, TKK, PKP, PKK			
450.0	420.0	400.0	0.0020	0.00		! TGG, TG1, TG2, STZ, CUKCM			
60.0	1.95	-20.0	.980			! FIZ, M, FHC, XMAX			
343.0	563.0	118.0	378.0			! FOVP, FZVP, FOVIP, FZVIP			
2.500	2.450	345.0	650.0			! PK, PP, TK, TP			
2						! NVR			
44.75	.75	25.0	2			! DK2, MU2, AL2, KL2			
41.10	.80	30.0	2			! DK1, MU1, AL1, KL1			
23						! NPK2			
.00	.20	1.10	3.00	5.00	7.20	9.20	11.00		
12.20	13.30	13.70	13.90	13.70	13.30	12.20	11.00		
9.20	7.20	5.00	3.00	1.10	0.20				
.00						! HVP (I), I=1, NPK2			
27						! NPK1			
.00	.30	1.10	2.60	4.30	7.10	9.30	11.30		
12.50	13.40	13.90	14.20	14.30	14.30	14.30	14.20		
13.90	13.40	12.50	11.30	9.30	7.10	4.30	2.60		
1.10	0.30	.00				! HVIP (I), I=1, NPK1			
.200	.50	1.050	370.0			! FEKV, DPZ, PKG, TKG			
0.21	.00					! DO2, EGR			
2	.0	.0	0.500	.0		! IREZ, CH0, SMUCH, UGAR, SMUMC			
90.00			100.00			! Notn, Motn - безразмерный			

Рисунок 60 – Пример файла исходных данных типа rpi***.dat программы «Rp_2018.exe»

Список исходных данных, их формат, описание и кодирование сведен в таблицу 1. Формат входных данных соответствует формату входных данных программы «Rp_2018.exe».

Таблица 1. Входные данные программ «Rp2018.exe» и «Rp_2018.exe»

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных)	Формат параметра
1	TEXT	Текстовая информация о двигателе, режиме работы и т.д.	A, 40 позиций
2	VAR	Номер варианта расчета *** - по нему записывается файл протокола типа ipr***.txt	A, 3 позиции
3	MT	Коэффициент тактности: 1 – двухтактные, 2 – четырехтактные	18
4	NDTV	Номер динамики тепловыделения (ДТВ): 1 – по И.И. Вибе, используется для бензиновых двигателей с искровым зажиганием и газовых, но можно задавать и для дизелей; 2 – по Б.П. Пугачеву, двугорбая, используется для дизелей с КС открытого типа; 3 – по Б.П. Пугачеву, трехгорбая, используется для дизелей с КС полуразделенного типа; 4 – используется для дизелей с открытыми КС – в целом аналог ДТВ_2, но в данной методике реализован расчет параметров тепловыделения в зависимости от форсировки двигателя, геометрии КС и режима работы с возможностью ручной корректировки параметров тепловыделения; 5 – используется для дизелей с открытыми КС – аналог ДТВ_4, но здесь требуется задание в табличной форме дифференциальной или интегральной характеристики подачи топлива не менее чем по 4-м точкам. Характеристики тепловыделения по Б.П. Пугачеву рассчитываются с учетом формы характеристики топливоподачи.	18

5	NPF	<p>Параметр наличия предварительной фазы впрыска: 1 - нет, 2 - да.</p> <p>Предварительная фаза может быть использована вкупе с любой динамикой тепловыделения, но имеет смысл только для дизеля и газодизеля.</p>	18
6	KDV	<p>Тип двигателя. В зависимости от него выбирается тот или иной способ задания режимных параметров и расхода топлива, по-разному рассчитывается теплообмен и СНх:</p> <p>1 – дизельный;</p> <p>2 – бензиновый (задан коэффициент избытка воздуха и дроссель) (+ газовый);</p> <p>3 – бензиновый (задан расход топлива и дроссель) (+ газовый);</p> <p>4 – газовый (+газодизельный) – только 4Т!</p>	18
7	ICIL	Количество цилиндров в двигателе (в двухтактном двигателе с ПДП в одном цилиндре два поршня!)	18
8	KPR	<p>KPR – параметр записи файла протокола:</p> <p>0 – минимальный;</p> <p>1 – полный;</p> <p>2 – полный с тепловым балансом рабочего цикла;</p> <p>3 – полный с тепловым балансом рабочего цикла и составом ОГ на выпуске;</p> <p>4 – полный с тепловым балансом, составом ОГ на выпуске и таблицей параметров по углу п.к.в.</p>	18
9	S	Ход поршня, [м], (0.010-5.000)	F8.3
10	D	Диаметр цилиндра, [м], (0.010-1.500)	F8.3
11	EPS	Геометрическая степень сжатия (для двигателя с ПДП определяется по ходу одного поршня и воображаемой средней линии между ВМТ выпускного и продувочного поршней), (5.00-35.00)	F8.2
12	LAM	Постоянная КШМ (отношение радиуса кривошипа к длине шатуна), (0.200-0.350)	F8.3

13	EXD	Дезаксаж КШМ [мм]: если он выполнен по ходу вращения к/вала, то он положительный, если нет - отрицательный, для центральных КШМ он равен нулю. (-10.00...+10.00)	F8.2
14	UGOL	Угол сдвига фаз коленчатых валов в двигателе с ПДП – если он не нулевой, это является признаком данного типа двигателя, положительный угол показывает отставание фазы продувочного поршня относительно выпускного (обычно 10-20 °п.к.в.), его можно задать не нулевым для любого типа двигателя.	F8.2
15	N	Частота вращения коленчатого вала, [об/мин], (1-25000 и более)	I8
16	GT	Часовой расход жидкого топлива на режиме в расчете на один цилиндр двигателя, [кг/час], (0.00-1000.00)	F8.3
17	ALTVS	Коэффициент избытка воздуха в подаваемой в двигатель смеси, (обычно 0.400-1.600)	F8.2
18	DROS	Доля открытия дроссельной заслонки – относительная величина, показывающая долю открытой площади проходного сечения на впуске с учетом местных потерь, (0.001-1.000)	F8.2
19	ETAM	Механический к.п.д. двигателя на режиме, (0.001-1.000)	F8.3
20	ENMEX	Мощность механических потерь на режиме, [кВт]. Не нулевым должно быть задано либо ETAM, либо ENMEX, если оба параметра нулевые, расчет эффективных показателей не производится, если задано и то и то, эфф. показатели рассчитываются по мощности мех. потерь. При расчете характеристики холостого хода рекомендуется либо не рассчитывать эффективные показатели (ICIL=0), либо использовать известную мощность мех. потерь, либо ETAM=0.001	F7.2

Параметры жидкого топлива			
21	QT	Низшая теплотворная способность жидкого топлива, [МДж/кг], в первом приближении можно оценивать по формуле Менделеева и данным обработки химического состава топлива, или по табличным данным, или по другим экспериментальным данным. Если задана нулевой, то рассчитывается в программе по Менделееву на основе заданного элементарного состава (см. ниже) с учетом примесей и воды.	F8.2
22	SMT	Средняя молярная масса углеводородов топлива, [кг/кмоль].	F8.1
23	C	Массовая доля углерода в жидком топливе по элементарному составу, (0,000...1,000)	F8.3
24	H	Массовая доля водорода в жидком топливе по элементарному составу, (0,000...1,000)	F8.3
25	OT	Массовая доля кислорода в жидком топливе по элементарному составу, (0,000...1,000)	F8.3
26	ST	Процентная по массе доля серы в топливе. Сера считается примесью, однако в расчете QT участвует, уменьшая содержание C, H и OT	F8.2
27	ANT	Процентная по массе доля азота в топливе (передается далее в расчет оксидов азота)	F8.2
28	H2OT	Процентная по массе доля воды в топливе (снижает QT)	F8.2
29	OCHI	Октановое число топлива по исследовательскому методу.	F8.2
30	CCNM	Цетановое число топлива: не нулевым задается либо OCHI, либо CCNM, либо и то и другое.	F8.2
31	ROT	Плотность топлива, кг/м ³	F8.2
Параметры газового топлива			
32	QN_G2	Низшая теплотворная способность газового топлива, [МДж/кг]	F8.2
33	C_G2	Массовая доля углерода в газовом топливе по элементарному составу, (0,000...1,000)	F8.3

34	H_G2	Массовая доля водорода в газовом топливе по элементарному составу, (0,000...1,000)	F8.3
35	O_G2	Массовая доля кислорода в газовом топливе по элементарному составу, (0,000...1,000)	F8.3
36	SMUGAZ	Усредненная молярная масса газового топлива, кг/кмоль	I8
37	DG_G2	Расход газа, кг/ч, на один цилиндр для типа задачи 1 или доля замещения жидкого топлива газом – для типа задачи 2.	F8.3
38	T_G2	Температура подаваемого газа, [K]	F8.1
39	ITZ	Тип задачи: 1 - любые соотношения жидкого топлива и газа, здесь вместо DG_G2 задается напрямую расход газа; 2 – подгонка доли газа под базовую альфу (базовый режим следует предварительно рассчитать с альфой, которая планируется на газу)	I8
40	FH21	Угол начала подачи газа, [° п.к.в.]	F8.1
41	FH22	Угол конца подачи газа, [° п.к.в.] Фазы подачи газа - начало и конец подачи по углу ПКВ находятся в пределах угла закрытия выпуска и угла начала видимого сгорания (при расположении фаз подачи на стадии наполнения - впрыск в коллектор, на такте сжатия - впрыск в цилиндр, если фазы подачи накрывают угол закрытия впуска, то туда и сюда)	F8.1
42	GVBAZ	Базовый расход воздуха на двигатель, имеет значение при настройке расхода воздуха при подаче газа в коллектор (хотя бы и частично). Тогда программа выдает рекомендацию для изменения DROS - дросселя, расположенного на входе в цилиндр, для корректировки расхода воздуха на величину, определяемую вытеснением воздуха газом. При подаче газа только в цилиндр данный параметр не используется и значения не имеет.	F8.1

Параметры предварительной части впрыска (если NPF=2)			
43	FIPF	Угол опережения впрыска для предварительной фазы, обычно -15...-40 [° п.к.в.]	F8.1
44	VPF	<p>Объем подаваемого топлива в предварительной фазе, мм³. Для дизелей с системой Common Rail обычно составляет 1...5 мм³. Если считать, что это запальная доля дизельного топлива в газодизеле, то ее требуется рассчитать:</p> $V_3 = d_3 \frac{G_{T_диз} \cdot m \cdot 10^9}{n \cdot 60 \cdot \rho_T} \text{ мм}^3,$ <p>где: d_3 – доля запального топлива; $G_{T_диз}$ – часовой расход дизельного топлива на один цилиндр в дизельном цикле.</p>	F8.2
Температуры поверхностей КС, площади, закрутка			
45	TPP	Температура поршня, [К], (<999.9)	F8.1
46	TKK	Температура крышки, [К], (<999.9)	F8.1
47	PKP	Поправка для расчета площади поршня (1.000 и более)	F8.3
48	PKK	Поправка для расчета площади головки (1.000 и более)	F8.3
49	TGG	Температура гильзы в верхнем поясе, [К], (<999.9)	F8.1
50	TG1	Температура гильзы на середине хода поршня, [К], (<999.9)	F8.1
51	TG2	Температура гильзы на полном ходе поршня, [К], (<999.9)	F8.1
52	STZ	Зазор между поршнем и головкой в ВМТ, [м]	F8.3
53	CUKCM	Относительная скорость закрутки потока на впуске	F8.2
Параметры тепловыделения по И.И. Виббе (NDTV = 1):			
54	FIZ	Условная продолжительность сгорания, [° п.к.в.], обычно 50-90.	F8.1
55	M	Показатель характера сгорания, обычно 1.5-3.5	F8.2

56	FHC	Угол начала видимого сгорания, [° п.к.в.], обычно -15...-25.	F8.1
57	XMAX	Максимальная доля выгорания топлива – учитывает недогорание в пристеночной зоне (1...3%) и неиспарившееся топливо(0...20%). Недогорание, связанное с коэффициентом избытка воздуха меньшим единицы, учитывается изменением низшей теплотворной способности в самой программе!	F8.3
Параметры тепловыделения по Б.П. Пугачеву (NDTV= 2, двугорбая схема):			
58	X1	Доля выгорания топлива в кинетической фазе сгорания, 0.100-0.400	F8.3
59	X2	Доля выгорания топлива в диффузионной фазе сгорания	F8.3
60	FI1	Угол достижения максимума скорости тепловыделения в кинетической фазе, 3...5 [° п.к.в.]	F8.1
61	FI2	Угол достижения максимума скорости тепловыделения в диффузионной фазе, 20...40 [° п.к.в.]	F8.1
62	K1	Параметр жесткости сгорания в кинетической фазе, обычно около 2.0.	F6.1
63	K2	Параметр жесткости сгорания в диффузионной фазе, 1.5-2.5	F6.1
64	FHC	Угол начала видимого сгорания, -5...-15 [° п.к.в.]	F6.1
Параметры пристеночного тепловыделения по Б.П. Пугачеву (NDTV = 3, трехгорбая схема):			
65	X1	Доля выгорания топлива в кинетической фазе сгорания, 0.100-0.200.	F8.3
66	X2	Доля выгорания топлива в диффузионной фазе сгорания, 0.200-0.600.	F8.3
67	X3	Доля выгорания топлива в пристеночной фазе сгорания	F8.3
68	FI1	Угол достижения максимума скорости тепловыделения в кинетической фазе, 3...5 [° п.к.в.]	F8.1

69	FI2	Угол достижения максимума скорости тепловыделения в диффузионной фазе, 20...40 [° п.к.в.]	F8.1
70	FI3	Угол достижения максимума скорости тепловыделения в пристеночной фазе, 15...30 [° п.к.в.]	F8.1
71	K1	Параметр жесткости сгорания в кинетической фазе, обычно около 2.0	F6.1
72	K2	Параметр жесткости сгорания в диффузионной фазе, 1.5-2.5.	F6.1
73	K3	Параметр жесткости сгорания в пристеночной фазе, 1.5-2.0	F6.1
74	FHC	Угол начала видимого сгорания, обычно -5...-15 [° п.к.в.]	F6.1
75	FHC2	Угол начала сгорания в пристеночной фазе, -5...10 [° п.к.в.]	F6.1
Параметры тепловыделения по Б.П. Пугачеву (NDTV = 4, двугорбая модифицированная схема):			
76	FHC	Угол начала подачи топлива, -15...-25 [° п.к.в.]	F8.1
77	FVG	Продолжительность впрыска топлива, 15...40 [° п.к.в.]	F8.1
78	DIKAM	Эквивалентный диаметр камеры сгорания, [м] – диаметр профилированной части огневой поверхности поршня	F8.2
79	ZX1	Настроечный коэффициент уменьшения доли топлива, выгорающей в кинетической фазе за счет попадания топлива на стенку КС, величина – 1 и менее	F8.2
80	ZFI2	Настроечный параметр (выражаемый в углах п.к.в.) для оттяжки максимума скорости тепловыделения в кинетической фазе при объемно-пленочном смесеобразовании – от 0 и выше (но может быть задан и отрицательным значением).	F8.1

Параметры тепловыделения по Б.П. Пугачеву (NDTV = 5, двугорбая модифицированная схема с учетом формы характеристики топливоподачи):			
81	KTTV	Количество точек таблицы дифференциальной характеристики топливоподачи – 4...51 шт.	I8
82	IGC	Признак характеристики: 1 - дифференциальная характеристика 2 - интегральная характеристика.	I8
83	DGC(I), I=1,KTTV	Таблица дифференциальной или интегральной характеристики подачи, единицы задания безразличны, поскольку производится нормировка характеристики по заданной цикловой подаче.	F8.5
Фазы газораспределения			
84	FOVP	Угол открытия впуска, [° п.к.в.]	F8.1
85	FZVP	Угол закрытия впуска, [° п.к.в.]	F8.1
86	FOVIP	Угол открытия выпуска, [° п.к.в.]	F8.1
87	FZVIP	Угол закрытия выпуска, [° п.к.в.] – отсчет углов привязан к ВМТ рабочего хода.	F8.1
Параметры рабочего тела на впуске и выпуске			
88	PK	Давление перед впускным клапаном, [бар] Задается с учетом потерь давления при прохождении газов по впускному тракту, является средней величиной за период фазы газообмена	F8.3
89	PP	Давление за выпускным клапаном, [бар] Задается с учетом потерь давления при прохождении газов по выпускному тракту, является средней величиной за период фазы газообмена	F8.3
90	TK	Температура перед впускным клапаном, [К]. Является средней величиной за период фазы газообмена	F8.1
91	TP	Температура за выпускным клапаном, [К]. Является средней величиной за период фазы газообмена	F8.1

92	NVR	<p>Способ задания проходных сечений клапанов:</p> <p>1-й способ самый простой, но весьма приближенный, представляет собой аппроксимацию реальных диаграмм площадей косинусоидальными трапециями;</p> <p>2-й способ требует знания диаграммы подъема клапанов – $h(Fi)$, т.е. необходим предварительный расчет кинематики кулачкового механизма;</p> <p>3-й способ требует наличия статических продувок каналов головки цилиндров на расчетных режимах;</p> <p>4-й способ (комбинированный геометрический) требует задания геометрических параметров продувочных окон или клапанов (введено в основном для 2-х тактных ДВС, но подходит и для 4-х тактных).</p>	I8
Параметры задания площадей органов газораспределения по способу NVR = 1			
93	FM2	Условная суммарная максимальная площадь проходных сечений органов впуска с учетом коэффициента расхода клапана на данном режиме работы двигателя	F8.1
94	FM1	Условная суммарная максимальная площадь проходных сечений органов выпуска с учетом коэффициента расхода клапана на данном режиме работы двигателя	F8.1
95	FIM2	Угол от начала открытия впускного клапана до достижения условной максимальной площади проходного сечения, 50...120 [° п.к.в.]	F8.1
96	FIM1	Угол от начала открытия выпускного клапана до достижения условной максимальной площади проходного сечения, 50...120 [° п.к.в.]	F8.1
97	KL2	Количество впускных клапанов	I8
98	KL1	Количество выпускных клапанов	I8

Параметры задания площадей органов газораспределения по способу NVR = 2			
99	DK2	Базовый диаметр впускного клапана, [мм]	F8.2
100	DK1	Базовый диаметр выпускного клапана, [мм]	F8.2
101	AL2	Угол скоса тарелки впускного клапана, [°]	F8.1
102	AL1	Угол скоса тарелки выпускного клапана, [°]	F8.1
103	MU2	Коэффициент расхода впускного клапана	F8.2
104	MU1	Коэффициент расхода выпускного клапана	F8.2
105	KL2	Количество впускных клапанов	I8
106	KL1	Количество выпускных клапанов	I8
107	NPK2	Количество точек таблицы движения впускного клапана, минимум 12-15 точек	I8
108	NPK1	Количество точек таблицы движения выпускного клапана, минимум 12-15 точек	I8
109	HVP(I), I=1,NPK2	Высота поднятия впускного клапана, [мм]	F8.2
110	HVIP(I), I=1,NPK1	Высота поднятия выпускного клапана, [мм]	F8.2
<p>** Предупреждение: неправильное задание конструктивных параметров органов газообмена приводит к весьма распространенным ошибкам, которые можно получить в виде больших отрицательных мощностей тактов продувки по двигателю в целом, а также неправильно полученных параметров газообмена.</p>			
Параметры задания площадей органов газораспределения по способу NVR = 3			
111	NPK2	Количество точек таблицы движения впускного клапана, минимум 12-15 точек	I8
112	KL2	Количество впускных клапанов	I8
113	NPK1	Количество точек таблицы движения выпускного клапана, минимум 12-15 точек	I8
114	KL1	Количество выпускных клапанов	I8
115	MF2(I), I=1,NPK2	Площадь проходного сечения впускного клапана, [см ²]	F8.2
116	MF1(I), I=1,NPK1	Площадь проходного сечения выпускного клапана, [см ²]	F8.2

