

УДК 621.4:519.673

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕШНЕЙ
СКОРОСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОЦЕНКА ВЫБРОСОВ
ОКСИДОВ АЗОТА ДВИГАТЕЛЯ MeM3-2471 С ПОМОЩЬЮ
ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДИЗЕЛЬ-РК**

Мурай С.В., к.т.н.

*Мелитопольский государственный педагогический университет
им. Б. Хмельницкого*

Тел. (06192) 6-91-90

E-mail: mural59@mail.ru

Аннотация – с помощью программного комплекса ДИЗЕЛЬ-РК рассчитана внешняя скоростная характеристика бензинового двигателя MeM3-2471 и определены выбросы токсичных оксидов азота.

Ключевые слова – двигатель внутреннего сгорания, рабочий процесс, математическая модель, внешняя скоростная характеристика, выбросы оксидов азота.

Постановка проблемы. Двигатели внутреннего сгорания широко применяются для выработки энергии на транспорте и в стационарной энергетике. Актуальной задачей является повышение мощности, снижение расхода топлива и уменьшение выбросов токсичных веществ при работе двигателя. Применение современных компьютерных программ по расчету рабочего процесса, теплового и напряженно-деформированного состояния деталей двигателей позволяет существенно сократить время и расходы на создание новых и модернизацию существующих двигателей.

Анализ последних исследований. В МГТУ им. Баумана доц. к.т.н. Кулешов А.С. разработал программный комплекс ДИЗЕЛЬ-РК, который позволяет проводить расчетные исследования рабочего процесса практически любых двигателей внутреннего сгорания, в том числе рассчитывать выбросы токсичных веществ с отработавшими газами двигателя [1,2]. В работе [3] проведена настройка этого комплекса и произведен расчет рабочего процесса на номинальном режиме бензинового двигателя MeM3-2471 Мелитопольского моторного завода, который устанавливается на легковой автомобиль.

Формулировка цели. Рассчитать внешнюю скоростную характеристику бензинового двигателя MeM3-2471, оценить расчетным путем выбросы оксидов азота, которые оказывают вредное воздействие на людей, животных, растения и сельскохозяйственные культуры.

Основная часть. В программном комплексе ДИЗЕЛЬ-РК используются математические модели, отражающие сущность физических процессов, происходящих в двигателе, и позволяют получить высокую точность результатов численного эксперимента. Параметры газа определяются путем пошагового решения системы разностных уравнений сохранения массы и энергии, а также уравнений состояния, записанных для открытых термодинамических систем. Метод разностных уравнений превосходит традиционные методы по точности и скорости в 5 раз. Учитывается зависимость свойств тела от состава и температуры. Теплообмен в цилиндре рассчитывается отдельно по разным поверхностям, температуры которых определяются путем решения задачи теплопроводности. Коэффициент теплоотдачи определяется по формуле Вошни.

Двигатели внутреннего сгорания загрязняют окружающую среду. В городах они являются одним из основных источников токсических веществ, выбрасываемых в атмосферу. Так, например, доля автомобильного транспорта в выбросах вредных веществ составляет в США 60,6%, в Англии – 33,5%, во Франции – 32% [4].

Оксиды азота представляют серьезную опасность для здоровья человека. Они воздействуют на слизистые оболочки глаз и носа, а также на нервную и сердечнососудистую системы человека, кроветворные органы и печень. Оксиды азота, взаимодействуя с парами воды в воздухе, образуют азотистую HNO_2 и азотную HNO_3 кислоты, которые разрушают легочную ткань, вызывая хронические заболевания. Небольшие концентрации оксидов азота в атмосфере приводят к постепенному отравлению организма, причем каких-либо нейтрализующих средств нет. При концентрациях в воздухе более 0,0013% NO действуют как острый раздражитель слизистых оболочек, а при концентрациях 0,004-0,008% — могут вызвать отек легких [4].

