

РЕФЕРАТ

Гутаревич Ю.Ф., Александров В.Д., Грицук И.В., Постников В.А., Добровольский А.С., Адров Д.С. К выбору теплоаккумулирующих материалов теплового аккумулятора сохранения теплового состояния ДВС / Юрий Феодосиевич Гутаревич, Валерий Дмитриевич Александров, Игорь Валериевич Грицук, Владимир Анатольевич Постников, Александр Сергеевич Добровольский, Дмитрий Сергеевич Адров // Вестник НТУ. – К.: НТУ. – 2012. – Вып. 26.

В статье обосновывается перспектива использования тепловых аккумуляторов на основе фазовых превращений типа плавления и кристаллизации в теплоаккумулирующих материалах (ТАМ) с целью осуществления предпускового прогрева, пуска и быстрого прогрева после пуска двигателей внутреннего сгорания; выполнен обзор перспективных ТАМ.

Объект исследования – теплоаккумулирующие материалы, используемые для применения в тепловых аккумуляторах, для осуществления предпускового прогрева двигателей внутреннего сгорания.

Цель работы – определение, обобщение имеющихся сведений, а также разработка методики выбора ТАМ, которые могут использоваться в тепловых аккумуляторах фазового перехода для предпускового прогрева, пуска и быстрого прогрева после пуска.

Метод исследования – анализ экспериментально определенных свойств ТАМ для их использования в тепловых аккумуляторах фазового перехода при прогреве двигателей.

При эксплуатации двигателей внутреннего сгорания, особенно в условиях низких температур, возникает проблема их безаварийного запуска и предварительного предпускового прогрева для работы с нагрузкой, что объясняется нарушениями нормального теплового баланса. Эффективность использования ДВС существенно зависит от времени, затрачиваемого на вспомогательные операции. К таким относится предпусковая подготовка ДВС, которая включает в себя комплекс мероприятий, обеспечивающих уверенный и безаварийный пуск двигателя и ускоренную подготовку его к принятию нагрузки. Устранения вышеуказанных проблем целесообразно выполнять путем внедрения технологии теплового аккумулярования в процессы предпусковой подготовки двигателя. В статье выполнен обзор перспективных теплоаккумулирующих материалов для тепловых аккумуляторов фазового перехода двигателей.

Результаты статьи могут быть внедрены в конструкциях тепловых аккумуляторов двигателей при выполнении их предпускового прогрева и ускоренного прогрева после пуска.

Прогнозные предположения о развитии объекта исследования – поиск теплоаккумулирующего материала для соответствующей конструкции теплового аккумулятора, обеспечивающего оптимальный предпусковой прогрев двигателя.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ, ОТРАБОТАВШИЕ ГАЗЫ, РАБОЧИЕ ЖИДКОСТИ, ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИЙ МАТЕРИАЛ, ТЕПЛОЙ АККУМУЛЯТОР ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА.

УДК 621.43

РОЗРАХУНКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ НА УТВОРЕННЯ ОКСИДІВ АЗОТУ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ КОМБІНОВАНОГО МЕТОДУ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ СУЧАСНОГО БЕНЗИНОВОГО ДВИГУНА

Гутаревич Ю.Ф., доктор технічних наук
Карев С.В.

Вступ. В Національному транспортному університеті на кафедрі «Двигуни і теплотехніка» продовжуються дослідження по застосуванню комбінованого методу регулювання потужності (КМРП) на бензиновому двигуні 6Ч 9,5/6,98. Суть методу полягає у відключенні частини циліндрів двигуна в режимах малих навантажень та холостого ходу, при цьому необхідну потужність розвиває працююча група циліндрів.

Аналіз останніх досліджень. За результатами стендових випробовувань двигуна 6Ч 9,5/6,98 [1] отримано, що при застосуванні КМРП покращується паливна економічність в режимах холостого хо-

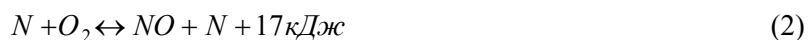
ду та малих навантажень при роботі на 3-х циліндрах. Але при цьому погіршуються екологічні показники двигуна, зокрема зростають концентрації і викиди оксидів азоту NO_x , і, відповідно, сумарні масові викиди, приведені до CO для випадку роботи двигуна без нейтралізатора шкідливих речовин (ШР). При застосуванні нейтралізатора ШР концентрації і викиди шкідливих речовин зменшуються, але все рівно залишаються вищі в порівнянні з концентраціями та масовими викидами шкідливих речовин при роботі двигуна на 6-ти циліндрах.

Одним з найбільш ефективних методів зниження концентрацій оксидів азоту є рециркуляція відпрацьованих газів (РВГ). За результатами експериментальних досліджень на двигуні 6Ч 9,5/6,98 при КМРП отримано, що при застосуванні РВГ знижуються концентрації оксидів азоту NO_x і відповідно, знижуються сумарні масові викиди шкідливих речовин, приведені до CO , до рівня показників за роботи на 6-ти циліндрах. При цьому, паливна економічність не погіршується в порівнянні з роботою на частині циліндрів без застосування рециркуляції ВГ.

Постановка задачі. Для підтвердження достовірності отриманих експериментальних даних оцінювання ефективності застосування рециркуляції ВГ при КМРП на бензиновому двигуні з системою впорскування та зворотнім зв'язком доцільно розрахувати інтенсивність утворення оксидів азоту NO_x в циліндрі двигуна при застосуванні РВГ та без застосування РВГ.