Параметры задания площадей органов газораспределения по способу NVR = 4

117	KF2, KF1	Параметры типа органа газораспределения для впуска и выпуска: 1 – клапанный механизм; 2 – продувочные окна. Заглушка: окна можно задавать только для 2Т двигателей, МТ=1.	2I8
118	DK2, НК2, AL2, MU2, KL2, FIM2	Параметры впускных клапанов (KF2=1) : Базовый диаметр клапана, [мм]; Максимальная высота подъема клапана, [мм]; Угол скоса тарелки клапана, [°]; Коэффициент расхода клапана; Количество впускных клапанов; Угол от начала открытия впускного клапана до достижения условной максимальной площади проходного сечения, 50...120 [° п.к.в.]	2F8.2, F8.1, F8.2, I8, F8.1
119	DK2, НК2, KO2, MU2, KL2, FIM2	Параметры впускных окон (KF2=2) : Ширина окна, [мм]; Высота окна, [мм]; Тип окон: (1 – трапециевидные, 2 – эллипсоидные); Коэффициент расхода; Количество впускных окон; Угол полного открытия золотника на впуске: 0 – золотника нет, а фаза впуска симметрична относительно ВМТ; не 0 – золотник есть, фаза впуска несимметрична в начале процесса впуска, золотник открывается от начала фазы впуска до угла FIM2, большего, чем угол открытия впуска FOVP, площадь сечения изменяется линейно от нуля до текущей площади окна. В оболочке должна быть проверка: FOVP < FIM2 < 180° с запросом корректировки, если это не так, см. рис. внизу.	2F8.2, I8, F8.2 I8, F8.1
120	DK1, НК1, AL1, MU1, KL1, FIM1	Параметры выпускных клапанов (KF1=1) : Базовый диаметр клапана, [мм]; Максимальная высота подъема клапана, [мм]; Угол скоса тарелки клапана, [°];	2F8.2, F8.1, F8.2, I8, F8.1

		<p>Коэффициент расхода клапана; Количество выпускных клапанов; Угол от начала открытия выпускного клапана до достижения условной максимальной площади проходного сечения, 50...120 [° п.к.в.]</p>	
121	DK1, HK1, KO1, MU1, KL1, FIM1	<p>Параметры впускных окон (KF1=2): Ширина окна, [мм]; Высота окна, [мм]; Тип окон: (1 – трапециевидные, 2 – эллипсоидные); Коэффициент расхода; Количество выпускных окон; Угол начала закрытия золотника на выпуске: 0 – золотника нет, а фаза выпуска симметрична относительно ВМТ; не 0 – золотник есть, фаза выпуска несимметрична в конце выпуска, золотник закрывается от угла FIM1, меньшего, чем угол закрытия выпуска FZVIP, площадь сечения изменяется линейно от текущей площади окна до нуля. В оболочке должна быть проверка: $180^\circ < FIM1 < FZVIP$ с запросом корректировки, если это не так, см. рис. внизу.</p>	2F8.2, I8, F8.2 I8, F8.1
Параметры настройки газообмена двухтактных двигателей			
122	D11	Условная продолжительность выпуска чистых ОГ, обычно – 0.1-0.4.	F8.2
123	D22	<p>Условная продолжительность фазы частичного перемешивания от продолжительности всей фазы продувки, - 0.2-0.5, остальное считается фазой полного перемешивания свежего заряда с ОГ. ** Предупреждение: неправильная настройка этих параметров может привести к ошибкам в определении параметров газообмена - коэффициента остаточных газов, коэффициента наполнения, в также расхода воздуха через двигатель и суммарного коэффициента избытка воздуха.</p>	F8.2

Параметры настройки протечек через кольцевое уплотнение			
124	FEKV	Условная площадь (μF) проходного сечения, открытого для протечек рабочего тела из камеры сгорания в подпоршневое пространство [мм^2] – является фиксированной величиной когда $\text{DPZ}=0$ и подлежит расчетному уточнению, когда задана фиксированная доля потери заряда, не равная нулю. ** Предупреждение: при фиксации доли потери заряда рекомендуется задавать значения начального приближения эквивалентной площади протечек близкие к реальным и проводить уточнения до нулевых дисбалансов – для повышения точности расчета эквивалентной площади.	F8.2
125	DPZ	Доля потери заряда через неплотности кольцевого уплотнения за цикл в процентах к массе исходного заряда, для фиксации уловной площади FEKV задается равной "0". Если задано $\text{FEKV}=0$ и $\text{DPZ}=0$ – протечек рабочего тела нет.	F8.2
126	PKG	Давление картерных газов, [бар].	F8.2
127	TKG	Температура картерных газов, [К].	F8.2
Параметры состава воздуха и системы EGR			
128	DO2	объемная доля кислорода в воздухе	F8.2
129	EGR	объемная доля рециркуляции ОГ (от 0 и более)	F8.2
Параметры базового режима (введено для расчетного определения СН по эмпирическим зависимостям)			
130	IREZ	Способ задания базового режима: 1 – размерный; 2 – относительный.	I8
131	CH0	Измеренное значение остаточных (несгоревших) углеводородов на базовом режиме (топливные+масляные), ppm. Если текущий режим задается как «базовый», то данная величина напрямую воспринимается как измеренное значение на режиме и не кор-	F8.1

		<p>ректируется. Если текущий режим отличается от базового по оборотам/нагрузке как в большую, так и в меньшую сторону, заданная величина CH_0 подвергается корректировке по эмпирическим зависимостям.</p> <p>Если задается $CH_0=0$, осуществляется его приближенный расчет в зависимости от типа двигателя (бензин/газ/дизель), тактности и коэффициента избытка воздуха по эмпирическим зависимостям с учетом угара смазки.</p>	
132	SMUCH	<p>Средняя (измеренная) молярная масса несгоревших углеводородов, [кг/кмоль].</p> <p>Если задается $SMUCH=0$, осуществляется приближенный расчет в зависимости от молярной массы топлива и типа двигателя (бензин/газ/дизель) по эмпирическим зависимостям с учетом угара смазки.</p>	F8.1
133	UGAR	<p>Расход масла на угар, % к расходу топлива на номинальном режиме. Если задается $UGAR=0$, то масляная составляющая CH не учитывается.</p>	F8.3
134	SMUMC	<p>Средняя молярная масса компонентов моторного масла, [кг/кмоль].</p> <p>Если задается $SMUMC=0$, молярная масса масла выбирается автоматически.</p>	F8.1
<p>IREZ=1 – размерный способ задания базового режима</p> <p>За базовый рекомендуется принимать номинальный режим работы двигателя.</p>			
135	Notn	<p>Скорость вращения коленчатого вала двигателя на базовом режиме, об/мин.</p>	F16.2
136	Motn	<p>Эффективный момент на базовом режиме, н·м.</p>	F16.2
<p>IREZ=2 – относительный способ задания текущего (рассчитываемого) режима</p>			
137	Notn	<p>Относительная скорость вращения коленчатого вала двигателя на текущем режиме, %.</p> <p>Для номинального режима принимается 100%.</p> <p>Если известно измеренное значение CH для любого другого скоростного режима, за 100% может быть принят именно он.</p>	F16.2

138	Motn	Относительная нагрузка (по M_e или P_e) на текущем режиме, %. Для номинального режима принимается 100%. Если известно измеренное значение СН для любого другого нагрузочного режима, за 100% может быть принят именно он.	F16.2
-----	------	--	-------

5.1.2. Исходные данные к расчету выбросов оксидов азота

Все необходимые данные для расчета выбросов оксидов азота находятся в файлах индикаторных диаграмм типа Ind***.dat, выгружаемых программой синтеза индикаторных диаграмм «Rp_2018.exe». Содержимое файлов типа Ind***.dat описано в разделе 5.2.1 Выходные данные расчета рабочих процессов.

5.1.3. Исходные данные к расчету результирующего сажевыделения

Входными данными Программы-препроцессора «Sazha2018.exe» и программы расчета результирующего сажевыделения «SAZ_2018.exe» являются:

- данные, вводимые пользователем с помощью экранных форм ввода;
- файл исходных данных, загружаемый при выборе файла в диалоговом окне открытия файла. Пример файла исходных данных приведен на рисунке 61;
- файлах индикаторных диаграмм типа Ind***.dat, выгружаемых программой синтеза индикаторных диаграмм «Rp_2018.exe», см. разделе 5.2.1.

```

КамАЗ 7403   N=2200
***  Вариант 001  ***
.8150  .1660  .0190          ! Групповой состав топлива
 1.50   0.06   1.00   0.50 ! Коэффициенты B1,B2,B3, локальный Alfa
.3200   4       2 ! Диаметр [мм], кол-во отв. форсунки, тип хар. впрыска
-12.00  26.00   14 ! Fi начала подачи, продолжительность, число точек
 80.0   140.0  220.0  320.0  390.0
370.0   430.0  520.0  630.0  680.0
670.0   570.0
300.0   30.0          ! Давление топлива в распылителе форсунки
.0001   .0300   .0600   .1100   .1700
.2500   .3600   .5000   .6200   .7800
.8800   .9500
.9800   .9999          ! Характеристика подачи топлива (интегр.)
ind001.dat          ! Подгружаемый файл индикаторной диаграммы

```

Рисунок 61 – Пример файла исходных данных типа szi***.dat программы «SAZ_2018.exe»

Список исходных данных, их формат, описание и кодирование сведен в таблицу 2. Формат входных данных соответствует формату входных данных программы «SAZ_2018.exe».

Таблица 2. Входные данные программ «Sazha2018.exe» и «SAZ_2018.exe»

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных)	Формат параметра
1	TEXT	Текстовая информация о двигателе, режиме работы и т.д.	A, 40 позиций
2	VAR	Номер варианта расчета *** – по нему записывается файл протокола типа szh***.txt и файлы используемые графическим постпроцессором	A, 3 позиции
3	KP, KN, KA	Групповой состав топлива: парафины, нафтенны, ароматика, [кг/кг топл.] – задается согласно статистическим, литературным или опытным данным по конкретному топливу	F8.4
4	B1, B2, B3, ALC	«Опытные» коэффициенты, используемые для настройки базового варианта расчета (при абсолютном их незнании задаются отрицательными), локальный коэффициент избытка воздуха в зоне образования сажи*	F8.2
5	DSOP, ISOP, IGC	Диаметр [мм], количество сопел форсунки, тип характеристики впрыска: 1 – дифференциальная, 2 – интегральная.	F8.4, 2I8
6	FINPT, FIBPR, IPF	Угол начала подачи топлива, продолжительность впрыска, [° п.к.в.]**; число элементов массивов давления топлива в форсунке PF и характеристики впрыска ZTP.	2F8.2, I8
7	PF(I), I=1,IPF	Таблица давления топлива в распылителе. Требуется отдельного расчета или задания по опытным данным.	F8.1
8	ZTP(I), I=1,IPF	Закон (характеристика) подачи топлива (дифференциальная или интегральная). Требуется отдельного расчета или задания по опытным данным.	F8.4
9	FN3	Имя файла индикаторной диаграммы для считывания.	A, 10 позиций

*Прим. 1. Данные параметры используются для «настройки» модели образования-выгорания сажи. Для каждого двигателя они подбираются сугубо индивидуально. Ниже, на рисунках 62...65 приведены графики, которые отражают тенденции в изменении сажевыделения (CBx , $г/м^3$) в зависимости от настроечных коэффициентов $B1$, $B2$, $B3$ и локального коэффициента избытка воздуха ALC . Расчеты выполнены для четырехтактного дизеля с наддувом КамАЗ-7403 на номинальном режиме работы: $n = 2200$ об/мин, $p_k = 2,0$, $\alpha = 1,8$. Для **настройки модели необходимы опытные данные!**

**Прим. 2. Если в расчете рабочего процесса используется 4 или 5 динамики тепловыделения, параметры $F1NPT$ и $F1BPR$ должны быть заданы такими же, как и там. Если используется 2 или 3 динамики тепловыделения, следует иметь в виду, что углу начала видимого сгорания предшествует период задержки самовоспламенения, следовательно $F1NPT$, должен быть раньше $F1NC$ – угла начала сгорания! Продолжительность впрыска тогда определится как $F12-F1NC$.

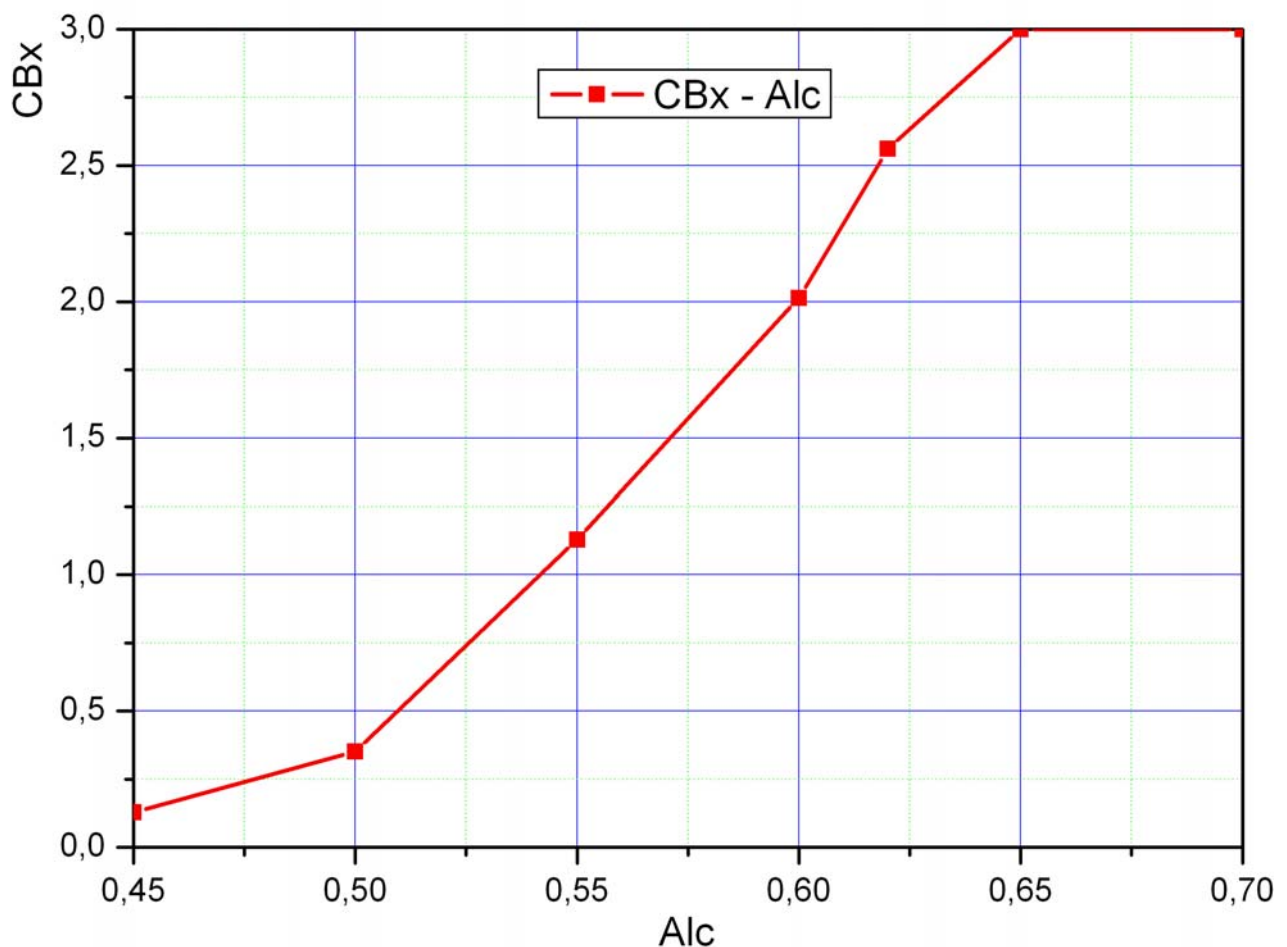


Рисунок 62 – Зависимость концентрации сажи на выхлопе (CBx) от локального коэффициента избытка воздуха в зоне образования сажи. Диапазон для выбора: 0,45...0,65. Рекомендуемое значение – 0,55

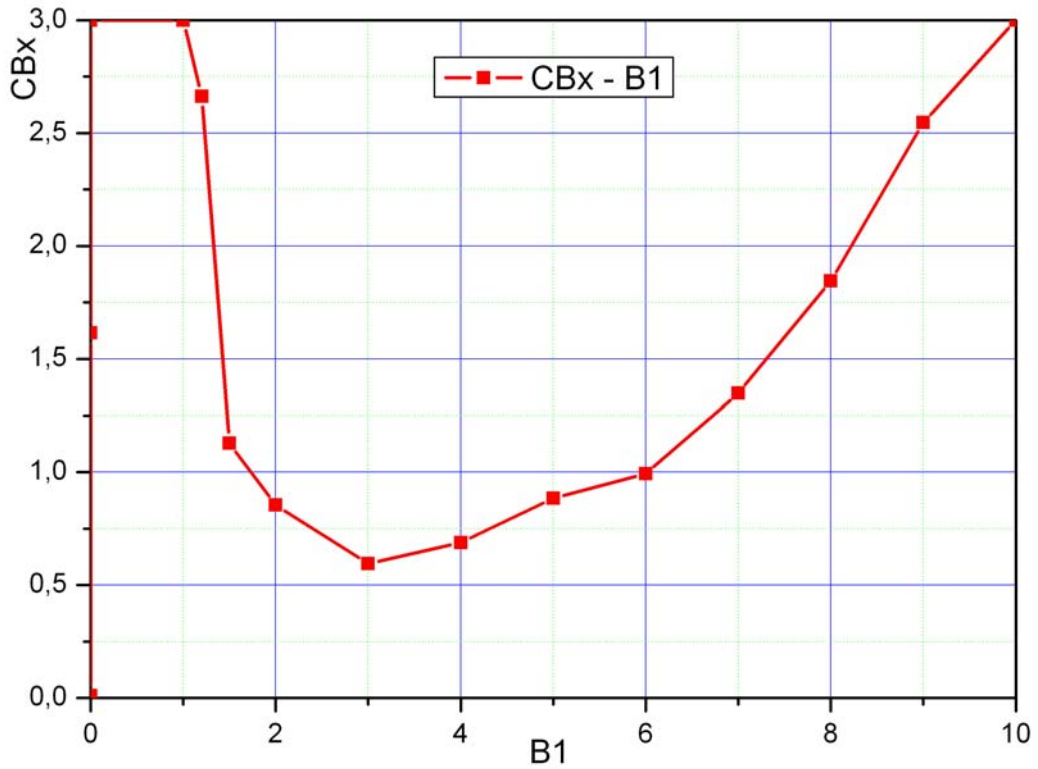


Рисунок 63 – Зависимость концентрации сажи на выхлопе (CBx) от коэффициента B1. Рекомендуемый диапазон для выбора: 1,0...10,0. Значение «по умолчанию» – 1,5 (при задании отрицательным значением)