Оксиды азота оказывают негативное влияние и на растения и сельскохозяйственные культуры. При низких концентрациях NO_2 в атмосфере отмечается снижение темпа роста растений, а при концентрациях 0,0002-0,0003% и более — их серьезные повреждения. Причем наиболее чувствительны к загрязнению атмосферы оксидами азота являются злаки, бобовые, свекла.

Поэтому наряду с улучшением экономических показателей двигателей снижение токсичности их ОГ является важнейшей задачей.

Расчет образования оксидов азота в программном комплексе ДИЗЕЛЬ-РК производится по термическому механизму на основе схемы Зельдовича по методике В.А. Звонова [5].

При математическом моделировании сгорания и образования оксидов азота в двигателе процесс сгорания был условно разделен на две зоны: зону свежей смеси и зону продуктов сгорания. Зона свежей смеси представляет собой смесь остаточных газов с воздухом, поступившим в цилиндр при наполнении. Перед началом сгорания эта зона занимает весь объем цилиндра. В ходе сгорания происходит увеличение объема зоны продуктов сгорания. При разработке двухзонной математической модели процесса сгорания принято допущение, что горение топлива в цилиндре протекает с локальным коэффициентом избытка воздуха в зоне горения, значение которого в процессе сгорания изменяется от его начальной величин $\alpha_r < 1$ до 1. Текущее значение α_r на участке сгорания определяется линейной зависимостью:

$$\alpha_r = \alpha_{rн} + \frac{1 - \alpha_{rн}}{\varphi_z} \varphi,$$

где φ_z - продолжительность процесса сгорания, град;

φ - текущее значение угла поворота кривошипа от начала сгорания, град.

Особенностями разработанной методики являются:

- расчет равновесного состава в зоне продуктов сгорания для восемнадцати компонентов на каждом шаге расчета;
- кинетический расчет образования термических оксидов азота по цепному механизму Я.Б. Зельдовича [6].

Расчет температуры продуктов сгорания в зоне сгорания выполняется по формуле:

$$T_{пс} = \frac{\sqrt{B^2 - 4A \left\{ \frac{1 - r_{пс}}{r_{пс}} [H_{см}(T_{см}) - H_{см}(T_{ср})] - AT_{ср}^2 - BT_{ср} \right\}} - B}{2A},$$

где A и B - коэффициенты уравнения для энтальпии продуктов сгорания (кДж/кмоль) вида:

$$H_{пс}(T_{пс}) = A T_{пс}^2 + B T_{пс} + C;$$

коэффициенты A , B , C определяются в результате специальных расчетов, например для продуктов сгорания дизельного топлива:

$$A = 0.000966; \quad B = 35.4882 + 0.47283 P;$$

где $r_{пс}$ - доля продуктов сгорания в заряде цилиндра;

P - давление в цилиндре в конце расчетного участка, МПа;

$T_{см}$ - температура свежей смеси в конце расчетного участка, К;

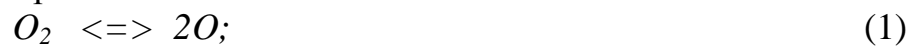
T_{cp} – середня температура заряду в кінці розрахункового участка, К;
 H_{cm} – ентальпія свіжешої суміші, кДж/кмоль:

$$H_{cm}(T_{cm}) = [a_{cm} + 8,314 + b_{cm}T_{cm}/2 + c_{cm}T_{cm}^2/3] T_{cm};$$

a_{cm} , b_{cm} , c_{cm} – коефіцієнти рівняння істинної мольної ізохорної теплоємкості стиснутого заряду.

Поскольку для условий сгорания топлив в двигателях внутреннего сгорания определяющим является образование "термических" NO, то в предлагаемой модели все расчеты производятся по термическому механизму.

Окисление азота происходит по цепному механизму, основные реакции которого:



Определяющей является реакция (3), скорость которой зависит от концентрации атомарного кислорода.