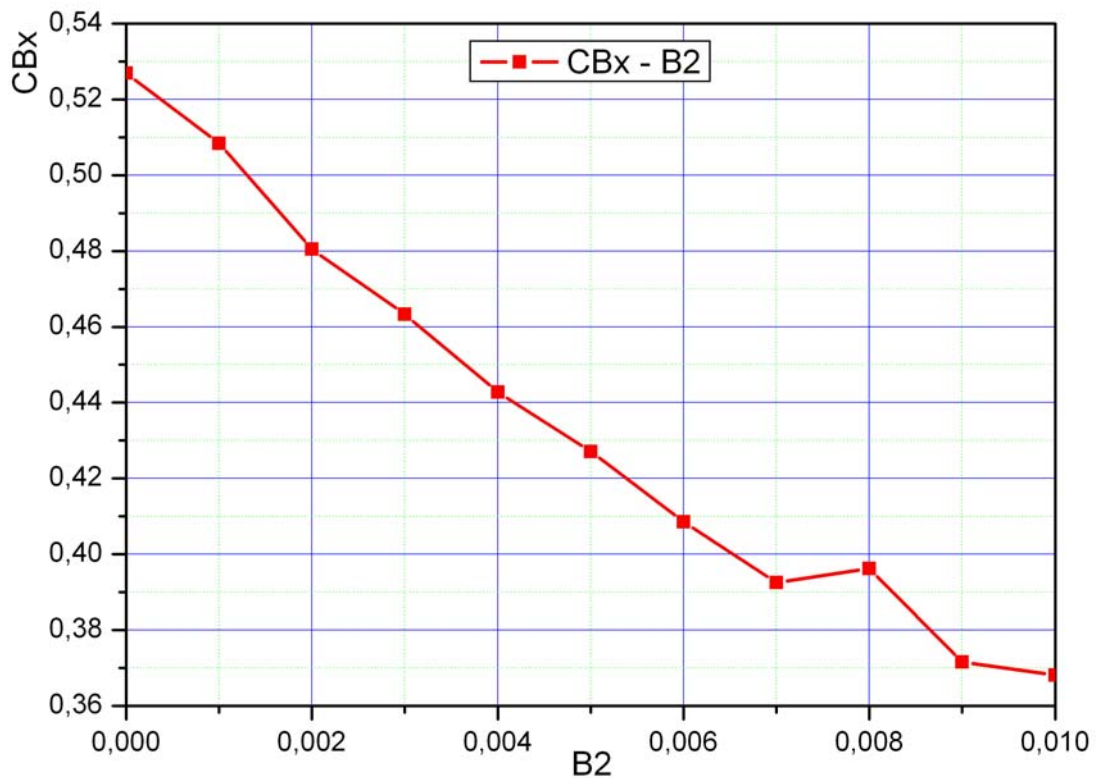


Рисунок 64а – Зависимость концентрации сажи на выхлопе (CBx) от коэффициента B2. Диапазон 0,00...0,01

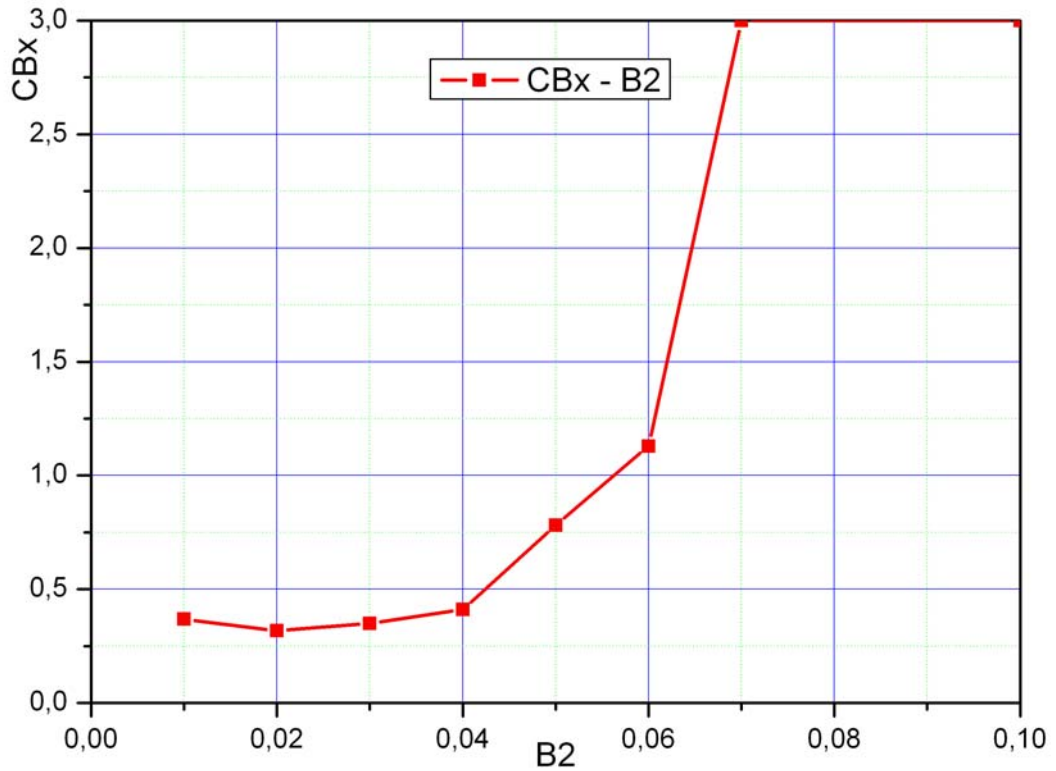


Рисунок 64б – Зависимость концентрации сажи на выхлопе (CBx) от коэффициента B2. Диапазон 0,01...0,10

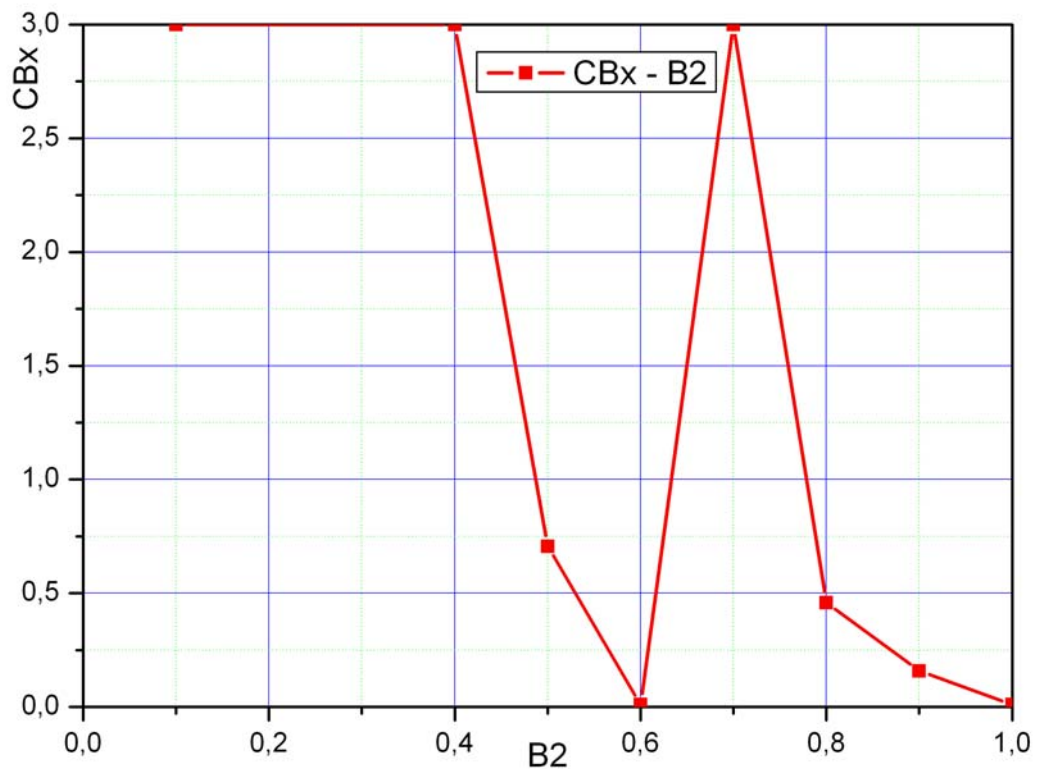


Рисунок 64в – Зависимость концентрации сажи на выхлопе (CBx) от коэффициента B2. Диапазон 0,1...1,0. Значение «по умолчанию» – 0,06.
Рекомендуемый диапазон для выбора: 0,001...0,070

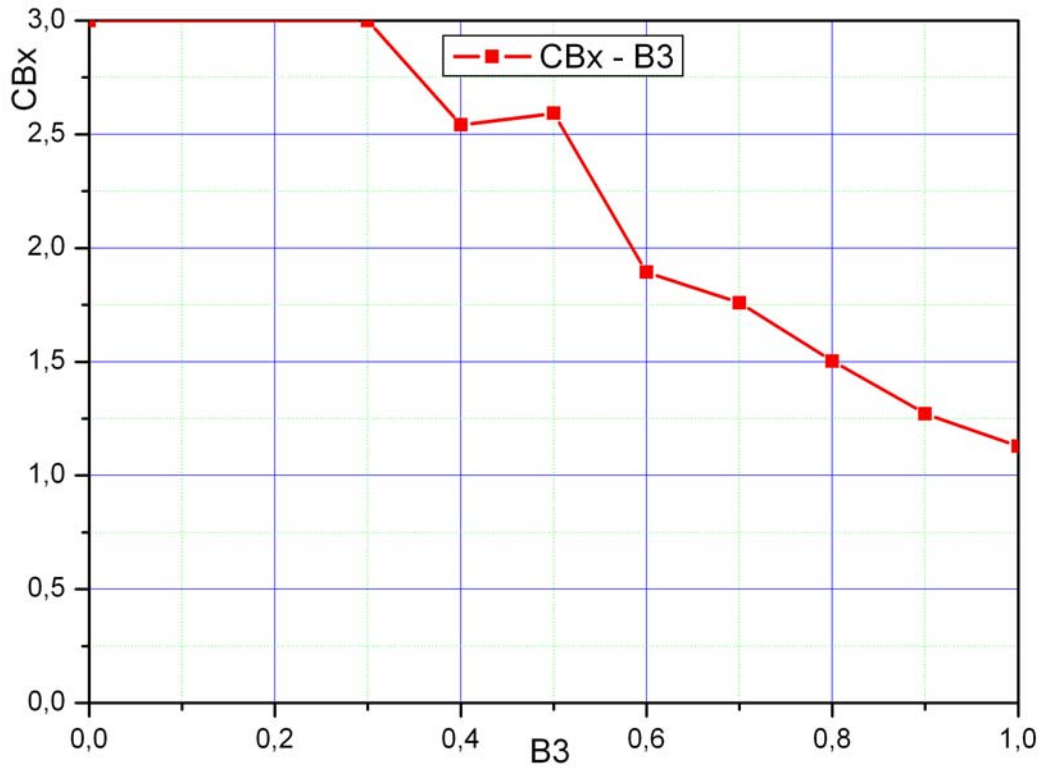


Рисунок 65а – Зависимость концентрации сажи на выхлопе (CBx) от коэффициента B3. Диапазон 0,0...1,0

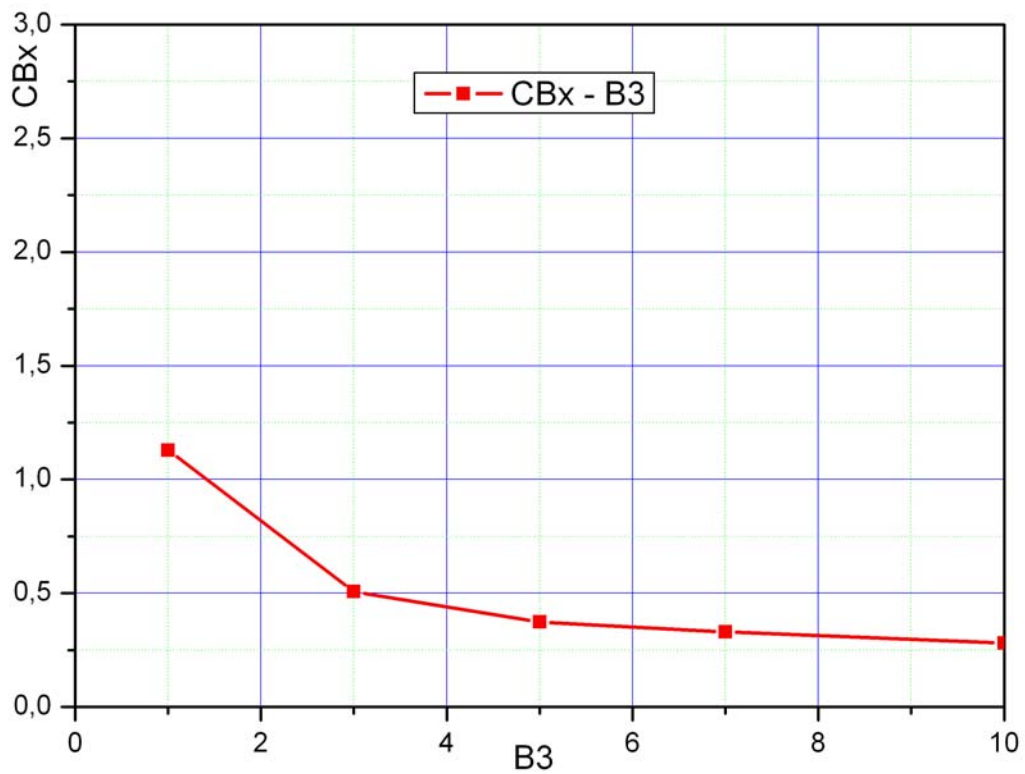


Рисунок 65б – Зависимость концентрации сажи на выхлопе (CBx) от коэффициента B3. Диапазон 1,0...10,0. Значение «по умолчанию» – 1,0.
Рекомендуемый диапазон для выбора: 0,6...10,0

5.2. Организация используемой выходной информации

5.2.1. Выходные данные расчета рабочих процессов

Выходными данными программного комплекса расчета рабочих процессов является следующая информация.

Выходными данными программы-препроцессора «Rp2018.exe» являются:

- файл данных <название>.dat (название файла вводится пользователем, стандартное – rpi***.dat), введенных с помощью экранных форм ввода, см. рис. 60;
- временный файл исходных данных «Tmp_gr.dat» для «быстрой» передачи данных а программу-солвер «Rp_2018.exe». Структура этого файла идентична структуре файла входных данных типа rpi***.dat. **Исключение** составляет наличие пути (в конце файла) для выгрузки файлов с результатами расчета. Таким образом при запуске программы-солвера программой-препроцессором и считывании солвером файла Tmp_gr (при выборе номера файла «0») вся файловая структура расчетных данных будет выгружаться в папку, соответствующую данному пути, т.е. туда, где находится исходный файл исходных данных типа rpi***.dat. Нумерация файлов соответствует номеру варианта расчета, заданного в файле rpi***.dat.

Формат, описание и кодирование переменных выходных данных аналогично приведенным в таблице 1 входным данным.

Выходными данными программы «Rp_2018.exe» являются:

- файл протокола расчета Ipr***.txt, где “***” – номер варианта, заданный в файле исходных данных Rpi***.dat;
- файл типа Ind***.dat, предназначенный для передачи результатов расчета термодинамических параметров газа в цилиндре в программы расчета параметров токсичности ОГ;
- файлы Rbh***.dat, Gzo***.dat, Ptf***.dat, Ptv***.dat и Dgc***.dat, предназначенные для передачи информации в графический постпроцессор.

Пример файла протокола расчета Ipr***.txt приведен на рисунке 66, примеры передаточных файлов данных Ind***.dat, Rbh***.dat, Gzo***.dat, Ptf***.dat, Ptv***.dat и Dgc***.dat приведены на рисунках 67...72.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ДВС НА БАЗЕ
"РАЗОМКНУТОЙ" СХЕМЫ СИСТЕМЫ РЕСИВЕР - ЦИЛИНДР - КОЛЛЕКТОР

КамАЗ-7403. Номинальная мощность. 4 ДТВ *** Вариант 001 ***

S = 120.0 D = 120.0 [мм]; Epsr = 16.0; Lam = .267; Ex = .000

Epsd = 15.0 Режим:

Pk = 2.00 [бар] Tk = 360.0 [K] N = 2200 [1/мин]

Pr = 1.80 [бар] Tr = 800.0 [K] Gt = 6.50 [кг/ч]

Vh 1.357 [дм³] Dros = 1.000 Cm = 8.80 [м/с]

dTk = 17.01 [K]

Температуры стенок камеры, [K]: Cu/Cm = .000

поршня Tr = 553.0; гильзы Tg = 402.0; крышки Tk = 523.0

Параметры тепловыделения по Б.П.Пугачеву:

Fнвпр = -12.0 Fвпр = 25.0 DIKAM = .080 [м]

X1 = .133 X2 = .813 FI1 = 4.07 FI2 = 22.3

K1 = 2.00 K2 = 2.01 угол начала сгорания Fнс = -4.25

Угол задержки самовоспламенения = 7.75 (.587 мс)

Продолжительность сгорания Fсг = 84.2 град. пкв

Доля выг. топлива к моменту C = .071

Доля выг. топлива к моменту Z = .496 (19.9 пкв)

Макс. доля выгоревшего топлива = .946

Цикловая подача топлива = .9848E-04 кг/цикл

Фазы газораспределения: выпуск 115.0 - 390.0

впуск 330.0 - 575.0

Максимальные условные площади проходных сечений

органов газораспределения: выпуск 8.00 [см^{**2}]

впуск 9.00 [см^{**2}]

Условное давление конца сжатия Pс 91.9 [бар]

Давление в цилиндре к концу расширения Pв 8.22 [бар]

Усредненный показатель политропы сжатия 1.385

Усредненный показатель политропы расширения 1.262

Степень повышения давления 1.236

Степень предварительного расширения 1.560

Степень последующего расширения 10.257

Коэффициент полноты идеальной диаграммы .946

Средняя температура газов за период выпуска 843.4 [K]

Температура ОГ в выпускном патрубке 816.5 [K]

Эквивалентная условная площадь перетечек .19723 [мм^{**2}]

Массовая доля потери рабочего тела из КС .500 %

Давление картерных газов 1.050 [бар], темп-ра 370.0 [K]

Элементарный состав топлива С/Н/О (доли от 1): .870/.126/.004

Примеси к топливу Сера/Азот/Вода, % : .200/.015/ .00

Стехиометрическое соотношение L0: 14.302 [кг возд./кг топл.]

Октановое число ОЧИ: 20.0; Цетановое число ЦЧ: 50.0

Плотность топлива: 810.0; Воздуха на впуске: 1.936 [кг/м³]

EGR: .0 % Воздух O2/N2: .210/.790; SMUвоз = 28.960

L0R: 14.302 Заряд O2/N2: .210/.790; SMUзрд = 28.960

Qн топлива при Alfa=1: 42.50 ; истинная: 42.50 [МДж/кг]

Qн смеси при Alfa=1: 2777.4 ; истинная: 1594.7 [КДж/кг]

*** ИНДИКАТОРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЦИКЛА ***

Мощность	33.85 [кВт]	45.99 [л.с.]
Расход топлива	192.03 [г/кВт*ч]	141.33 [г/л.с.*ч]
Действительный коэффициент избытка воздуха	1.794	
Действительный расход воздуха на цилиндр	167.27 [кг/ч]	
Инд. КПД .441	Индикаторное давление	13.60 [бар]
Инд. момент цилиндра	146.92 [Н*м]	14.98 [кг*м]

Максимальные значения по циклу:

Макс. давление сгорания	113.58 [бар]	при Fi=	6.0
Макс. температура цикла	1796.5 [К]	при Fi=	35.5
Макс. жесткость процесса	4.343 [бар/град]	при Fi=	- .6

Среднецикловая температура	787.67 [К]
Результирующая температура	1126.14 [К]
Средний коэфф-т теплоотдачи	534.00 [Вт/м ² *К]
Лущистая составляющая	71.91 [Вт/м ² *К] (13.47 %)

Газовоздушные каналы:

ВЫПУСК: Средний к-т ТО	552.31 [Вт/м ² *К]
Результирующая температура	812.85 [К]
ВПУСК: Средний к-т ТО	240.51 [Вт/м ² *К]
Результирующая температура	355.78 [К]

Коэффициент остаточных газов	.023	Заброс	.00 %
Коэффициент наполнения	.902		
Коэффициент продувки	1.003		
Мощность насосных ходов	3.495 [кВт] (4.75 [л.с.])		

*** ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ ***

Количество цилиндров	8 Мех. КПД	.820
Мощность цилиндровая	27.76 [кВт]	37.71 [л.с.]
Мощность двигателя	222.05 [кВт]	301.70 [л.с.]
Мощность мех. потерь	48.74 [кВт]	66.23 [л.с.]
Удельный расход топлива	234.18 [г/кВт*ч]	172.36 [г/л.с.*ч]
Суммарный коэффициент избытка воздуха	1.799	
Расход воздуха	1338.17 [кг/ч]	1144.49 [м ³ /ч]
Расход топлива	52.00 [кг/ч]	64.20 [л/ч]
Из него: жидкое	52.00 [кг/ч], газ	.00 [кг/ч]
Эфф. КПД .362	Эффективное давление	11.16 [бар]
Крутящий момент	963.83 [Н*м]	98.25 [кг*м]

*** ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС РАБОЧЕГО ЦИКЛА ***

Параметр	величина, Дж	% от Qr	% от Qп
Располагаемая энергия Qr	4185.6	100.00	-
Потери энергии при Alfa<1	.0	.00	-
Потери от недогорания	225.5	5.39	-
Подведенная энергия Qп	3960.1	94.61	100.00
Механическая работа	1846.3	44.11	46.62
Потери тепла в стенки КС	635.9	15.19	16.06
Потери тепла в стенки ГВК	214.4	5.12	5.41
Потери от неплотности КС	18.4	.44	.46

Вынос отработавшими газами	1245.1	29.75	31.44
Полезная работа цикла	1514.0	36.17	38.23
Потери трения в двигателе	332.3	7.94	8.39

*** ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОГ И ВРЕДНЫЕ ВЫБРОСЫ ***

Чистые продукты сгорания:

Компоненты ОГ	Объем ПС кмоль/кг топл.	Объемная доля %	Массовая доля %
Азот N2	.6997393	76.25762	73.78559
Кислород O2	.0822973	8.96876	9.91774
Вода H2O	.0630000	6.86574	4.27061
ДиоксидС CO2	.0724590	7.89659	12.00667
Водород H2	.0000000	.00000	.00000
Угарн.газ CO	.0000410	.00446	.00432
ДиоксидS SO2	.0000625	.00681	.01506
Всего по ЧПС	.9175991	100.00000	99.99999

В ОГ на выхлопе с учетом продувки (1.003):

Компоненты ОГ	Объем ПС кмоль/кг топл.	Объемная доля %	Массовая доля %
Азот N2	.7018872	76.26572	73.79417
Кислород O2	.0828683	9.00431	9.95715
Вода H2O	.0630000	6.84546	4.25804
ДиоксидС CO2	.0724590	7.87326	11.97132
Водород H2	.0000000	.00000	.00000
Угарн.газ CO	.0000410	.00445	.00431
ДиоксидS SO2	.0000625	.00679	.01502
Всего в ОГ	.9203181	99.99999	100.00000

Выход токсичных компонентов ОГ на режиме:

Массовый расход ОГ	1390.17 [кг/ч]
Объемный расход ОГ	1188.96 [м ³ /ч] (при н.у.)

Компоненты ОГ	Объем м ³ /ч	Масса кг/ч	Уд. выбросы кг/кВт*ч
Вода H2O	.81390E+02	.59194E+02	.26660E+00
ДиоксидС CO2	.93610E+02	.16642E+03	.74907E+00
Угарн.газ CO	.52928E-01	.59880E-01	.26967E-03
ДиоксидS SO2	.80744E-01	.20880E+00	.94033E-03
Углеводороды	.16409E-01	.45767E-01	.20611E-03

Показания газоанализатора (осушенные ОГ):

Кислород O2	9.67 % об.
Диоксид углерода CO2	8.45 % об.
Угарный газ CO	48. ppm
Диоксид серы SO2	73. ppm
Углеводороды CHx	15. ppm
Ср. молярная масса CHx	81. кг/кмоль

*** ИНДИКАТОРНАЯ ДИАГРАММА ***

FI	P, бар	T, K	x	dx/dFi	Alfa	M, г
-145.0	2.17	394.2	.000	.00000	237.8	.25873E+01
-143.0	2.19	395.6	.000	.00000	236.5	.25873E+01
-141.0	2.22	397.0	.000	.00000	236.0	.25873E+01
-139.0	2.25	398.4	.000	.00000	235.5	.25873E+01
-137.0	2.28	400.0	.000	.00000	235.1	.25873E+01
-135.0	2.31	401.7	.000	.00000	234.7	.25873E+01
-133.0	2.35	403.4	.000	.00000	234.5	.25873E+01
-131.0	2.38	405.2	.000	.00000	234.3	.25873E+01
-129.0	2.42	407.2	.000	.00000	234.3	.25873E+01
-127.0	2.47	409.2	.000	.00000	234.3	.25873E+01

----- вырезано и пропущено N строк -----

465.0	1.76	374.6	.946	.00000	279.6	.16848E+01
467.0	1.76	374.7	.946	.00000	280.1	.17235E+01
469.0	1.77	374.8	.946	.00000	280.7	.17617E+01
471.0	1.77	374.8	.946	.00000	281.3	.17997E+01
473.0	1.78	375.0	.946	.00000	281.9	.18372E+01
475.0	1.79	375.1	.946	.00000	282.6	.18744E+01
477.0	1.79	375.3	.946	.00000	283.3	.19111E+01
479.0	1.80	375.4	.946	.00000	284.0	.19472E+01
481.0	1.80	375.6	.946	.00000	284.7	.19827E+01
483.0	1.81	375.8	.946	.00000	285.5	.20175E+01
485.0	1.82	376.0	.946	.00000	286.2	.20516E+01
487.0	1.82	376.2	.946	.00000	286.9	.20847E+01
489.0	1.83	376.4	.946	.00000	287.6	.21170E+01
491.0	1.84	376.7	.946	.00000	288.2	.21483E+01
493.0	1.84	376.9	.946	.00000	288.9	.21786E+01
495.0	1.85	377.1	.946	.00000	289.5	.22079E+01
497.0	1.85	377.3	.946	.00000	290.1	.22361E+01
499.0	1.86	377.5	.946	.00000	290.7	.22632E+01
501.0	1.86	377.7	.946	.00000	291.3	.22892E+01
503.0	1.87	377.9	.946	.00000	291.8	.23140E+01
505.0	1.87	378.0	.946	.00000	292.4	.23377E+01
507.0	1.88	378.2	.946	.00000	292.9	.23603E+01
509.0	1.88	378.4	.946	.00000	293.4	.23817E+01
511.0	1.89	378.6	.946	.00000	293.9	.24020E+01
513.0	1.89	378.8	.946	.00000	294.3	.24211E+01
515.0	1.90	379.0	.946	.00000	294.8	.24391E+01
517.0	1.90	379.2	.946	.00000	295.2	.24559E+01
519.0	1.90	379.4	.946	.00000	295.7	.24717E+01
521.0	1.91	379.6	.946	.00000	296.1	.24863E+01
523.0	1.91	379.8	.946	.00000	296.5	.24998E+01
525.0	1.92	380.0	.946	.00000	297.0	.25123E+01
527.0	1.92	380.3	.946	.00000	297.4	.25238E+01
529.0	1.93	380.5	.946	.00000	297.8	.25342E+01
531.0	1.93	380.8	.946	.00000	298.3	.25437E+01
533.0	1.93	381.0	.946	.00000	298.7	.25521E+01
535.0	1.94	381.3	.946	.00000	299.2	.25597E+01
537.0	1.94	381.6	.946	.00000	299.7	.25664E+01
539.0	1.95	381.9	.946	.00000	299.6	.25722E+01
541.0	1.95	382.3	.946	.00000	297.9	.25772E+01
543.0	1.96	382.7	.946	.00000	294.6	.25814E+01
545.0	1.97	383.0	.946	.00000	290.8	.25849E+01
547.0	1.97	383.5	.946	.00000	287.0	.25877E+01
549.0	1.98	383.9	.946	.00000	283.2	.25898E+01

551.0	1.99	384.4	.946	.00000	279.5	.25913E+01
553.0	2.00	384.9	.946	.00000	275.7	.25921E+01
555.0	2.01	385.5	.946	.00000	272.0	.25919E+01
557.0	2.02	386.0	.946	.00000	268.2	.25911E+01
559.0	2.03	386.7	.946	.00000	264.5	.25903E+01
561.0	2.04	387.3	.946	.00000	260.9	.25895E+01
563.0	2.05	388.1	.946	.00000	257.3	.25888E+01
565.0	2.07	388.9	.946	.00000	253.8	.25882E+01
567.0	2.08	389.8	.946	.00000	250.3	.25878E+01
569.0	2.10	390.8	.946	.00000	246.9	.25875E+01
571.0	2.12	391.9	.946	.00000	243.5	.25873E+01
573.0	2.14	393.0	.946	.00000	240.3	.25873E+01

END OF DATA

Рисунок 66 – Пример файла протокола расчета Ipr***.txt программы «Rp_2018.exe»

КамАЗ-7403. Номинальная мощность. 4 ДТВ

*** Вариант 001 ***

.120	.120	16.000	.267	.000			
2200	6.500	1.793	2	1	1		
42.50	190.00	.870	.126	.004	.200	.015	.005
360	575.0	130	-4.25	33.85	1.0032	.0236	.820
2.165	2.190	2.217	2.246	2.277	2.310	2.346	2.384
2.424	2.467	2.513	2.563	2.615	2.671	2.731	2.795
2.863	2.936	3.014	3.097	3.186	3.282	3.384	3.493
3.611	3.737	3.873	4.019	4.176	4.345	4.528	4.726
4.940	5.172	5.424	5.698	5.996	6.320	6.675	7.063
7.488	7.954	8.467	9.032	9.656	10.346	11.110	11.958
12.901	13.951	15.124	16.434	17.900	19.543	21.386	23.453
25.771	28.369	31.275	34.517	38.118	42.092	46.442	51.149
56.166	61.411	66.754	72.018	76.977	81.369	84.923	88.578
95.961	104.358	110.480	113.260	113.339	111.693	108.962	105.484
101.462	97.053	92.393	87.600	82.772	77.987	73.306	68.776
64.428	60.284	56.359	52.659	49.186	45.938	42.911	40.096
37.484	35.067	32.833	30.771	28.870	27.119	25.507	24.024
22.660	21.405	20.250	19.188	18.210	17.308	16.477	15.710
15.002	14.348	13.742	13.181	12.661	12.179	11.731	11.314
10.926	10.565	10.229	9.915	9.621	9.347	9.091	8.851
8.627	8.417	8.220	8.035	7.861	7.695	7.538	7.387
7.241	7.100	6.963	6.829	6.697	6.568	6.439	6.312
6.185	6.059	5.933	5.807	5.681	5.555	5.428	5.302
5.175	5.049	4.922	4.796	4.670	4.545	4.421	4.297
4.175	4.053	3.934	3.816	3.700	3.586	3.475	3.366
3.259	3.156	3.055	2.958	2.865	2.775	2.690	2.608
2.532	2.460	2.393	2.331	2.273	2.221	2.174	2.131
2.093	2.059	2.029	2.004	1.982	1.964	1.949	1.937
1.927	1.920	1.916	1.912	1.911	1.911	1.911	1.913
1.916	1.919	1.922	1.926	1.930	1.935	1.939	1.944
1.949	1.953	1.958	1.962	1.966	1.970	1.974	1.977

RU.02068574.02018-02 31

1.979	1.981	1.983	1.983	1.984	1.984	1.983	1.983
1.982	1.982	1.981	1.980	1.979	1.978	1.977	1.976
1.975	1.974	1.972	1.970	1.968	1.965	1.962	1.959
1.954	1.950	1.945	1.940	1.935	1.929	1.923	1.918
1.912	1.906	1.900	1.893	1.887	1.880	1.872	1.865
1.857	1.849	1.842	1.834	1.826	1.819	1.812	1.805
1.799	1.793	1.787	1.782	1.777	1.773	1.769	1.766
1.763	1.761	1.759	1.757	1.756	1.754	1.753	1.752
1.751	1.750	1.748	1.747	1.746	1.745	1.744	1.743
1.742	1.740	1.739	1.738	1.737	1.737	1.737	1.737
1.737	1.738	1.740	1.742	1.744	1.746	1.749	1.753
1.756	1.761	1.765	1.770	1.775	1.780	1.786	1.792
1.798	1.804	1.811	1.817	1.823	1.830	1.836	1.841
1.847	1.853	1.858	1.863	1.868	1.873	1.878	1.883
1.887	1.891	1.896	1.900	1.904	1.908	1.912	1.917
1.921	1.925	1.930	1.934	1.939	1.944	1.949	1.955
1.961	1.967	1.974	1.982	1.990	1.998	2.007	2.016
2.026	2.038	2.051	2.066	2.083	2.101	2.120	2.142
394.23	395.56	396.95	398.43	399.99	401.65	403.39	405.24
407.18	409.22	411.38	413.64	416.01	418.51	421.13	423.88
426.76	429.78	432.94	436.25	439.73	443.36	447.17	451.16
455.33	459.70	464.28	469.07	474.09	479.34	484.85	490.61
496.65	502.98	509.62	516.57	523.87	531.52	539.54	547.96
556.80	566.08	575.83	586.07	596.83	608.14	620.02	632.52
645.66	659.47	673.99	689.25	705.29	722.12	739.78	758.27
777.62	797.80	818.79	840.55	863.00	886.01	909.41	932.98
956.41	979.35	1001.32	1021.81	1040.23	1055.97	1068.42	1081.61
1133.18	1222.55	1315.72	1390.51	1445.36	1488.26	1526.25	1562.58
1597.92	1631.88	1663.84	1693.17	1719.37	1742.04	1760.88	1775.73
1786.53	1793.30	1796.17	1795.32	1791.01	1783.52	1773.18	1760.33
1745.33	1728.52	1710.25	1690.83	1670.56	1649.71	1628.52	1607.21
1585.95	1564.90	1544.18	1523.89	1504.10	1484.89	1466.27	1448.29
1430.95	1414.26	1398.21	1382.80	1368.01	1353.84	1340.26	1327.24
1314.78	1302.85	1291.43	1280.49	1270.03	1260.01	1250.42	1241.25
1232.47	1224.07	1216.04	1208.37	1200.98	1193.84	1186.92	1180.16
1173.54	1167.03	1160.59	1154.21	1147.85	1141.48	1135.10	1128.68
1122.21	1115.66	1109.04	1102.31	1095.49	1088.55	1081.50	1074.32
1067.02	1059.60	1052.04	1044.37	1036.58	1028.66	1020.64	1012.52
1004.30	995.99	987.60	979.15	970.65	962.11	953.56	945.00
936.45	927.93	919.45	911.04	902.75	894.58	886.59	878.79
871.23	863.93	856.93	850.26	843.94	838.01	832.48	827.35
822.63	818.33	814.42	810.92	807.80	805.06	802.67	800.61
798.85	797.36	796.11	795.07	794.21	793.50	792.92	792.45
792.07	791.76	791.50	791.29	791.11	790.95	790.81	790.67
790.53	790.38	790.22	790.03	789.81	789.56	789.27	788.92
788.52	788.05	787.51	786.90	786.23	785.50	784.72	783.91
783.07	782.20	781.30	780.38	779.44	778.47	777.47	776.43
775.35	774.23	773.06	771.82	770.51	769.11	767.62	766.02

RU.02068574.02018-02 31

764.21	762.08	759.47	756.18	751.99	746.63	739.80	731.25
720.73	708.09	693.31	676.52	658.00	638.16	617.54	596.69
576.14	556.35	537.67	520.33	504.47	490.11	477.23	465.76
455.58	446.64	438.75	431.77	425.60	420.15	415.34	411.08
407.30	403.95	400.97	398.31	395.93	393.80	391.88	390.15
388.58	387.16	385.87	384.69	383.61	382.62	381.71	380.86
380.08	379.36	378.69	378.08	377.53	377.03	376.59	376.20
375.85	375.56	375.31	375.10	374.94	374.81	374.72	374.66
374.64	374.64	374.68	374.75	374.84	374.95	375.09	375.25
375.43	375.62	375.82	376.03	376.23	376.44	376.65	376.86
377.06	377.26	377.46	377.66	377.85	378.04	378.23	378.42
378.61	378.80	378.99	379.19	379.39	379.59	379.80	380.03
380.26	380.50	380.75	381.02	381.31	381.61	381.93	382.28
382.65	383.04	383.47	383.92	384.41	384.93	385.47	386.04
386.65	387.33	388.08	388.91	389.81	390.80	391.86	393.01
.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000
.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000
.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000
.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000
.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000
.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000
.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000
.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000
.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.007380
.044822	.097257	.147628	.190102	.227552	.264435	.303182	.344261
.387214	.431304	.475768	.519884	.563002	.604560	.644086	.681212
.715665	.747270	.775936	.801656	.824487	.844543	.861982	.876993
.889788	.900587	.909613	.917087	.923216	.928196	.932205	.935402
.937929	.939908	.941444	.942625	.943525	.944205	.944714	.945092
.945370	.945572	.945719	.945824	.945899	.945951	.945988	.946013
.946030	.946042	.946050	.946056	.946059	.946062	.946063	.946064
.946065	.946065						
.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0120146
.0243885	.0266671	.0231029	.0195105	.0182730	.0188300	.0200016	.0210877
.0218393	.0222055	.0221977	.0218467	.0211924	.0202805	.0191597	.0178798
.0164895	.0150348	.0135575	.0120941	.0106755	.0093264	.0080655	.0069057
.0058548	.0049157	.0040878	.0033671	.0027475	.0022211	.0017789	.0014117
.0011101	.0008650	.0006680	.0005112	.0003878	.0002915	.0002172	.0001604
.0001174	.0000852	.0000613	.0000437	.0000309	.0000216	.0000150	.0000104
.0000071	.0000048	.0000032	.0000021	.0000014	.0000009	.0000006	.0000004

.0000002	.0000002							
237.76	236.54	235.96	235.47	235.06	234.74	234.50	234.35	
234.29	234.32	234.44	234.66	234.98	235.39	235.91	236.54	
237.28	238.13	239.10	240.19	241.41	242.76	244.25	245.89	
247.67	249.61	251.71	253.99	256.44	259.09	261.94	264.99	
268.27	271.79	275.55	279.57	284.98	293.25	303.80	315.43	
327.94	341.43	355.98	371.70	388.72	407.17	427.20	448.97	
472.68	498.55	526.81	557.75	591.66	628.88	669.81	714.85	
764.48	819.18	879.48	945.87	1018.85	1098.77	1185.82	1279.83	
1380.17	1485.44	1593.68	1700.17	1802.24	1893.08	2167.17	1976.73	
2186.88	2469.57	2642.02	2761.28	2850.20	2875.24	2861.78	2817.92	
2746.62	2651.79	2538.60	2412.56	2278.87	2141.98	2005.52	1872.25	
1744.15	1622.55	1508.26	1401.67	1302.88	1211.77	1128.05	1051.37	
981.29	917.35	859.08	806.01	757.71	713.73	673.67	637.17	
603.87	573.48	545.69	520.26	496.96	475.56	455.90	437.80	
421.11	405.70	391.42	377.76	366.10	354.72	344.14	334.30	
325.12	316.56	308.57	301.10	294.11	287.56	281.43	275.69	
270.29	265.01	263.60	265.39	269.85	274.19	278.40	282.48	
286.42	290.21	293.83	297.29	300.57	303.66	306.55	309.23	
311.69	313.93	315.95	317.72	319.26	320.55	321.60	322.39	
322.94	323.25	323.31	323.14	322.73	322.09	321.23	320.17	
318.90	317.44	315.20	311.13	305.44	299.30	293.21	287.20	
281.26	275.42	269.70	264.11	258.67	253.41	248.34	243.48	
238.85	234.46	230.33	226.48	222.91	219.64	216.65	213.95	
211.53	209.39	207.51	205.90	204.53	203.39	202.47	201.75	
201.21	200.82	200.58	200.46	200.44	200.52	200.66	200.87	
201.13	201.43	201.76	202.12	202.50	202.90	203.31	203.72	
204.13	204.54	204.94	205.32	205.70	206.05	206.37	206.67	
206.94	207.16	207.35	207.50	207.62	207.72	207.81	207.88	
207.95	208.01	208.07	208.13	208.19	208.25	208.31	208.37	
208.42	208.47	208.50	208.52	208.52	208.50	208.44	208.37	
208.28	208.21	208.19	208.24	208.41	208.75	209.30	210.11	
211.24	212.72	214.57	216.80	219.40	222.33	225.53	228.92	
232.43	235.96	239.43	242.78	245.96	248.92	251.66	254.16	
256.43	258.46	260.25	261.84	263.28	264.57	265.75	266.82	
267.79	268.67	269.47	270.20	270.86	271.46	272.01	272.50	
272.94	273.34	273.69	274.00	274.27	274.51	274.71	274.87	
275.01	275.12	275.22	275.33	275.45	275.59	275.74	275.93	
276.14	276.39	276.67	276.98	277.32	277.70	278.12	278.56	
279.05	279.56	280.11	280.69	281.31	281.95	282.62	283.31	
284.02	284.74	285.45	286.17	286.87	287.56	288.23	288.88	
289.52	290.13	290.73	291.30	291.85	292.38	292.89	293.39	
293.87	294.34	294.79	295.23	295.67	296.10	296.53	296.96	
297.39	297.82	298.27	298.73	299.20	299.70	299.61	297.86	
294.56	290.78	287.01	283.25	279.49	275.73	271.96	268.20	
264.50	260.86	257.28	253.76	250.29	246.88	243.51	240.26	
1.050								