Расчет образования NO по уравнению цепного механизма производится для зоны сгорания, затем определяется средняя концентрация NO по камере сгорания. Объемная доля оксида азота в продуктах сгорания r_{NO} , образовавшихся в зоне на данном шаге расчета:

$$\frac{dr_{NO}}{d\varphi} = \frac{P \cdot 2,333 \cdot 10^7 \cdot e^{-\frac{38020}{T_{nc}}} \cdot r_{N_2 eq} \cdot r_{O eq} \cdot \left[1 - \left(\frac{r_{NO}}{r_{NO eq}} \right)^2 \right]}{RT_{nc} \cdot \left(1 + \frac{2346}{T_{nc}} \cdot e^{\frac{3365}{T_{nc}}} \cdot \frac{r_{NO}}{r_{O_2 eq}} \right)} \cdot \frac{1}{\omega},$$

где P – давление в цилиндре, Па;

T_{nc} – температура в зоне продуктов сгорания, К;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль К);

ω – угловая скорость коленчатого вала, рад/с;

$r_{NO eq}$, $r_{N_2 eq}$, $r_{O eq}$, $r_{O_2 eq}$ – равновесные концентрации оксида азота, молекулярного азота, атомарного и молекулярного кислорода, соответственно.

Равновесные концентрации компонентов рассчитываются на каждом шаге расчета. Расчет ведется для 18 компонентов отработавших газов: O_2 , O_3 , H , H_2 , OH , H_2O , C , CO , CO_2 , CH_4 , N , N_2 , NO , NO_2 , NH_3 , HNO_3 , HCN . Для этого решается система из 14 уравнений равновесия, трех уравнений материального баланса и уравнения Дальтона.

Доля оксида азота в целом по камере сгорания (цилиндру):

$$r_{NO \text{ ц}} = r_{NO} r_{nc}$$

Доля оксида азота в "сухих" продуктах сгорания:

$$r_{\text{NO сух}} = \frac{r_{\text{NO}}}{1 - r_{\text{H}_2\text{O}}},$$

где $r_{\text{H}_2\text{O}}$ - объемная доля водяных паров в камере сгорания.

"Сухая" доля оксида азота в камере сгорания:

$$r_{\text{NO ц}}^{\text{сух}} = \frac{r_{\text{NO}}}{1 - r_{\text{H}_2\text{O}}}.$$

Удельный выброс оксида азота NO, г/кВтч:

$$e_{\text{NO}} = \frac{30}{L_{\text{ц}} \eta_{\text{м}}} r_{\text{NO}} M_{\text{пс}} 3600000,$$

где $M_{\text{пс}}$ - количество продуктов сгорания в конце процесса сгорания, кмоль;

$L_{\text{ц}}$ - работа, выполненная за весь рабочий цикл, кДж;

$\eta_{\text{м}}$ - механический КПД двигателя.

Проверка адекватности модели по расчету образования NO проведена путем сопоставления результатов расчета с опытными данными, полученными при испытаниях дизеля ЯМЗ-7512 по 13-ти ступенчатому циклу [5].

Расчет параметров двигателя MeM3-2471 по внешней скоростной характеристике произведен через Интернет (программа ДИЗЕЛЬ-РК размещена на сайте МГТУ им. Н.Э.Баумана). Настройка программы ДИЗЕЛЬ-РК для расчетов рабочего процесса двигателя MeM3-2471 произведена в работе [3].

Исходные данные для расчета внешней скоростной характеристики заданы в окне «Режимы работы» программного комплекса ДИЗЕЛЬ-РК (рис. 1). В табл. 1 приведены экспериментальные и расчетные параметры двигателя MeM3-2471 на режимах внешней скоростной характеристики.

Таблица 1

Экспериментальные и расчетные параметры

Параметр	Частота вращения коленчатого вала n, 1/мин							
	5500		3000		2000		1200	
	экспери- мент	расчет	экспери- мент	расчет	экспери- мент	расчет	экспери- мент	расчет
N_e , кВт	42,30	42,32	26,70	25,66	16,44	16,82	8,82	9,70
g_e , г/кВтч	330	329	284	296	300	293	330	300
Alfa	0,878	0,853	0,928	0,889	0,895	0,893	0,875	0,877

Сравнение представленных в табл.1 результатов определения эффективной мощности двигателя N_e (кВт), удельного эффективного расхода топлива g_e (г/кВтч), суммарного коэффициента избытка воздуха Alfa показывает удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных на режиме внешней скоростной характеристики при частоте вращения коленчатого вала 5500, 3000 и 2000 1/мин.