Рисунок 67 – Пример передаточного файла индикаторного процесса Ind***.dat

-150.00	2.11	39.13	.00	.00	6.13	.00
-147.50	2.14	39.27	.00	.00	6.03	.00
-145.00	2.17	39.42	.00	.00	5.94	.00
-142.50	2.20	39.59	.00	.00	5.91	.00
-140.00	2.23	39.77	.00	.00	5.89	.00
-137.50	2.27	39.96	.00	.00	5.88	.00
-135.00	2.31	40.16	.00	.00	5.87	.00
-132.50	2.36	40.39	.00	.00	5.86	.00
-130.00	2.40	40.62	.00	.00	5.86	.00
-127.50	2.46	40.87	.00	.00	5.86	.00
-125.00	2.51	41.14	.00	.00	5.86	.00
-122.50	2.58	41.42	.00	.00	5.87	.00
-120.00	2.64	41.73	.00	.00	5.88	.00
-117.50	2.72	42.05	.00	.00	5.89	.00
-115.00	2.79	42.39	.00	.00	5.91	.00
-112.50	2.88	42.75	.00	.00	5.94	.00
-110.00	2.97	43.14	.00	.00	5.97	.00
-107.50	3.08	43.54	.00	.00	6.00	.00
-105.00	3.19	43.97	.00	.00	6.04	.00
-102.50	3.31	44.43	.00	.00	6.08	.00
-100.00	3.44	44.92	.00	.00	6.13	.00
-97.50	3.58	45.43	.00	.00	6.18	.00
-95.00	3.74	45.97	.00	.00	6.24	.00
----- вырезано и пропущено N строк -----						
115.00	8.22	121.60	94.61	.00	6.59	.00
117.50	7.99	120.65	94.61	.00	6.66	.00
120.00	7.78	119.74	94.61	.00	6.80	.00
122.50	7.58	118.86	94.61	.00	6.93	.00
125.00	7.39	118.02	94.61	.00	7.06	.00
127.50	7.21	117.19	94.61	.00	7.18	.00
130.00	7.03	116.38	94.61	.00	7.30	.00
132.50	6.86	115.58	94.61	.00	7.41	.00
135.00	6.70	114.78	94.61	.00	7.51	.00
137.50	6.54	113.99	94.61	.00	7.61	.00
140.00	6.38	113.19	94.61	.00	7.70	.00
142.50	6.22	112.38	94.61	.00	7.78	.00
145.00	6.06	111.57	94.61	.00	7.85	.00
147.50	5.90	110.74	94.61	.00	7.91	.00
150.00	5.74	109.89	94.61	.00	7.96	.00
Fi	P	T	X	dX/dFi	Alfa	AlU
"rpm	bar	K	part1	part1/"rpm	Wtt/m^2*K	-
1	1	10	0.01	0.0002	40	40

Рисунок 68 – Пример передаточного файла графической информации Rbh***.dat
(изменение параметров рабочего на тактах сжатия-расширения)

100
RU.02068574.02018-02 31

120.00	7.78	5.99	10.00	.05	.00	2.72
125.00	7.39	5.90	9.99	.22	.00	2.82
130.00	7.03	5.82	9.95	.48	.00	2.92
135.00	6.70	5.74	9.88	.85	.00	3.01
140.00	6.38	5.66	9.78	1.30	.00	3.08
145.00	6.06	5.58	9.63	1.83	.00	3.14
150.00	5.74	5.49	9.44	2.43	.00	3.18
155.00	5.43	5.41	9.20	3.07	.00	3.22
160.00	5.11	5.32	8.92	3.75	.00	3.23
165.00	4.80	5.22	8.61	4.44	.00	3.23
170.00	4.48	5.12	8.25	5.14	.00	3.22
175.00	4.17	5.02	7.88	5.82	.00	3.19
180.00	3.88	4.92	7.48	6.46	.00	3.13
185.00	3.59	4.81	7.06	7.06	.00	2.99
190.00	3.31	4.70	6.65	7.59	.00	2.84
195.00	3.06	4.60	6.23	8.04	.00	2.70
200.00	2.82	4.49	5.83	8.40	.00	2.56
205.00	2.61	4.39	5.45	8.67	.00	2.43
210.00	2.43	4.30	5.10	8.83	.00	2.32
215.00	2.27	4.22	4.78	8.89	.00	2.23
220.00	2.15	4.15	4.50	8.89	.00	2.15
225.00	2.06	4.09	4.26	8.89	.00	2.09
230.00	1.99	4.05	4.05	8.89	.00	2.05
----- вырезано и пропущено N строк -----						
525.00	1.92	1.90	9.42	.00	5.00	2.97
530.00	1.93	1.90	9.52	.00	4.22	2.98
535.00	1.94	1.91	9.60	.00	3.45	2.99
540.00	1.95	1.91	9.65	.00	2.73	2.99
545.00	1.97	1.92	9.69	.00	2.06	2.91
550.00	1.99	1.92	9.71	.00	1.46	2.81
555.00	2.01	1.93	9.72	.00	.95	2.72
560.00	2.03	1.93	9.71	.00	.54	2.63
565.00	2.07	1.94	9.71	.00	.24	2.54
570.00	2.11	1.96	9.70	.00	.06	2.45
575.00	2.17	1.97	9.70	.00	.00	2.38
580.00	2.23	1.99	9.70	.00	.00	2.36
585.00	2.31	2.01	9.70	.00	.00	2.35
590.00	2.40	2.03	9.70	.00	.00	2.34
595.00	2.51	2.06	9.70	.00	.00	2.34
600.00	2.64	2.09	9.70	.00	.00	2.35
Fi	P	T	M	FmVIP	FmVP	Alfa
"rpm	bar	K	kg	m^2	m^2	Wtt/m^2*K
1	1	200	.2667	.000090	.000090	100

Рисунок 69 – Пример передаточного файла графической информации Gzo***.dat
(изменение параметров рабочего процесса на тактах газообмена)

101
RU.02068574.02018-02 31

-145.0	.2165E+01	.3942E+03	.2587E+01	.2378E+03
-143.0	.2190E+01	.3956E+03	.2587E+01	.2365E+03
-141.0	.2217E+01	.3969E+03	.2587E+01	.2360E+03
-139.0	.2246E+01	.3984E+03	.2587E+01	.2355E+03
-137.0	.2277E+01	.4000E+03	.2587E+01	.2351E+03
-135.0	.2310E+01	.4016E+03	.2587E+01	.2347E+03
-133.0	.2346E+01	.4034E+03	.2587E+01	.2345E+03
-131.0	.2384E+01	.4052E+03	.2587E+01	.2344E+03
-129.0	.2424E+01	.4072E+03	.2587E+01	.2343E+03
-127.0	.2467E+01	.4092E+03	.2587E+01	.2343E+03
-125.0	.2513E+01	.4114E+03	.2587E+01	.2344E+03
-123.0	.2563E+01	.4136E+03	.2587E+01	.2347E+03
-121.0	.2615E+01	.4160E+03	.2587E+01	.2350E+03
-119.0	.2671E+01	.4185E+03	.2587E+01	.2354E+03
-117.0	.2731E+01	.4211E+03	.2587E+01	.2359E+03
-115.0	.2795E+01	.4239E+03	.2587E+01	.2365E+03
-113.0	.2863E+01	.4268E+03	.2587E+01	.2373E+03
-111.0	.2936E+01	.4298E+03	.2587E+01	.2381E+03
-109.0	.3014E+01	.4329E+03	.2587E+01	.2391E+03
-107.0	.3097E+01	.4363E+03	.2587E+01	.2402E+03
-105.0	.3186E+01	.4397E+03	.2587E+01	.2414E+03
-103.0	.3282E+01	.4434E+03	.2587E+01	.2428E+03
----- вырезано и пропущено N строк -----				
545.0	.1967E+01	.3830E+03	.2585E+01	.2908E+03
547.0	.1974E+01	.3835E+03	.2588E+01	.2870E+03
549.0	.1982E+01	.3839E+03	.2590E+01	.2832E+03
551.0	.1990E+01	.3844E+03	.2591E+01	.2795E+03
553.0	.1998E+01	.3849E+03	.2592E+01	.2757E+03
555.0	.2007E+01	.3855E+03	.2592E+01	.2720E+03
557.0	.2016E+01	.3860E+03	.2591E+01	.2682E+03
559.0	.2026E+01	.3867E+03	.2590E+01	.2645E+03
561.0	.2038E+01	.3873E+03	.2590E+01	.2609E+03
563.0	.2051E+01	.3881E+03	.2589E+01	.2573E+03
565.0	.2066E+01	.3889E+03	.2588E+01	.2538E+03
567.0	.2083E+01	.3898E+03	.2588E+01	.2503E+03
569.0	.2101E+01	.3908E+03	.2588E+01	.2469E+03
571.0	.2120E+01	.3919E+03	.2587E+01	.2435E+03
573.0	.2142E+01	.3930E+03	.2587E+01	.2403E+03
575.0	.2165E+01	.3942E+03	.2587E+01	.2378E+03
Fi	P	T	M	Alfa
"rpm	bar	K	kg	Wtt/m^2*K
1	1	1	1	1

Рисунок 70 – Пример передаточного файла графической информации Ptf*.dat
(изменение параметров рабочего процесса в целом за цикл)**

102
RU.02068574.02018-02 31

```
.1355E+01 .2165E+01 .2165E+01 .3942E+03
.1344E+01 .2190E+01 .2190E+01 .3956E+03
.1332E+01 .2217E+01 .2216E+01 .3969E+03
.1320E+01 .2246E+01 .2244E+01 .3984E+03
.1307E+01 .2277E+01 .2274E+01 .4000E+03
.1294E+01 .2310E+01 .2307E+01 .4016E+03
.1280E+01 .2346E+01 .2342E+01 .4034E+03
.1266E+01 .2384E+01 .2379E+01 .4052E+03
.1251E+01 .2424E+01 .2418E+01 .4072E+03
.1235E+01 .2467E+01 .2461E+01 .4092E+03
.1219E+01 .2513E+01 .2506E+01 .4114E+03
.1202E+01 .2563E+01 .2554E+01 .4136E+03
.1185E+01 .2615E+01 .2606E+01 .4160E+03
.1167E+01 .2671E+01 .2661E+01 .4185E+03
.1149E+01 .2731E+01 .2720E+01 .4211E+03
.1130E+01 .2795E+01 .2783E+01 .4239E+03
.1111E+01 .2863E+01 .2850E+01 .4268E+03
.1091E+01 .2936E+01 .2922E+01 .4298E+03
.1071E+01 .3014E+01 .2998E+01 .4329E+03
.1050E+01 .3097E+01 .3081E+01 .4363E+03
.1029E+01 .3186E+01 .3168E+01 .4397E+03
.1008E+01 .3282E+01 .3262E+01 .4434E+03
```

----- вырезано и пропущено N строк -----

```
.1446E+01 .1967E+01 .1979E+01 .3830E+03
.1444E+01 .1974E+01 .1982E+01 .3835E+03
.1441E+01 .1982E+01 .1987E+01 .3839E+03
.1438E+01 .1990E+01 .1993E+01 .3844E+03
.1435E+01 .1998E+01 .2000E+01 .3849E+03
.1431E+01 .2007E+01 .2008E+01 .3855E+03
.1426E+01 .2016E+01 .2017E+01 .3860E+03
.1420E+01 .2026E+01 .2028E+01 .3867E+03
.1414E+01 .2038E+01 .2040E+01 .3873E+03
.1407E+01 .2051E+01 .2054E+01 .3881E+03
.1400E+01 .2066E+01 .2068E+01 .3889E+03
.1392E+01 .2083E+01 .2085E+01 .3898E+03
.1384E+01 .2101E+01 .2102E+01 .3908E+03
.1375E+01 .2120E+01 .2122E+01 .3919E+03
.1365E+01 .2142E+01 .2143E+01 .3930E+03
.1355E+01 .2165E+01 .2165E+01 .3942E+03
```

Vol	Pi	Pr	T
-----	----	----	---

m^3	bar	bar	K
-----	-----	-----	---

1	1	1	1
---	---	---	---

Рисунок 71 – Пример передаточного файла графической информации Ptv***.dat
(«свернутые» диаграммы давлений и температур в цикле)

103
RU.02068574.02018-02 31

-10.00	.00000E+00	.00000E+00
-9.72	.19890E-05	.14207E-03
-9.44	.69440E-05	.21186E-03
-9.16	.12876E-04	.21186E-03
-8.88	.18746E-04	.20739E-03
-8.60	.24584E-04	.20963E-03
-8.32	.30485E-04	.21186E-03
-8.04	.36417E-04	.21186E-03
-7.76	.42267E-04	.20597E-03
-7.48	.48116E-04	.21186E-03
-7.20	.54049E-04	.21186E-03
-6.92	.59605E-04	.18503E-03
-6.64	.62930E-04	.52429E-04
-6.36	.63664E-04	.00000E+00
-6.08	.63664E-04	.00000E+00
-5.80	.63749E-04	.61083E-05
-5.52	.63840E-04	.41115E-06
-5.24	.63846E-04	.00000E+00
-4.96	.63849E-04	.18345E-06
-4.68	.63856E-04	.34780E-06
-4.40	.63861E-04	.00000E+00
--- вырезано и пропущено N строк ---		
14.08	.30777E-03	.00000E+00
14.36	.30777E-03	.00000E+00
14.64	.30850E-03	.52428E-04
14.92	.31182E-03	.18503E-03
15.20	.31738E-03	.21186E-03
15.48	.32331E-03	.21186E-03
15.76	.32916E-03	.20597E-03
16.04	.33501E-03	.21186E-03
16.32	.34094E-03	.21186E-03
16.60	.34684E-03	.20963E-03
16.88	.35268E-03	.20739E-03
17.16	.35855E-03	.21186E-03
17.44	.36448E-03	.21186E-03
17.72	.36944E-03	.14207E-03
18.00	.37143E-03	.00000E+00
"rpm	Integral char.	Diff. char.
"rpm	kg	kg/"rpm
1	1	.1

Рисунок 72 – Пример передаточного файла графической информации Dgc***.dat
(характеристики топливоподачи)

Выходные данные, находящиеся в файле протокола расчета Ipr***.txt и передаточных файлах Ind***.dat, Spd***.dat, Rbh***.dat, Gzo***.dat, Ptf***.dat, Ptv***.dat и Dgc***.dat, их формат, описание и кодирование сведены в таблицы 3...9.

Таблица 3. Выходные данные, находящиеся в файле протокола расчета Ipr ***.txt

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
Заголовок протокола расчета			
1	TEXT	Текстовая информация о двигателе	A, 40 поз.
2	VAR	Номер варианта расчета	A, 3 поз.
3	S	Ход поршня, [мм]	F6.1
4	D	Диаметр цилиндра, [мм]	F6.1
5	Epsr	Степень сжатия геометрическая	F5.1
6	Epsd	Степень сжатия действительная	F5.1
7	Lam	Отношение радиуса кривошипа к длине шатуна	F5.3
8	Ex	Дезаксаж КШМ	F5.3
9	Pk	Давление наддува, [бар]	F7.2
10	Tk	Температура надувочного воздуха, [К]	F7.1
11	N	Скорость вращения коленчатого вала, [1/мин]	I7
12	Pr	Давление в выпускном коллекторе, [бар]	F7.2
13	Tr	Температура в выпускном коллекторе, [К]	F7.1
14	Vh	Полный рабочий объем цилиндров двигателя, [дм ³]	F7.3
15	Gt	Расход топлива на один цилиндр двигателя, [кг/ч]	F7.2
16	Dros	Доля открытия дроссельной заслонки	F7.2
17	Cm	Средняя скорость поршня, [м/с]	F7.2
18	dTk	Подогрев заряда на впуске, [К]	F7.2
19	Cu/Cm	Относительная закрутка заряда на впуске	F7.3
При KPR=0 (параметр записи файла протокола 0 – минимальный) поз. с 20 по 113 в файл протокола не выводятся (т.е. присутствуют только при KPR=1 и более)			

105
RU.02068574.02018-02 31

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
Средние температуры стенок камеры сгорания, [K]:			
20	Tr	- поршня	F7.1
21	Tg	- гильзы	F7.1
22	Tk	- крышки	F7.1
Если NDTV=1: Параметры тепловыделения по И.И. Вибе			
23	Fiz	Условная продолжительность сгорания, [° п.к.в.]	F6.1
24	M	Показатель характера сгорания	F5.2
25	Fnc	Угол начала видимого сгорания, [° п.к.в.]	F7.1
26	Xmax	Максимальная доля выгоревшего топлива	F7.3
Если NDTV=2: Параметры тепловыделения по Пугачеву			
27	X1	Доля выгорания топлива в кинетической фазе сгорания	F6.3
28	X2	Доля выгорания топлива в диффузионной фазе сгорания	F6.3
29	FI1	Угол достижения максимума скорости тепловыделения в кинетической фазе, [° п.к.в.]	F6.1
30	FI2	Угол достижения максимума скорости тепловыделения в диффузионной фазе, [° п.к.в.]	F6.1
31	K1	Параметр жесткости сгорания в кинетической фазе	F6.2
32	K2	Параметр жесткости сгорания в диффузионной фазе	F6.2
33	FHC	Угол начала видимого сгорания, [° п.к.в.]	F7.1
Если NDTV=3: Параметры пристеночного выгорания топлива			
34	X1	Доля выгорания топлива в кинетической фазе сгорания	F7.3
35	X2	Доля выгорания топлива в диффузионной фазе сгорания	F7.3

106
RU.02068574.02018-02 31

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
36	X3	Доля выгорания топлива в пристеночной фазе сгорания	F7.3
37	FI1	Угол достижения максимума скорости тепловыделения в кинетической фазе, [° п.к.в.]	F6.1
38	FI2	Угол достижения максимума скорости тепловыделения в диффузионной фазе, [° п.к.в.]	F6.1
39	FI3	Угол достижения максимума скорости тепло-выделения в пристеночной фазе, [° п.к.в.]	F6.1
40	K1	Параметр жесткости сгорания в кинетической фазе	F7.2
41	K2	Параметр жесткости сгорания в диффузионной фазе	F7.2
42	K3	Параметр жесткости сгорания в пристеночной фазе	F7.2
43	FHC	Угол начала видимого сгорания, [° п.к.в.]	F7.1
44	FHC2	Угол начала сгорания в пристеночной фазе, [° п.к.в.]	F7.1
	Если NDTV=4: Параметры тепловыделения по Пугачеву и Если NDTV=5		
45	FHC2	Угол начала подачи топлива (F _{нвпр}), [° п.к.в.]	F7.1
46	FVG	Продолжительность впрыска топлива (F _{впр}), [° п.к.в.]	F7.1
47	DIKAM	Эквивалентный диаметр камеры сгорания, [м] – диаметр профилированной части огневой поверхности поршня	F8.3
48	X1	Доля выгорания топлива в кинетической фазе сгорания	F6.3
49	X2	Доля выгорания топлива в диффузионной фазе сгорания	F6.3