Зависимость значений эффективной мощности N_e , крутящего момента M_e , максимального давления газов в цилиндре P_z , среднего эффективного давления P_e , удельного эффективного расхода топлива g_e , эффективного коэффициента полезного действия η_e и выбросов оксидов азота NO от частоты n вращения коленчатого вала двигателя МемЗ-2471 на режиме внешней скоростной характеристики показана на рис. 2.

Согласно выполненным расчетам, выбросы оксидов азота на режимах внешней скоростной характеристики изменяются от 5,4 до 9,5 г/кВтч. Для сравнения, удельные массовые выбросы оксидов азота для бензинового двигателя ЗиЛ-130 равны 13,2 г/кВтч, а для бензинового двигателя ЗиЛ-508 равны 7,8 г/кВтч [7].

Полученные результаты позволяют провести расчет теплового и напряженно-деформированного состояния деталей двигателя для оценки ресурса и возможности форсирования двигателя по мощности, снижения расхода топлива, уменьшения выбросов оксидов азота, которые оказывают вредное влияние на людей, животных, растения и сельскохозяйственные культуры.

Программный комплекс ДИЗЕЛЬ-РК целесообразно использовать в учебном процессе для изучения методов математического моделирования при подготовке специалистов по специальности поршневые двигатели внутреннего сгорания, причем расчеты производятся через Интернет.

Выводы. С помощью программного комплекса ДИЗЕЛЬ-РК рассчитаны параметры бензинового двигателя МемЗ-2471 и определены выбросы оксидов азота при работе этого двигателя по внешней скоростной характеристике.

Литература

1. *Кулешов А.С.* Многозонная модель для расчета сгорания в дизеле. Расчет распределения топлива в струе / *А.С. Кулешов* // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение».- 2007. - С. 18-31.
2. *Кулешов А.С.* Многозонная модель для расчета сгорания в дизеле. Расчет скорости тепловыделения при многократном впрыске / *А.С. Кулешов* // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение».- 2007. - С. 32-45.

3. Мурай С.В. Расчет параметров рабочего процесса двигателя МемЗ-2471 га номинальном режиме с помощью программного комплекса ДИЗЕЛЬ-РК / С.В. Мурай, Л.П. Данилевич, А.И. Квашиневский, О.И. Олешко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2009. - Вип. 9. - Т. 2. - С. 96-104.
4. Лиханов В.А. Снижение токсичности автотракторных дизелей / В.А. Лиханов, А.М. Сайкин. – М.: Колос, 1994. - 224 с.
5. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В.А. Звонов. - М.: Машиностроение, 1981. - 160 с.
6. Зельдович Я.Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. - М.: Наука, 1966. - 686 с.
7. Марков В.А. Токсичность отработавших газов дизелей / В.А. Марков, Р.М. Баширов, И.И. Гамбитов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 376 с.

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗОВНІШНЬОЇ
ШВИДКІСНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ І ОЦІНКА ВИКИДІВ
ОКСИДІВ АЗОТУ ДВИГУНА МЕМЗ-2471 ЗА ДОПОМОГОЮ
ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДИЗЕЛЬ-РК**

Мурай С.В.

Анотація – за допомогою програмного комплексу ДИЗЕЛЬ-РК розраховано зовнішню швидкісну характеристику бензинового двигуна МЕМЗ-2471 і визначено викиди токсичних оксидів азоту.

**MATHEMATICAL SIMULATION OF THE EXTERNAL PEED
PERFORMANCE AND EVALUATION OF THE NITROGEN
OXIDE EMISSIONS OF THE MeMZ 2471 ENGINE BY USING A
DIESEL-RK SOFTWARE SUITE**

S. Muray

Summary

The external speed performance of a MeMZ-2471 gas line engine is predicted and emissions of toxic nitrogen oxides are determined by using a DIESEL-RK software suite.