107
RU.02068574.02018-02 31

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
50	FI1	Угол достижения максимума скорости тепловыделения в кинетической фазе, [° п.к.в.]	F6.1
51	FI2	Угол достижения максимума скорости тепловыделения в диффузионной фазе, [° п.к.в.]	F6.1
52	K1	Параметр жесткости сгорания в кинетической фазе	F6.2
53	K2	Параметр жесткости сгорания в диффузионной фазе	F6.2
54	FHC	Угол начала видимого сгорания (FHC), [° п.к.в.]	F7.2
55	FHC2	Угол задержки самовоспламенения, [° п.к.в.]	F7.2
56	TAUS	То же, выраженное в [мс]	F5.3
Параметры предварительной фазы впрыска топлива, если NPF=2			
57	FIPF	Угол начала подачи топлива, [° п.к.в.]	F7.1
58	FINGPF	Угол начала сгорания, [° п.к.в.]	F7.1
59	FIZVPF	Угол задержки самовоспламенения пилотной фазы, [° п.к.в.]	F10.2
60	FIP	Угол достижения максимума скорости сгорания, [° п.к.в.]	F10.2
61	VPF	Объем предварительной подачи, [мм ³]	F7.2
62	GTPF	Для от цикловой подачи, %	F7.2
Фазы газораспределения:			
63	FOVIP	Угол открытия выпуска, [° п.к.в.]	F5.1
64	FZVIP	Угол закрытия выпуска, [° п.к.в.]	F5.1
65	FOVP	Угол открытия впуска, [° п.к.в.]	F5.1
66	FZVP	Угол закрытия впуска, [° п.к.в.]	F5.1
Максимальные условные площади проходных сечений органов газораспределения:			

108
RU.02068574.02018-02 31

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
67	FMM1	Для выпускных органов, [см ²]	F8.2
68	FMM2	Для впускных органов, [см ²]	F8.2
Параметры идеального рабочего цикла, приближенного к реальному			
69	PRESS	Условное давление конца сжатия P _c , [бар]	F18.1
70	PB	Давление в цилиндре к концу расширения P _b , [бар]	F10.2
71	SN1	Усредненный показатель политропы сжатия	F12.3
72	SN2	Усредненный показатель политропы расширения	F8.3
73	SLMD	Степень повышения давления	F25.3
74	SRO	Степень предварительного расширения	F16.3
75	BELTA	Степень последующего расширения	F20.3
76	FISKR	Коэффициент полноты идеальной диаграммы	F12.3
77	TOGS	Средняя температура газов за период выпуска	F8.1
78	TOGP	Температура ОГ в выпускном патрубке, [K]	F8.1
Параметры перетечек рабочего тела в картер			
79	FEKV	Эквивалентная условная площадь перетечек, [мм ²]	F11.5
80	DPZ	Массовая доля потери рабочего тела из КС, %	F11.3
81	PKG	Давление картерных газов, [бар]	F6.3
82	TKG	Температура картерных газов, [K]	F6.3
Если KDV≠4 (газовый), параметры топлива:			
83	C,H,OT	Элементарный состав топлива C/H/O (доли от 1):	3F4.3
84	ST,ANT,H2OT	Примеси к топливу Сера/Азот/Вода, %	3F4.3
85	SL00	Стехиометрическое соотношение, [кг возд./кг. топл.]	F8.3

109
RU.02068574.02018-02 31

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
86	OCHI	Октановое число, исследовательский м-д	F6.1
87	CSHM	Цетановое число	F6.1
88	ROT	Плотность топлива, [кг/м ³]	F7.3
89	ROVV	Плотность воздуха на впуске, [кг/м ³]	F7.3
	Если KDV=4 (газовый), параметры комбинированного топлива:		
90	QH	Низшая теплотворная способность, [МДж/кг], рассчитывается в соответствии с массовыми долями жидкого и газового топлива. Если подается только один вид топлива, то соответствует используемому.	F5.1
91	L0	Стехиометрическое соотношение, [кг возд./кг. топл.]	F6.2
92	C	Массовая доля углерода в топливе	F5.3
93	H	Массовая доля водорода в топливе	F5.3
94	O	Массовая доля кислорода в топливе	F5.3
95	GTTP	Расход жидкого топлива, [кг/ч]	F7.2
96	G_G2	Расход газового топлива, [кг/ч]	F7.2
97	FH21	Начало подачи газа (по углу п.к.в.)	F6.1
98	FH22	Окончание подачи газа (по углу п.к.в.)	F6.1
99	DG_G2	Доля замены жидкого топлива газом	F10.3
100	RG2	Объемная доля газа в поступающей смеси	F10.3
101	ALG20	Коэффициент избытка воздуха по газу	F10.3
	Параметры, характеризующие наличие системы рециркуляции ОГ (EGR) в случае, если доля рециркуляции EGR≠0		
102	EGR	Объемная доля рециркуляции ОГ, %	F6.1
103	DO2	Объемная доля кислорода в воздухе	F5.3
104	DN2	Объемная доля азота в воздухе	F5.3
105	SMUVOZ	Молярная масса воздуха кг/кмоль	F7.3
106	SL0	Стехиометрическое число с EGR	F8.3
107	DO2R	Объемная доля кислорода в окислителе	F5.3
108	DN2R	Объемная доля азота в окислителе	F5.3
109	SMUZRD	Молярная масса окислителя кг/кмоль	F7.3

110
RU.02068574.02018-02 31

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
Параметры топлива и топливовоздушной смеси			
110	QT	Низшая теплотворность топлива при Alfa=1, [МДж/кг]	F8.2
111	QTT	Истинная теплотворность топлива при Alfa=1, [МДж/кг]	F8.2
112	QTS1	Низшая теплотворность смеси при Alfa=1, [КДж/кг]	F8.1
113	QTSM	Истинная теплотворность смеси при Alfa=1, [КДж/кг]	F8.1
ИНДИКАТОРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЦИКЛА			
114	SMI, SMLS	Мощность (одного цилиндра), [кВт], [л.с.]	F9.2, F9.2
115	GI, GILS	Удельный расход топлива, [г/кВт·ч], [г/л.с.·ч]	F9.2, F9.2
116	ALFA	Действительный коэффициент избытка воздуха	F8.3
117	Y(20)	Действительный расход воздуха на цилиндр, [кг/ч]	F10.2
118	ETA1	Индикаторный КПД	F7.3
119	SPI	Индикаторное давление (среднее), [бар]	F11.2
120	SMOM, SMOK	Инд. момент с цилиндра, [Н·м], [кг·м]	F9.2, F9.2
Максимальные значения по циклу:			
121	((PRZ(I,J), I=1,2), J=1	Максимальное давление сгорания, [бар], при угле поворота к/вала, [° п.к.в.]	F8.2, F7.1
122	((PRZ(I,J), I=1,2), J=2	Максимальная температура цикла, [К], при угле поворота к/вала, [° п.к.в.]	F8.1, F7.1
123	((PRZ(I,J), I=1,2), J=3	Максимальная жесткость процесса (скорость нарастания давления), [бар/° п.к.в.], при угле поворота к/вала, [° п.к.в.]	F8.3, F7.1
Параметры теплообмена в цилиндре и газоздушных каналах			
124	TSR	Среднецикловая температура в КС, [К]	F7.2

111
RU.02068574.02018-02 31

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
125	TREZ, ALS	Камера сгорания: показатели интенсивности теплообмена: результирующая температура, [К]; средний за цикл коэффициент теплоотдачи, [Вт/м ² ·К]	2F7.2
126	ALL, DALL	Коэффициент теплоотдачи лучистого теплообмена, [Вт/ м ² ·К], лучистая составляющая (в процентном отношении от общей величины потерь тепла в стенки), %;	F7.2, F7.1
127	ALRS, TRR	ВЫПУСК: показатели интенсивности теплообмена: средний за цикл коэффициент теплоотдачи, [Вт/м ² ·К], результирующая температура, [К]	2F10.2
128	ALRS, TRR	ВПУСК: показатели интенсивности теплообмена: средний за цикл коэффициент теплоотдачи, [Вт/м ² ·К], результирующая температура, [К]	2F10.2
Параметры газообмена			
129	GAMR	Коэффициент остаточных газов	F8.3
130	PROC	Заброс отработанных газов во впускную систему, %	F7.2
131	ETAV	Коэффициент наполнения	F8.3
132	ETAP	Коэффициент продувки	F8.3
133	SMN, SMNK	Мощность насосных ходов (период от открытия от открытия выпускного клапана до закрытия впускного), [кВт], [л.с.]	F7.3, F7.2
ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ (выводятся в протокол, если количество цилиндров в двигателе ICIL задано не нулевым)			
134	ICIL	Количество цилиндров (в двигателе)	I11
135	ETAM	Механический КПД (двигателя на режиме)	F10.3
136	SME, SMELS	Мощность цилиндровая, [кВт], [л.с.]	F11.2, F13.2

112
RU.02068574.02018-02 31

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
137	SMED, SMLS	Мощность двигателя, [кВт], [л.с.]	F11.2, F13.2
138	ENMEX, ENMEXLS	Мощность механических потерь (в двигателе), [кВт], [л.с.]	F11.2, F13.2
139	GE, GELS	Удельный расход топлива, [г/кВт·ч], [г/л.с.·ч]	F8.2, F9.2
140	ASUM	Суммарный коэффициент избытка воздуха	F13.3
141	GVD, GVV	Расход воздуха (на двигатель), [кг/ч], [м ³ /ч] по параметрам воздуха на впуске	2F17.2
142	GTD, GTV, GTDCH, GTDG2	Расход топлива (на двигатель), [кг/ч], [л/ч]. Расход топлива по составляющим – жидкое (Liq) и газовое (Gas), [кг/ч]	2F17.2, F6.1, F6.1
143	ETAЕ	Эффективный КПД	F7.3
144	SPE	Эффективное давление (среднее), [бар]	F12.2
145	SMME, SMKE	Крутящий момент, [Н·м], [кг·м]	F16.2, F13.2
Параметры, записываемые в протокол при KPR=2 и более			
Тепловой баланс рабочего цикла			
146	QRSP, PQRS	Располагаемая энергия рабочего цикла Q_r , Дж; то же в % от Q_r	F10.1, F8.2
147	QALF, PQAL	Потери энергии при недогорании при $\alpha < 1$, то же в % от Q_r	F10.1, F8.2
148	QNDG, PQND	Потери энергии при недогорании в пристеночной зоне, несовершенства смесеобразования и пр., то же в % от Q_r	F10.1, F8.2
149	QPOD, PQPD, PQPP	Подведенная в цикле энергия Q_p , Дж; то же в % от Q_r , то же в % от Q_p	F10.1, 2F8.2
150	ARAB, PARB, PQPA	Часть энергии, переведенная в механическую работу на поршне; то же в % от Q_r , то же в % от Q_p	F10.1, 2F8.2
151	QWCT, PQWC, PQPW	Потери тепла в стенки камеры сгорания; то же в % от Q_r , то же в % от Q_p	F10.1, 2F8.2

113
RU.02068574.02018-02 31

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
152	QWRK, PQWR, PQRK	Потери тепла в стенки выпускных ГВК; то же в % от $Q_{г}$, то же в % от $Q_{п}$	F10.1, 2F8.2
153	QNPL, PQNP, PQPN	Потери вследствие неплотности КС; то же в % от $Q_{г}$, то же в % от $Q_{п}$	F10.1, 2F8.2
154	QOTG, PQOG, PQPO	Вынос тепла с отработавшими газами; то же в % от $Q_{г}$, то же в % от $Q_{п}$	F10.1, 2F8.2
155	QPRC, PQPR, PQRR	Часть энергии, переведенная в механическую работу на валу двигателя; то же в % от $Q_{г}$, то же в % от $Q_{п}$	F10.1, 2F8.2
156	QMPT, PQMP, PQPM	Потери трения в механической части двигателя; то же в % от $Q_{г}$, то же в % от $Q_{п}$	F10.1, 2F8.2
Параметры, записываемые в протокол при $KPR=3$ и более			
ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОГ И ВРЕДНЫЕ ВЫБРОСЫ			
157	NNPS(I), MPS(I), BPS(I), MPS(I), I=1,8	Таблица состава чистых продуктов сгорания (ЧПС), отходящих в систему выпуска двигателя по компонентам: азот, кислород, вода, диоксид углерода, водород, угарный газ (монооксид углерода), диоксид серы и всего по ЧПС: наименование компонента, объем продуктов сгорания (ПС), [кмоль/кг топлива], объемная доля компонентов ОГ, %, массовая доля компонентов ОГ, %.	A12, F13.7, 2F16.5
158	NNPS(I), SMPS(I), OBPS(I), DMPS(I), I=1,8	Таблица состава ОГ на выхлопе с учетом продувки (указан коэффициент продувки) по компонентам: азот, кислород, вода, диоксид углерода, водород, угарный газ (монооксид углерода), диоксид серы и всего в ОГ: наименование компонента, объем ПС, [кмоль/кг топлива], объемная доля компонентов ОГ, %, массовая доля компонентов ОГ, %.	A12, F13.7, 2F16.5

114
RU.02068574.02018-02 31

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
159	GOG, VOG; NNPS(I), OBPS(I), DMPS(I), SMPS(I), I=1,5	Выход токсичных компонентов ОГ на режиме: - массовый расход ОГ, [кг/ч], объемный расход ОГ, [м ³ /ч] при нормальных условиях; - таблица выхода токсичных компонентов: вода, диоксид углерода, угарный газ, диоксид серы, несгоревшие углеводороды: наименование компонента, объем выбросов, [м ³ /ч] при нормальных условиях, масса выбросов, [кг/ч], удельные выбросы, [кг/кВт·ч].	2F15.2 A12, E13.5, 2E16.5
160	PO ₂ , PCO ₂ , PCO, PSO ₂ , PCHX, SMUCHX	Показания газоанализатора (условные) – «сырая» токсичность в осушенных ОГ по компонентам: кислород, диоксид углерода, угарный газ, диоксид серы, углеводороды и их средняя молярная масса: наименование компонента, численное значение, либо в % об., либо в ppm (partical per million или чнм – частиц на миллион).	F11.2 F11.0
Параметры, записываемые в протокол при KPR=4 и более (таблицы изменяющихся параметров)			
ИНДИКАТОРНАЯ ДИАГРАММА			
161	FV(I), PV(I), TV(I), XV(I), DXV(I), ALFKC(I), SM(I), I=1,K	Таблица значений параметров по углу п.к.в.: угол поворота вала, давление в цилиндре, [бар], температура, [К], доля выгоревшего топлива, скорость тепловыделения, средний мгновенный коэффициент теплоотдачи, [Вт/м ² ·К], масса рабочего тела, [г]	F10.1, F8.2, F9.1, F7.3, F9.5, F9.1, E13.5
END OF DATA – конец протокола расчета			

115
RU.02068574.02018-02 31

Таблица 4. Выходные данные, находящиеся в передаточном файле Ind***.dat

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
1	TEXT	Текстовая информация о двигателе	A, 40 поз.
2	VAR	Номер варианта расчета	A, 3 поз.
3	S, D, EPS, LAM, EXD, ICIL	Ход поршня, [м], диаметр цилиндра, [м], геометрическая степень сжатия, постоянная КШМ (отношение радиуса кривошипа к длине шатуна), дезаксаж КШМ, [м], количество цилиндров в двигателе	5F9.3
4	N, GTP, ALFA, MT, KLU, KDV	Частота вращения коленчатого вала, [об/мин], часовой расход топлива на режиме в расчете на один цилиндр двигателя, [кг/час], коэффициент избытка воздуха в рабочей смеси, коэффициент тактности, параметр учета лучистой составляющей теплового потока: 1 – дизель, будет учтена, 2 – другие типы ДВС, не учитывается; тип двигателя	I9, 2F9.3, 3I9
5	QT, SMT, C, H, OT, ST, ANT, H2OT	Низшая теплотворная способность топлива, [МДж/кг], молярная масса топлива, [кг/кмоль], массовая доля углерода в топливе по элементарному составу, массовая доля водорода в топливе по элементарному составу, массовая доля кислорода в топливе по элементарному составу; примеси: сера, азот, вода, %	2F9.2, 6F9.3
6	K, FZV, KX, FHC, SMI, ETAP, GAMR, ETAM	Количество точек в таблицах (массивах) давления, температуры и коэффициента конвективной теплоотдачи в цилиндре, угол закрытия впускного канала (этому углу п.к.в. соответствуют первые компоненты массивов, записываемых в данный файл), количество точек в массивах доли интегральной и дифференциальной характеристик тепловыделения, индикатор-	I9, F9.1, I9, 2F9.2, 3F9.4

116
RU.02068574.02018-02 31

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
		ная мощность одного цилиндра на режиме, [кВт], коэффициент продувки, коэффициент остаточных газов, мех. КПД.	
7	PV(I), I=1,K	Таблица давлений по углу п.к.в., [бар]	8F9.3
8	TV(I), I=1,K	Таблица температур по углу п.к.в., [К]	8F9.2
9	XV(I), I=1,KX	Таблица интегральной характеристики тепловыделения по углу п.к.в.	8F9.6
10	DXV(I), I=1,KX	Таблица дифференциальной характеристики тепловыделения по углу п.к.в.	8F9.7
11	ALFKN(I), I=1,K	Таблица среднего по площади КС коэффициента конвективной теплоотдачи, [Вт/м ² ·К]	8F9.2
12	PKG	Давление картерных газов, [бар]	F9.3

Таблица 5. Выходные данные, находящиеся в передаточном файле Rbh***.dat

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
1	Fi, P, T, X, dX/dFi, Alfa, Alu	Угол поворота коленчатого вала, [° п.к.в.], давление в камере сгорания, [бар], температура в камере сгорания, [К], интегральная характеристика тепловыделения (доля выгоревшего топлива), дифференциальная характеристика тепловыделения, средний по площади мгновенный коэффициент теплоотдачи в камере сгорания, [Вт/м ² ·К], средний по площади мгновенный коэффициент лучистого теплообмена в камере сгорания, [Вт/м ² ·К]	7F8.2
2	Kfi, Kp, Kt, Kx, Kdx, Kalfa, Kalu	Масштабные коэффициенты, на которые следует умножить соответствующие параметры, чтобы получить их истинную размерность	3I3, F8.2, F8.4, 2I6

Таблица 6. Выходные данные, находящиеся в передаточном файле Gzo***.dat

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
1	Fi, P, T, M, FmVIP, FmVP, Alfa	Угол поворота коленчатого вала, [° п.к.в.], давление в цилиндре, [бар], температура в цилиндре, [K], текущая масса рабочего тела в цилиндре, [кг], условная площадь проходного сечения выпускных органов, [м ²], условная площадь проходного сечения впускных органов, [м ²], средний по площади мгновенный коэффициент теплоотдачи в цилиндре, [Вт/м ² ·K]	7F8.2
2	Kfi, Kp, Kt, Km, Kfmvip, Kfmvp, Kalfa	Масштабные коэффициенты, на которые следует умножить соответствующие параметры, чтобы получить их истинную размерность	3I3, 3F8.6, I3

Таблица 7. Выходные данные, находящиеся в передаточном файле Ptf***.dat

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
1	Fi, P, T, M, Alfa	Угол поворота коленчатого вала, [° п.к.в.], давление в камере сгорания, [бар], температура в камере сгорания, [K], текущая масса рабочего тела в цилиндре, [кг], средний по площади мгновенный коэффициент теплоотдачи в камере сгорания, [Вт/м ² ·K]	F8.1, 4E10.4
2	Kfi, Kp, Kt, Km, Kalfa	Масштабные коэффициенты, на которые следует умножить соответствующие параметры, чтобы получить их истинную размерность	5I8

118
RU.02068574.02018-02 31

Таблица 8. Выходные данные, находящиеся в передаточном файле Ptv***.dat

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
1	Vol, Pi, Pr, T	Текущий объем цилиндра, [дм ³], действительное давление в цилиндре, [бар], давление в цилиндре, рассчитанное по эквивалентному «идеальному» циклу, [бар], температура в цилиндре	4E10.4
2	Kvol, Kpi, Kpr, Kt	Масштабные коэффициенты, на которые следует умножить соответствующие параметры, чтобы получить их истинную размерность	4I10

Таблица 9. Выходные данные, находящиеся в передаточном файле Dgc***.dat
(записывается в случае задания тепловыделения NDTV=5)

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
1	Fi, Integral char., Diff. char. (FGC, GC, DGC)	Угол поворота коленчатого вала, [° п.к.в.], интегральная характеристика подачи топлива, дифференциальная характеристика подачи топлива	F7.2, 2E15.5
2	Kfgc, Kgc, Kdgc	Масштабные коэффициенты, на которые следует умножить соответствующие параметры, чтобы получить их истинную размерность	I5, I15, F15.1

5.2.2. Выходные данные расчета выбросов оксидов азота

Выходными данными программного комплекса расчета выбросов оксидов азота является следующая информация.

Выходными данными программы-препроцессора «NOx2018.exe» являются:

- временный файл исходных данных «TmpNox.dat» для «быстрой» передачи данных в программу-солвер «NOx_2018.exe», содержащий две строки с путями (при запуске программы-солвера в запросе файла исходных данных следует вводить «0»):
 - на считывание файла исходных данных типа Ind***.dat (структура файла, описание и кодирование переменных приведено в таблице 4);
 - на выгрузку файлов расчетных и графических данных.

При автономном запуске программы-солвера данные считываются из пронумерованных файлов типа Ind***.dat, файл TmpNox.dat не нужен.

Выходными данными программы «NOx_2018.exe» являются:

- файл протокола расчета Nox***.txt, где “***” – номер варианта, заданный в файле исходных данных Ind***.dat;
- файл eNO***.dat, предназначенный для передачи информации в графический постпроцессор.

Пример файла протокола расчета Nox***.txt приведен на рисунке 73, пример передаточного файла данных eNO***.dat приведен на рисунке 74.

КамАЗ-7403. Номинальная мощность. 4 ДТВ

*** Вариант 001 ***

Расчет процесса образования оксидов азота в цилиндре двигателя

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

D= .120, S= .120 [м];	Lamda= .2670	Степень сжатия = 16.00
Ne= 222.1 [кВт]	Ицил = 8 Такт= 4.	N= 2200.0 [1/мин]
Gt= 6.50 [кг/ч]	Gc= .9848E-04 [кг]	Gr= .0234 Prod= 1.003
Fi нач.стоп.= -4.25	Pa= .2165 [МПа]	Ta= 394.2 [K] Fia= -145.0
Alfa ст.= 1.794	Alfa сум.= 1.800	CNOx0= 2000.0 [мг/м.куб.]
Fi нач.табл.= -10.0	DfiT шаг табл.= 5.00	Шаг печати = 5.0 JT= 23
C= .870 H= .126	O= .004 N= .00015	Qh= 42500.0 Mu= 190.0

120
RU.02068574.02018-02 31

FI	P	T	X	FI	P	T	X
-10.00	7.45	1026.35	.0000	-5.00	8.49	1058.77	.0015
.00	10.03	2191.62	.0705	5.00	11.33	2305.53	.1901
10.00	11.04	2277.41	.2836	15.00	10.15	2227.12	.3873
20.00	9.00	2169.46	.4980	25.00	7.80	2108.96	.6046
30.00	6.66	2060.01	.6988	35.00	5.64	1989.80	.7760
40.00	4.75	1918.88	.8349	45.00	4.01	1848.26	.8771
50.00	3.39	1779.29	.9054	55.00	2.89	1712.90	.9233
60.00	2.48	1650.20	.9340	65.00	2.14	1591.72	.9400
70.00	1.87	1537.95	.9432	75.00	1.65	1488.87	.9448
80.00	1.47	1444.41	.9455	85.00	1.32	1404.31	.9459
90.00	1.20	1368.15	.9460	95.00	1.09	1335.75	.9461

M0= .4946 [кмоль/кг] L0= 14.32 [кг/кг] Va= .1355E-02 [м.куб]
MA= PA*VA/(R*TA) = .2593E-02 [кг/цикл] Алд=MA/(L0*QC)= 1.796

РУЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Идентификация результатов расчета:

FI- угол поворота коленчатого вала, град. п.к.в.
RNOравн- равновесная концентрация NO в зоне ПС, об. доля
RNO- текущая объемная концентрация NO в зоне ПС, об. доля
DRNO- скорость изменения концентрации NO в зоне ПС, об. доля/град. п.к.в.
RNOCR- средняя объемная концентрация NO в цилиндре, об. доля
RNOOB- средняя массовая концентрация NO в цилиндре, г/м.куб.
GNO1- относительная масса NO, г NO/кг топлива
GNO- массовое содержание NO в цилиндре, мг/цикл

Данные во второй строке для процесса образования NO с учетом азота топлива

FI	RNOравн	RNO	DRNO	RNOCR	RNOOB	GNO1	GNO	IHFL
-5.00	.2233E-02	.0000E+00	.1742E-07	.2222E-04	.644	.613	.06	0
	.2233E-02	.0000E+00	.1742E-07	.2222E-04	.644	.613	.06	
.00	.2233E-02	.1338E-04	.2867E-05	.2163E-04	.650	.598	.06	-3
	.2233E-02	.1818E-04	.2095E-05	.2197E-04	.661	.607	.06	
5.00	.7766E-02	.2626E-03	.5399E-04	.6803E-04	1.982	1.886	.19	-3
	.7766E-02	.2673E-03	.5317E-04	.6894E-04	2.008	1.911	.19	
10.00	.9875E-02	.6898E-03	.6232E-04	.2114E-03	5.591	5.877	.58	-3
	.9875E-02	.6973E-03	.6316E-04	.2135E-03	5.648	5.937	.58	
15.00	.9329E-02	.8459E-03	.1564E-04	.3400E-03	7.803	9.482	.93	-3
	.9328E-02	.8563E-03	.1649E-04	.3440E-03	7.895	9.593	.94	
20.00	.1000E-11	.6960E-03	-.2442E-04	.3553E-03	6.889	9.934	.98	-3
	.1000E-11	.7065E-03	-.2439E-04	.3605E-03	6.990	10.080	.99	
25.00	.7388E-02	.6557E-03	-.8772E-05	.4014E-03	6.513	11.262	1.11	-3
	.7388E-02	.6669E-03	-.8597E-05	.4081E-03	6.622	11.450	1.13	
30.00	.6411E-02	.6043E-03	-.1046E-04	.4238E-03	5.752	11.922	1.17	-3
	.6411E-02	.6156E-03	-.1040E-04	.4316E-03	5.858	12.143	1.20	
35.00	.5678E-02	.5566E-03	-.7994E-05	.4306E-03	4.917	12.142	1.20	-3

121
RU.02068574.02018-02 31

	.5678E-02	.5680E-03	-.7967E-05	.4394E-03	5.018	12.389	1.22	
40.00	.4720E-02	.5218E-03	-.5617E-05	.4324E-03	4.191	12.211	1.20	-3
	.4720E-02	.5333E-03	-.5610E-05	.4418E-03	4.282	12.477	1.23	
45.00	.3859E-02	.4986E-03	-.3671E-05	.4326E-03	3.596	12.230	1.20	-3
	.3859E-02	.5101E-03	-.3669E-05	.4425E-03	3.678	12.510	1.23	
50.00	.3108E-02	.4839E-03	-.2278E-05	.4324E-03	3.117	12.234	1.20	-3
	.3108E-02	.4954E-03	-.2278E-05	.4426E-03	3.190	12.524	1.23	
55.00	.2474E-02	.4749E-03	-.1347E-05	.4322E-03	2.730	12.236	1.21	-3
	.2474E-02	.4864E-03	-.1348E-05	.4426E-03	2.796	12.530	1.23	
60.00	.2233E-02	.4698E-03	-.7594E-06	.4321E-03	2.417	12.236	1.21	-3
	.2233E-02	.4813E-03	-.7596E-06	.4427E-03	2.476	12.534	1.23	
65.00	.2233E-02	.4670E-03	-.4067E-06	.4321E-03	2.161	12.237	1.21	-3
	.2233E-02	.4785E-03	-.4068E-06	.4427E-03	2.214	12.537	1.23	
70.00	.2233E-02	.4655E-03	-.2059E-06	.4321E-03	1.949	12.238	1.21	-3
	.2233E-02	.4770E-03	-.2059E-06	.4427E-03	1.997	12.539	1.23	
75.00	.2233E-02	.4647E-03	-.9771E-07	.4321E-03	1.774	12.239	1.21	-3
	.2233E-02	.4762E-03	-.9776E-07	.4427E-03	1.818	12.540	1.24	
80.00	.2233E-02	.4644E-03	-.4268E-07	.4321E-03	1.627	12.239	1.21	-3
	.2233E-02	.4759E-03	-.4271E-07	.4427E-03	1.668	12.541	1.24	
85.00	.2233E-02	.4643E-03	-.1640E-07	.4321E-03	1.504	12.240	1.21	-3
	.2233E-02	.4758E-03	-.1642E-07	.4428E-03	1.541	12.542	1.24	
90.00	.2233E-02	.4642E-03	-.4418E-08	.4321E-03	1.400	12.240	1.21	-3
	.2233E-02	.4757E-03	-.4434E-08	.4428E-03	1.434	12.542	1.24	
95.00	.2233E-02	.4642E-03	.2221E-08	.4321E-03	1.311	12.241	1.21	-3
	.2233E-02	.4757E-03	.2208E-08	.4428E-03	1.343	12.543	1.24	
100.00	.2233E-02	.4642E-03	.3598E-08	.4322E-03	1.235	12.242	1.21	-3
	.2233E-02	.4757E-03	.3586E-08	.4428E-03	1.265	12.544	1.24	

Число делений пополам (+) или удвоений (-) нач. шага интегрирования: INFL= -3

Технико-гигиенические характеристики двигателя

Концентрация NOX во влажных продуктах сгорания 629.4 ppm

- Концентрация оксидов азота на выхлопе, % объемн. RNO= .06294
в пересчете на NO2 и N2O5: RNOX= .06295, RN2O5= .03149
то же в мг/норм.м.куб. CNO= 843.4 в пересчете на NO2 и N2O5
CNOX= 1290.5 CN2O5= 1518.0

Концентрация NOX в сухих продуктах сгорания 674.9 ppm

- Концентрация оксидов азота на выхлопе, % объемн. RNO= .06749
в пересчете на NO2 и N2O5: RNOX= .06751, RN2O5= .03377
то же в мг/норм.м.куб. CNO= 904.4 в пересчете на NO2 и N2O5
CNOX= 1383.9 CN2O5= 1627.8
- Выделение NO, [г/час] ENO= 960.5
в пересчете на NO2 ENOX= 1472.5
- Выделение NO, [мг/(цикл*цилиндр)] GNO= 1.82
- Удельное выделение, [г/(кВт.ч)] EUNO= 4.33 EUNOX= 6.63
- Относит. выделение, [г/(кг топлива)] E1NO= 18.5 E1NOX= 28.3
- Нормообъем, [м.куб/ч] VNO= .217E+05
- Удельный нормообъем [м.куб/(кВт.ч)] UVNO= .979E+02

122
RU.02068574.02018-02 31

8. Индекс концентрации NO, ИКР= .281E+02
 9. Удельное выделение NO, приведенное к CO, [г/(кВт.ч)] QE= 2.88
 10. Часовые выделения отработавших газов:
 (влажные ПС) - WOG= .1111E+04 [н.м.куб] GOG= .1436E+04 [кг]
 (сухие ПС) - WOG= .1037E+04 [н.м.куб] GOG= .1376E+04 [кг].

С учетом топливных оксидов

Технико-гигиенические характеристики двигателя

Концентрация NO во влажных продуктах сгорания 640.3 ppm

1. Концентрация оксидов азота на выхлопе, % объемн. RNO= .06403
 в пересчете на NO2 и N2O5: RNOX= .06404, RN2O5= .03203
 то же в мг/норм.м.куб. CNO= 858.0 в пересчете на NO2 и N2O5
 CNOX= 1312.9 CN2O5= 1544.3

Концентрация NO в сухих продуктах сгорания 686.6 ppm

1. Концентрация оксидов азота на выхлопе, % объемн. RNO= .06866
 в пересчете на NO2 и N2O5: RNOX= .06868, RN2O5= .03435
 то же в мг/норм.м.куб. CNO= 920.1 в пересчете на NO2 и N2O5
 CNOX= 1407.9 CN2O5= 1656.1

2. Выделение NO, [г/час] ENO= 953.6
 в пересчете на NO2 ENOX= 1461.9

3. Выделение NO, [мг/(цикл*цилиндр)] GNO= 1.81

4. Удельное выделение, [г/(кВт.ч)] EUNO= 4.29 EUNOX= 6.58

5. Относит. выделение, [г/(кг топлива)] E1NO= 18.3 E1NOX= 28.1

6. Нормообъем, [м.куб/ч] VNO= .217E+05

7. Удельный нормообъем [м.куб/(кВт.ч)] UVNO= .979E+02

8. Индекс концентрации NO, ИКР= .286E+02

9. Удельное выделение NO, приведенное к CO, [г/(кВт.ч)] QE= 2.86

10. Часовые выделения отработавших газов:
 (влажные ПС) - Wog= .1111E+04 [н.м.куб] Gog= .1436E+04 [кг]
 (сухие ПС) - Wog= .1037E+04 [н.м.куб] Gog= .1376E+04 [кг].

Конец варианта

Рисунок 73 – Пример файла протокола расчета Nox***.txt программы «NOx_2018.exe»

-5.00	.2233E-02	.0000E+00	.1742E-07	.2222E-04	.644	.613	.060
.00	.2233E-02	.1338E-04	.2867E-05	.2163E-04	.650	.598	.059
5.00	.7766E-02	.2626E-03	.5399E-04	.6803E-04	1.982	1.886	.186
10.00	.9875E-02	.6898E-03	.6232E-04	.2114E-03	5.591	5.877	.579
15.00	.9329E-02	.8459E-03	.1564E-04	.3400E-03	7.803	9.482	.934
20.00	.1000E-11	.6960E-03	-.2442E-04	.3553E-03	6.889	9.934	.978
25.00	.7388E-02	.6557E-03	-.8772E-05	.4014E-03	6.513	11.262	1.109
30.00	.6411E-02	.6043E-03	-.1046E-04	.4238E-03	5.752	11.922	1.174
35.00	.5678E-02	.5566E-03	-.7994E-05	.4306E-03	4.917	12.142	1.196

123
RU.02068574.02018-02 31

40.00	.4720E-02	.5218E-03	-.5617E-05	.4324E-03	4.191	12.211	1.203
45.00	.3859E-02	.4986E-03	-.3671E-05	.4326E-03	3.596	12.230	1.204
50.00	.3108E-02	.4839E-03	-.2278E-05	.4324E-03	3.117	12.234	1.205
55.00	.2474E-02	.4749E-03	-.1347E-05	.4322E-03	2.730	12.236	1.205
60.00	.2233E-02	.4698E-03	-.7594E-06	.4321E-03	2.417	12.236	1.205
65.00	.2233E-02	.4670E-03	-.4067E-06	.4321E-03	2.161	12.237	1.205
70.00	.2233E-02	.4655E-03	-.2059E-06	.4321E-03	1.949	12.238	1.205
75.00	.2233E-02	.4647E-03	-.9771E-07	.4321E-03	1.774	12.239	1.205
80.00	.2233E-02	.4644E-03	-.4268E-07	.4321E-03	1.627	12.239	1.205
85.00	.2233E-02	.4643E-03	-.1640E-07	.4321E-03	1.504	12.240	1.205
90.00	.2233E-02	.4642E-03	-.4418E-08	.4321E-03	1.400	12.240	1.205
95.00	.2233E-02	.4642E-03	.2221E-08	.4321E-03	1.311	12.241	1.206
100.00	.2233E-02	.4642E-03	.3598E-08	.4322E-03	1.235	12.242	1.206
Fi	RNOrv	RNO	DRNO	RNOCR	RNOOB	GNO1	GNO
"rpm	vol.part	vol.part	vol.part/"rpm	vol.part	g/m^3	gNO/kgF	mg/cykle
1	1	1	1	1	1	1	1

Рисунок 74 – Пример передаточного файла графической информации eNO***.dat

Выходные данные, находящиеся в файле протокола расчета Nox***.txt и передаточном файле eNO***.dat, их формат, описание и кодирование сведены в таблицы 10 и 11.

Таблица 10. Выходные данные, находящиеся в файле протокола расчета Nox***.txt

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
1	TEXT	Текстовая информация о двигателе	A, 40 поз.
2	VAR	Номер варианта расчета	A, 3 поз.
Заголовок протокола расчета ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ			
3	D	Диаметр цилиндра, [м]	F5.3
4	S	Ход поршня, [м]	F5.3
5	Lamda	Отношение радиуса кривошипа к длине шатуна	F6.4
6	Epsr	Степень сжатия геометрическая	F6.2
7	Ne	Эффективная мощность двигателя, [кВт]	F11.1
8	Ицил	Количество цилиндров в двигателе	I3
9	N	Скорость вращения коленчатого вала, [1/мин]	F7.1

124
RU.02068574.02018-02 31

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
10	Gt	Расход топлива на один цилиндр, [кг/ч]	F10.2
11	Gc	Цикловая подача топлива, [кг/цикл]	E10.4
12	Gr	Коэффициент остаточных газов	F7.4
13	Prod	Коэффициент продувки	F6.3
14	Fi нач.сгор.	Угол начала сгорания	F7.2
15	Pa	Давление в начале сжатия, [МПа]	F6.4
16	Ta	Температура в начале сжатия, [К]	F6.1
17	Fia	Угол закрытия впускных органов, [°п.к.в.]	F7.1
18	Alfa сг.	Коэффициент избытка воздуха при сгорании	F6.3
19	Alfa сум.	Суммарный коэффициент избытка воздуха	F6.3
20	CNOx0	Начальная концентрация NOx в ОГ, [мг/м ³]	F7.1
21	Fi нач.табл.	Угол начала таблицы, [°п.к.в.]	F6.1
22	DfiT шаг табл.	Шаг таблицы, [°п.к.в.]	F5.2
23	Шаг печати	Шаг вывода таблицы, [°п.к.в.]	F5.1
24	JT	Количество строк таблицы	I4
25	C	Массовая доля углерода в топливе	F6.3
26	H	Массовая доля водорода в топливе	F6.3
27	O	Массовая доля кислорода в топливе	F6.3
28	N	Массовая доля азота в топливе	F7.5
29	Qн	Низшая теплотворная способность топлива, [КДж/кг]	F8.1
30	Mu	Средняя молярная масса углеводородов топлива, [кмоль/кг].	F6.1
Таблица параметров рабочего процесса:			
31	FI	Угол поворота коленчатого вала, [°п.к.в.]	F10.2
32	P	Давление в цилиндре, [МПа]	F10.2
33	T	Температура рабочего тела в цилиндре, [К]	F10.2
34	X	Доля выгоревшего топлива	F10.4
35	M0	Стехиометрическое соотношение, [кмоль/кг]	F6.4
36	L0	Стехиометрическое соотношение, [кг/кг]	F5.2

125
RU.02068574.02018-02 31

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
37	Va	Объем цилиндра в начале сжатия, [м ³]	E10.4
38	Ma	Масса рабочего тела в цилиндре, [кг/цикл]	E10.4
39	Alд	Действительный коэффициент избытка воздуха в цилиндре	F5.3
РУЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА Таблица результатов расчета по углу п.к.в.			
40	FI	Угол поворота коленчатого вала, [°п.к.в.]	F7.2
41	RNOравн	Равновесная концентрация NO в зоне продуктов сгорания (ПС), об. доля	E11.4
42	RNO	Текущая объемная концентрация NO в зоне ПС, об. доля	E11.4
43	DRNO	Скорость изменения концентрации NO в зоне ПС, об. доля/[°п.к.в.]	E11.4
44	RNOCR	Средняя объемная концентрация NO в цилиндре, об. доля	E11.4
45	RNOOB	Средняя массовая концентрация NO в цилиндре, [г/м ³]	F8.3
46	GNO1	Относительная масса NO, [г NO/кг топл.]	F8.3
47	GNO	Массовое содержание NO в цилиндре, [мг/цикл]	F8.3
48	INFL	Число делений пополам (+) или удвоений (-) начального шага интегрирования	I3
Технико-гигиенические характеристики двигателя			
Характеристики выбросов NOx без учета топливных оксидов			
49	RNOPP	Концентрация NOX во влажных продуктах сгорания, [ppm] – частиц на миллион	F8.1
50	RNO, RNO2, RN205, CNO, CNO2, CN205	1. Концентрация оксидов азота на выхлопе: RNO – объемная концентрация NO в зоне ПС, об. доля; то же в пересчете на NO2 и N205: RNOX и RN205; Объемная концентрация NO в зоне ПС,	3F8.5 3F8.1