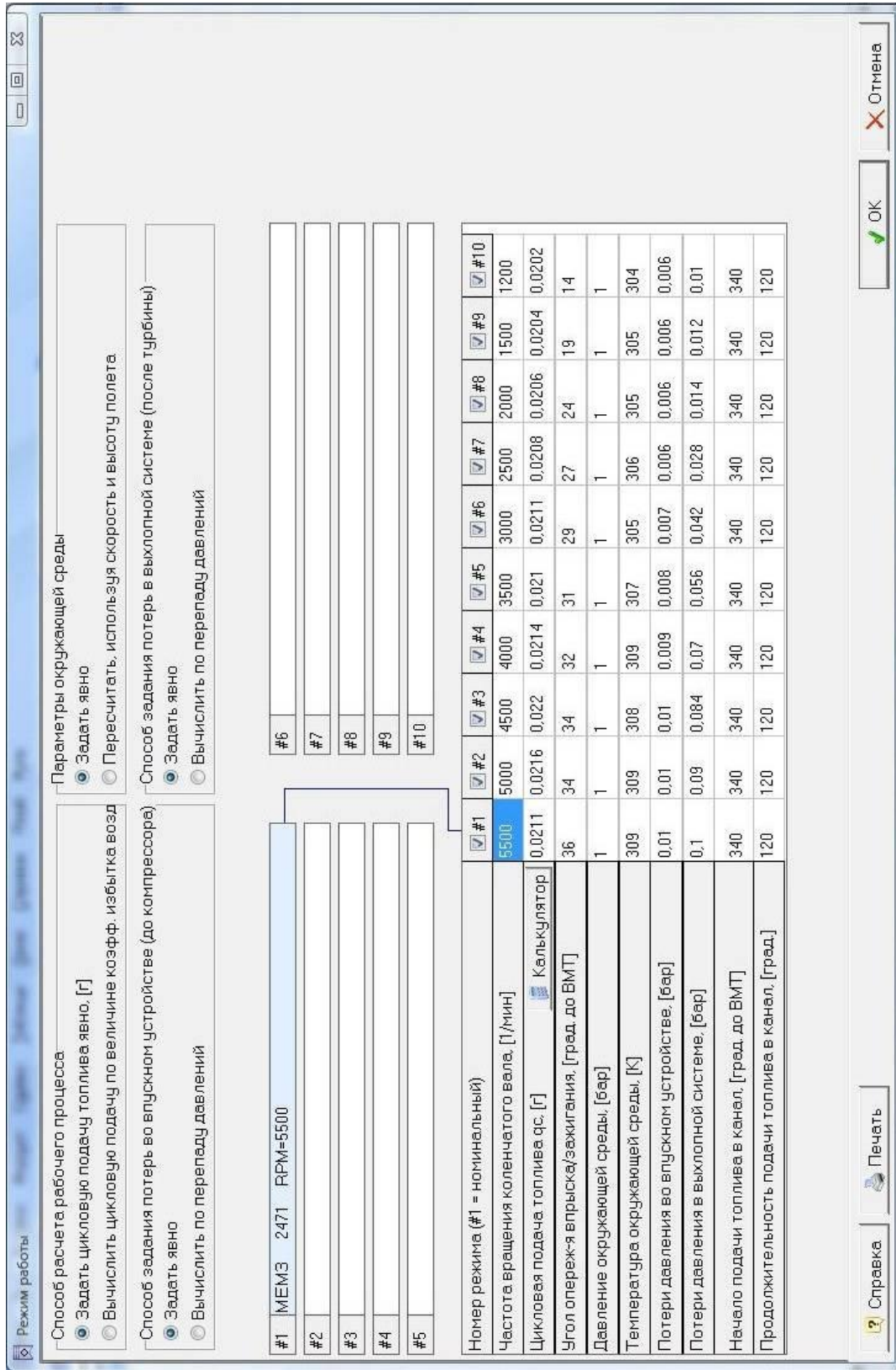


Рис. 1 Режимы работы двигателя Мем3-2471 по внешней скоростной характеристике (интерфейс программы).