126
RU.02068574.02018-02 31

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
		[мг/норм. м ³]: CNO, то же в пересчете на NO ₂ и N ₂₀₅ : CNOX, CN ₂₀₅ .	
51	RNOPPC	Концентрация NOX в сухих продуктах сгорания, [ppm] – частиц на миллион	F8.1
52	RNO, RNO ₂ , RN ₂₀₅ , CNO, CNO ₂ , CN ₂₀₅	1. Концентрация оксидов азота на выхлопе: RNO – объемная концентрация NO в зоне ПС, об. доля; то же в пересчете на NO ₂ и N ₂₀₅ : RNOX и RN ₂₀₅ ; Объемная концентрация NO в зоне ПС, [мг/норм. м ³]: CNO, то же в пересчете на NO ₂ и N ₂₀₅ : CNOX, CN ₂₀₅ .	3F8.5 3F8.1
53	ENO, ENO ₂	2. Выделение NO, [г/час] – ENO, то же в пересчете на NO ₂ – ENOX	2F8.1
54	GNO	3. Выделение NO, [мг/(цикл-цилиндр)]	F7.2
55	EUNO, EUNO ₂	4. Удельное выделение, [г/(кВт·ч)] – EUNO, то же в пересчете на NO ₂ – EUNOX	2F7.2
56	E1NO, E1NO ₂	5. Относительное выделение, [г/(кг топл.)] – E1NO, то же в пересчете на NO ₂ – E1NOX	2F6.1
57	VNO	6. Нормообъем, [м ³ /ч] (объемный выход ОГ на двигатель при нормальных условиях)	E10.3
58	UVNO	7. Удельный нормообъем [м ³ /(кВт·ч)]	E10.3
59	UKP	8. Индекс концентрации NO, ИКР	E10.3
60	QE	9. Удельное выделение NO, приведенное к CO, [г/(кВт·ч)]	F7.2
61	WBL, GBL, WC, GC	10. Часовые выделения: (влажные ПС) – WOG [норм.м ³], GOG [кг] отработавших газов; (сухие ПС) – WOG [норм.м ³], GOG [кг].	2E10.3, 2E10.4
	Характеристики выбросов NO _x с учетом топливных оксидов (повторение позиций 49...61 для случая содержания азота в топливе более 0,0001 доли по массе)		
	Конец варианта		

127
RU.02068574.02018-02 31

Таблица 11. Выходные данные, находящиеся в передаточном файле eNO***.dat

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
1	Fi, RNOrv, RNO, DRNO, RNOCR, RNOOB, GNO1, GNO	Угол поворота коленчатого вала, [°п.к.в.]; равновесная концентрация NO в зоне продуктов сгорания (ПС), об. доля; текущая объемная концентрация NO в зоне ПС, об. доля; скорость изменения концентрации NO в зоне ПС, об. доля/[°п.к.в.]; средняя объемная концентрация NO в цилиндре, об. доля; средняя массовая концентрация NO в цилиндре, [г/м ³]; относительная масса NO, [г NO/кг топл.]; массовое содержание NO в цилиндре, [мг/цикл]	F7.2, 4E11.4, 3F8.3
2	Kfi, Krnorv, Krno, Kdrno, Krnocr, Krnoob, Kgnol, Kgno	Масштабные коэффициенты, на которые следует умножить соответствующие параметры, чтобы получить их истинную размерность	8I10

5.2.3. Выходные данные расчета результирующего сажевыделения

Выходными данными программного комплекса расчета результирующего сажевыделения является следующая информация.

Выходными данными программы-препроцессора «Sazha2018.exe» являются:

- временный файл исходных данных «TmpSaz.dat» для «быстрой» передачи данных а программу-солвер «SAZ_2018.exe». Структура этого файла идентична структуре файла входных данных типа Szi***.dat (формат, описание и кодирование переменных аналогично приведенным в таблице 2). **Исключение** составляет наличие в конце файла двух строк с путями (при запуске программы-солвера в запросе файла исходных данных следует вводить «0»):
 - на считывание файла исходных данных типа Ind***.dat (структура файла, описание и кодирование переменных приведено в таблице 4);
 - на выгрузку файлов расчетных и графических данных.

Выходными данными программы «SAZ_2018.exe» являются:

- файл протокола расчета Szh***.txt, где “***” – номер варианта, заданный в файле исходных данных Szi***.dat или TmpSaz.dat;
- файл Szg***.dat, предназначенный для передачи информации в графический постпроцессор.

Пример файла протокола расчета Szh***.txt приведен на рисунке 75, пример передаточного файла данных Szg***.dat приведен на рисунке 76.

```
КамАЗ 7403   N=2200
***  Вариант 001  ***

Расчет процесса результирующего сажевыделения в цилиндре дизеля.

-----

Исходные данные

D= .120, S= .120 [м];      LAMDA= .2670              Степень сжатия = 16.00
NE=      222.1 [кВт]      Цилл = 8   ТАКТ= 4.      N= 2200.0 [1/мин]
GT=      6.50 [кг/ч]      GC= .9848E-04 [кг]      GR= .0234      PROD= 1.003
FI нач.стор.= -4.25      PA=  2.1650 [бар]      ТА= 394.2 [К]   FIA= -145.0
ALFA обр.сажи= .500     ALFA сум.= 1.800      FIB отк.вып. кл-на= 130.0
FI нач.табл.= -10.0     DFIT шаг табл.= 5.00  Шаг печати = 5.0   IT= 28
B1=  1.500              B2= .060              B3= 1.000
DSOP= .3200 [мм]       ISOP= 4   FINT=-12.00   FIBPR= 26.00 [град.]
Парафины= .8150        Нафтены= .1660        Ароматики= .0190
C= .8700   H= .1260   O= .0040   N= .0150   QH= 42.5 [мДж/кг] Молек. вес= 190.0
```

129
RU.02068574.02018-02 31

Давление газов :

74.5498	84.9250	100.2754	113.2670	110.4402	101.4690	90.0112
77.9910	66.5816	56.3620	47.5383	40.0980	33.9302	28.8710
24.7516	21.4060	18.6899	16.4780	14.6693	13.1820	11.9509
10.9270	10.0693	9.3480	8.7378	8.2200	7.7776	7.3870

Закон выделения теплоты :

.0000	.0000	.0705	.1901	.2836	.3873	.4980
.6046	.6988	.7760	.8349	.8771	.9054	.9233
.9340	.9400	.9432	.9448	.9455	.9459	.9460
.9461	.9461	.9461	.9461	.9461	.9461	.9461

Закон подачи топлива :

.0300	.1385	.3600	.7006	.9500	1.0000	1.0000
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Относительная доля испарившегося топлива :

.0180	.0972	.2753	.5716	.8580	.9831	1.0000
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Давление топлива перед форсункой PF(I), [МПа]
[FI начала таблицы PF(I)= -12.0] Шаг табл.= 2.0

8.1549	14.2712	22.4261	32.6198	39.7553	37.7166	43.8328
53.0071	64.2202	69.3170	68.2977	58.1040	30.5810	3.0581

Результаты расчета процесса сажеобразования.

FI	P	T обр	T выг	X	NTсум [г/кг]	CMсрo [г/м3]
.00	100.27	1905.6	2358.9	.0704	.1705E-01	.1856E-01
5.00	113.24	1924.8	2377.3	.1895	.2228E+01	.2341E+01
10.00	110.45	1920.3	2372.7	.2834	.5579E+01	.5309E+01
15.00	101.52	1908.4	2362.2	.3867	.5894E+01	.4854E+01
20.00	90.03	1890.5	2345.1	.4977	.5848E+01	.4057E+01
25.00	78.07	1869.9	2325.2	.6040	.5687E+01	.3293E+01
30.00	66.59	1716.3	2100.6	.6987	.5896E+01	.2845E+01
35.00	56.41	1773.8	2201.3	.7757	.6283E+01	.2547E+01
40.00	47.58	1806.0	2262.6	.8346	.6614E+01	.2272E+01
45.00	40.13	1784.2	2240.1	.8769	.6971E+01	.2051E+01
50.00	33.94	1766.6	2223.0	.9053	.7289E+01	.1858E+01
55.00	28.97	1751.9	2209.1	.9230	.7562E+01	.1692E+01
60.00	24.83	1735.6	2192.0	.9338	.7832E+01	.1551E+01
65.00	21.42	1719.6	2174.7	.9399	.8146E+01	.1439E+01
70.00	18.74	1707.0	2161.4	.9431	.8485E+01	.1355E+01
75.00	16.55	1696.6	2150.9	.9447	.8816E+01	.1282E+01
80.00	14.69	1684.4	2137.2	.9455	.9205E+01	.1225E+01

130
RU.02068574.02018-02 31

85.00	13.20	1676.6	2129.6	.9459	.9600E+01	.1181E+01
90.00	12.01	1667.7	2119.4	.9460	.9978E+01	.1145E+01
95.00	10.95	1660.2	2111.4	.9461	.1039E+02	.1114E+01
100.00	10.10	1653.5	2103.9	.9461	.1077E+02	.1089E+01
105.00	9.36	1648.5	2099.0	.9461	.1116E+02	.1068E+01
110.00	8.75	1642.1	2091.5	.9461	.1154E+02	.1051E+01
115.00	8.22	1637.6	2086.5	.9461	.1006E+02	.8758E+00
120.00	7.78	1633.3	2081.8	.9461	.8854E+01	.7407E+00
125.00	7.78	1633.3	2081.8	.9461	.7826E+01	.6318E+00
<hr/>						
Концентрация сажи на выхлопе СВХ= .3509 [г/м3]						
Дымность отработавших газов [%] по приборам:						
Хартридж= 59.3 Бош= 47.6 ИД-1= 47.6						
По ГОСТ 17.2.2.02-86: N= 50.6 [%] K= 1.638 [1/м]						
<hr/>						
Технико-гигиенические показатели двигателя.						
А. Показатели по выбросам сажи.						
1. Относительное выделение сажи E1C, [г/кг] 7.83						
2. Массовая концентрация сажи CD, [г/м**3.] .3425						
3. Часовые выделения ЕС, [г/час] 406.9						
4. Цикловое выделение ВС, [мг/цикл] .7707						
5. Удельное выделение EUD, [г/кВт*ч] 1.83						
6. Нормообъем по ПДК.СС=.05 мг/м**3, [м**3/ч] .8139E+07						
7. Индекс концентрации по ПДК.СС, КР .6850E+04						
8. Удельный нормообъем UVH, [м**3/кВт*ч] .3665E+05						
9. Удельн. выделение приведен. к СО, [г/кВт*ч] .1100E+03						
Б. Показатели по выбросам бенз/а/пирена (БАП).						
1. Относительное выделение БАП E1B, [мкг/кг] 54.85						
2. Массовая концентрация БАП СВ, [мкг/м**3.] 2.4008						
3. Часовое выделение БАП EB, [мг/час] 2.85						
4. Цикловое выделение БАП BB, [мкг/цикл] .5402E-02						
5. Удельное выделение EUD, [мг/кВт*ч] 12.85						
6. Нормообъем по ПДК.СС=1E-6 мг/м**3, [м**3/ч] .2852E+07						
7. Индекс концентрации по ПДК.СС, КР .2401E+04						
8. Удельный нормообъем UVH, [м**3/кВт*ч] .1285E+05						
9. Удельн. выделение приведен. к СО, [г/кВт*ч] .3854E+02						

Рисунок 75 – Пример файла протокола расчета Szh***.txt программы «SAZ_2018.exe»

.0	.017	.019
5.0	2.228	2.341
10.0	5.579	5.309
15.0	5.894	4.854
20.0	5.848	4.057
25.0	5.687	3.293
30.0	5.896	2.845
35.0	6.283	2.547
40.0	6.614	2.272
45.0	6.971	2.051

131
RU.02068574.02018-02 31

50.0	7.289	1.858
55.0	7.562	1.692
60.0	7.832	1.551
65.0	8.146	1.439
70.0	8.485	1.355
75.0	8.816	1.282
80.0	9.205	1.225
85.0	9.600	1.181
90.0	9.978	1.145
95.0	10.392	1.114
100.0	10.772	1.089
105.0	11.161	1.068
110.0	11.540	1.051
115.0	10.061	.876
120.0	8.854	.741
125.0	7.826	.632
Fi	Gszh	Vszh
"rpm	g/kg	g/m^3
1	1	1

Рисунок 76 – Пример передаточного файла графической информации Szg***.dat

Выходные данные, находящиеся в файле протокола расчета Szh***.txt и передаточном файле Szg***.dat, их формат, описание и кодирование сведены в таблицы 12 и 13.

Таблица 12. Выходные данные, находящиеся в файле протокола расчета Szh***.txt

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
1	ТЕХТ	Текстовая информация о двигателе	A, 40 поз.
2	VAR	Номер варианта расчета	A, 3 поз.
Заголовок протокола расчета ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ			
3	D	Диаметр цилиндра, [м]	F5.3
4	S	Ход поршня, [м]	F5.3
5	Lamda	Отношение радиуса кривошипа к длине шатуна	F6.4
6	Epsg	Степень сжатия геометрическая	F6.2
7	Ne	Эффективная мощность двигателя, [кВт]	F11.1
8	Ицил	Количество цилиндров в двигателе	I3

132
RU.02068574.02018-02 31

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
9	N	Скорость вращения коленчатого вала, [1/мин]	F7.1
10	Gt	Расход топлива на один цилиндр, [кг/ч]	F10.2
11	GC	Цикловая подача топлива, [кг/цикл]	E10.4
12	Gr	Коэффициент остаточных газов	F7.4
13	Prod	Коэффициент продувки	F6.3
14	Fi нач.сгор.	Угол начала сгорания	F7.2
15	Pa	Давление в начале сжатия, [бар]	F6.4
16	Ta	Температура в начале сжатия, [К]	F6.1
17	Fia	Угол закрытия впускных органов, [°п.к.в.]	F7.1
18	Alfa обр.сажи	Коэффициент избытка воздуха при сгорании (в зоне образования сажи)	F6.3
19	Alfa сум.	Суммарный коэффициент избытка воздуха	F6.3
20	FIB отк.вып. кл-на	Угол открытия выпускных органов, [°п.к.в.]	F7.1
21	Fi нач.табл.	Угол начала таблицы, [°п.к.в.]	F6.1
22	DFIT шаг табл.	Шаг таблицы, [°п.к.в.]	F5.2
23	Шаг печати	Шаг вывода таблицы, [°п.к.в.]	F5.1
24	IT	Количество строк таблицы	I4
25	B1	Опытный коэффициент 1	F6.3
26	B2	Опытный коэффициент 2	E10.4
27	B3	Опытный коэффициент 3	F7.4
28	DSOP	Диаметр сопловых отверстий форсунки, [мм]	F7.4
29	ISOP	Количество сопел форсунки	I3
30	FINPT	Угол начала подачи топлива, [°п.к.в.]	F6.2
31	FIBPR	Продолжительность впрыска, [°п.к.в.]	F6.2
32	Парафины	Содержание парафиновых углеводородов в топливе, [кг/кг]	F7.4
33	Нафтены	Содержание нафтеновых углеводородов в топливе, [кг/кг]	F7.4

133
RU.02068574.02018-02 31

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
34	Ароматики	Содержание ароматических углеводородов в топливе, [кг/кг]	F7.4
35	C	Массовая доля углерода в топливе	F6.3
36	H	Массовая доля водорода в топливе	F6.3
37	O	Массовая доля кислорода в топливе	F6.3
38	N	Массовая доля азота в топливе	F7.5
39	QH	Низшая теплотворная способность топлива, [КДж/кг]	F8.1
40	Mu	Средняя молярная масса углеводородов топлива, [кмоль/кг].	F6.1
Таблицы параметров рабочего процесса			
41	PT(I), I=1,IT	Массив давлений газов, [бар]	7F10.4
42	XT(I), I=1,IT	Закон выделения теплоты (доля выгоревшего топлива)	7F10.4
43	SIT(I), I=1,IT	Закон подачи топлива (интегральная характеристика топливоподачи)	7F10.4
44	SIU(I), I=1,IT	Относительная доля испарившегося топлива	7F10.4
45	FIИТПF, DFIPF	Угол начала таблицы PF(I), Шаг таблицы	2F5.1
46	PF(I), I=1,IPF	Таблица давления топлива перед форсункой, [МПа]	7F10.4
Результаты расчета процесса сажеобразования. Таблица результатов расчета по углу п.к.в.			
47	FI	Угол поворота коленчатого вала, [°п.к.в.]	F10.2
48	P	Давление газов в цилиндре, [бар]	F10.2
49	T обр	Температура образования сажи, [К]	F10.1
50	T выг	Температура выгорания сажи, [К]	F10.1
51	X	Доля выгоревшего топлива	F10.4
52	NTсум	Относительное сажевыделение, [г/кг топл.]	E12.4
53	CMсрo	Массовая концентрация сажи в ОГ, [г/м ³]	E12.4
54	CBX	Концентрация сажи на выхлопе, [г/м ³]	F8.4

134
RU.02068574.02018-02 31

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
Дымность отработавших газов [%] по приборам:			
55	DX	Хартридж	F5.1
56	DB	Бош	F5.1
57	DID	ИД-1	F5.1
58	DGOST	ГОСТ 17.2.2.02-86	F5.1
59	AKEF	Коэффициент ослабления, [1/м]	F6.3
Технико-гигиенические характеристики двигателя			
А. Показатели по выбросам сажи			
60	E1C	1. Относительное выделение сажи, [г/кг]	F6.2
61	CD	2. Массовая концентрация сажи, [г/м ³]	F7.4
62	EC	3. Часовые выделения, [г/час]	F6.1
63	BC	4. Цикловое выделение, [мг/цикл]	F7.4
64	EUD	5. Удельное выделение, [г/кВт·ч]	F6.2
65	VHC	6. Нормообъем по ПДК.СС=0.05 мг/м ³ , [м ³ /ч]	E10.4
66	KP	7. Индекс концентрации по ПДК.СС	E10.4
67	UVH	8. Удельный нормообъем, [м ³ /кВт·ч]	E10.4
68	QECOC	9. Удельное выделение приведенное к СО, [г/кВт·ч]	E10.4
Б. Показатели по выбросам бенз/а/пирена (БАП)			
69	E1B	1. Относительное выделение БАП, [мкг/кг]	F6.2
70	CB	2. Массовая концентрация БАП, [мкг/м ³]	F7.4
71	EB	3. Часовое выделение БАП, [мг/час]	F6.2
72	BB	4. Цикловое выделение БАП, [мкг/цикл]	E10.4
73	EUDB	5. Удельное выделение, [мг/кВт·ч]	F6.2
74	VHB	6. Нормообъем по ПДК.СС=1Е-6 мг/м ³ , [м ³ /ч]	E10.4
75	UKPB	7. Индекс концентрации по ПДК.СС	E10.4

135
RU.02068574.02018-02 31

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
76	UVNB	8. Удельный нормообъем, [м ³ /кВт·ч]	E10.4
77	QECOB	9. Удельное выделение приведенное к СО, [г/кВт·ч]	E10.4

Таблица 13. Выходные данные, находящиеся в передаточном файле Szg***.dat

№ пр.	Обозначение параметра	Наименование параметра (массива данных), пояснения по использованию	Формат параметра
1	Fi, Gszh, Vszh	Угол поворота коленчатого вала, [°п.к.в.]; относительное сажевыделение, [г/кг топл.]; массовая концентрация сажи в объеме ОГ, [г/м ³]	F10.1, 2F10.3
2	Kfi, Kgszh, Kvszh	Масштабные коэффициенты, на которые следует умножить соответствующие параметры, чтобы получить их истинную размерность	3I10

*Галышев Юрий Виталиевич,
Зайцев Алексей Борисович,
Сидоров Анатолий Алексеевич,
Шабанов Александр Юрьевич
Яксон Ирина Александровна*

**РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ
И ТОКСИЧНОСТЬ
ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ СУДОВЫХ
ДИЗЕЛЬНЫХ И ГАЗОПОРШНЕВЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ**

Учебное пособие

Издание второе
переработанное и дополненное

Электронный ресурс. Оригинал-макет предоставлен авторами.

Адрес библиотеки университета:

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

Тел.: (812) 552-77-14, 552-75-59 (доб. 207), e-mail: elib@unilib.spbstu.ru