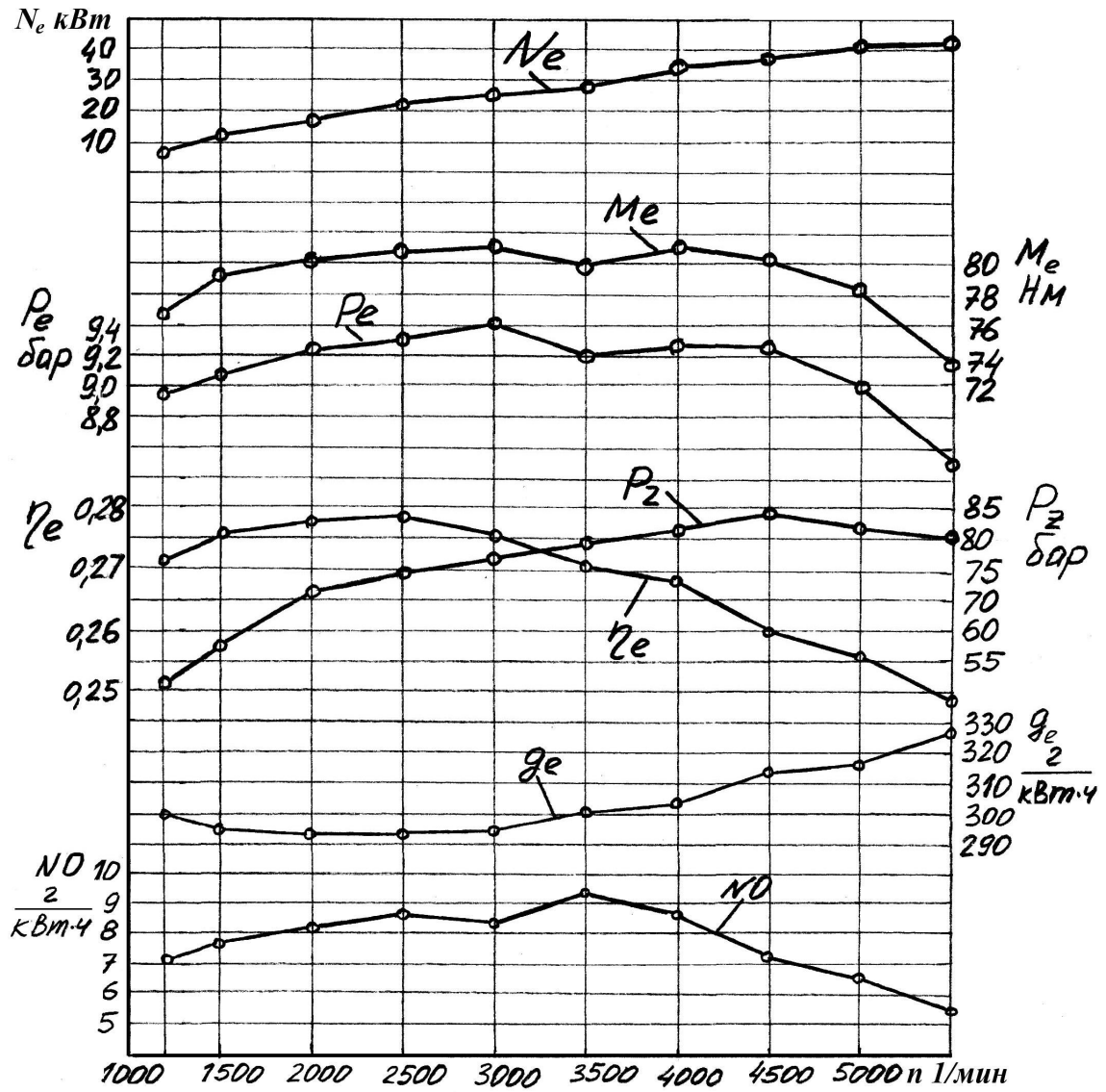


Рис. 2 Внешняя скоростная характеристика двигателя MeM3-2471.