Основний матеріал. В різні періоди часу існували різні точки зору на природу утворення оксидів азоту в реакціях згоряння [2]. В теперішній час загальноприйнятою є термічна теорія утворення оксидів азоту. Основу цієї теорії, розробленої академіком Я.Б.Зельдовичем [3], можна сформулювати наступним чином:

1. Окислювання азоту відбувається за фронтом полум'я в зоні продуктів згоряння.
2. Вихід оксидів азоту визначається максимальною температурою горіння, концентрацією азоту і кисню в продуктах згоряння і не залежить від хімічної природи палива, яке приймає участь в горінні.
3. Окислювання азоту відбувається по ланцюговому механізму, теорія якого запропонована академіком Семеновим М.М.:



Визначальною є реакція (1), швидкість якої залежить від концентрації атомарного кисню.

4. Вихід оксидів азоту залежить від швидкості охолодження продуктів згоряння.
5. В бідних сумішах (при малій рухомості реакції) вихід NO визначається максимальною температурою вибуху, тобто кінетикою його утворення. В багатих сумішах вихід NO перестає залежати від максимальної температури вибуху і визначається кінетикою розкладу, тобто «закалкою» утворених оксидів азоту.
6. Концентрація оксидів азоту не перевищує рівноважну при максимальній температурі вибуху.
7. Махо-ефект (нерівномірне розподілення температури в зоні продуктів згоряння) суттєво впливає на вихід NO при горінні при складі суміші $\alpha > 1$ і майже не впливає при горінні при складі суміші $\alpha \leq 1$.

Однією з труднощів, що виникають при розрахунку утворення оксиду азоту з використанням ланцюгового механізму є визначення концентрації атомарного кисню.

Разом з тим перше положення теорії про утворення оксиду азоту за фронтом полум'я в зоні продуктів згоряння дає можливість припустити, що в цій зоні склад азоту і кисню є таким, як в продуктах згоряння відпрацьованих газів (ВГ).

Таке припущення дозволяє при розрахунках скористатися експериментальними даними аналізу хімічного складу ВГ.

Як зазначається в джерелі [2], при теоретичному дослідженні утворення оксиду азоту в двигунах внутрішнього згоряння крім ланцюгового механізму можна застосувати бімолекулярний механізм, основною реакцією утворення оксидів азоту в якому є:



Такий підхід до розрахунку утворення оксиду азоту дає можливість використовувати експериментальні результати хімічного аналізу ВГ, а саме концентрації в них кисню і азоту.

При розрахунках приймаємо, що в процесі згоряння в циліндрі двигуна є дві зони: свіжої суміші і продуктів згоряння, при цьому хімічний склад продуктів згоряння такий, як відпрацьованих газів. Крім того, вважаємо, що тиск в будь-який момент процесу згоряння в усьому об'ємі камери однаковий. Це дозволяє визначити середню температуру газів в циліндрі з використанням визначених експериментально індикаторних діаграм.

Так як кінцевою метою даного дослідження є визначення ефективності РВГ шляхом порівняння концентрацій оксидів азоту з РВГ і без неї було вирішено зробити таке порівняння по рівноважним та нерівноважним концентраціям оксидів азоту в процесі згоряння.

Розрахунок рівноважних концентрацій було проведено по рівнянню, приведену в джерелі [2], яке описує утворення молів оксидів азоту M_{NO} через кількість молів азоту M_{N_2} і кисню M_{O_2} і температуру газів в циліндрі в зоні продуктів згоряння T :

$$aM_{NO}^2 + bM_{NO} - c = 0, \quad (4)$$

$$\text{де } a = 1 - \frac{K}{4}; \quad b = \frac{K}{2}(M_{N_2} + M_{O_2}); \quad c = KM_{N_2}M_{O_2}.$$

В наведених залежностях K є константою рівноваги, яка може бути визначена як функція температури продуктів згоряння.

$$K = 21,2e^{\frac{43260}{1,985T}}. \quad (5)$$

За визначеною кількістю молів оксидів азоту визначається об'ємна концентрація оксидів азоту за виразом:

$$C_{NO} = \frac{M_{NO}}{\mu_0 M_1}, \quad (6)$$

де μ_0 – коефіцієнт молекулярної зміни;

M_1 – кількість молів свіжої суміші в кінці процесу стиснення.

Проведені розрахунки для режиму роботи двигуна 6Ч 9.5/6.98 при $n = 2000 \text{ об}^{-1}$, $M_k = 30 \text{ Н} \cdot \text{м}$ та коефіцієнту рециркуляції ВГ $R_{BG} = 11,5\%$. Даний швидкісний та навантажувальний режим відповідає режиму роботи двигуна, який широко використовується в умовах експлуатації, а коефіцієнту рециркуляції ВГ відповідає оптимальному значенню для даного швидкісного та навантажувального режиму [5]. Визначені при опрацюванні індикаторних діаграм [4] максимальні температури (Рис.1) в циліндрі двигуна становили: за роботи з РВГ $T = 2222 \text{ К}$, без РВГ $T = 2431 \text{ К}$.

За результатами даних експериментальних досліджень концентрація кисню O_2 у відпрацьованих газах становила 0.86%, кількість молів азоту M_{N_2} становило 0,404.

В процесі опрацювання індикаторних діаграм визначено закон виділення теплоти χ при застосуванні РВГ та без неї, який показано на рис.1.

Як видно з рис.1, рівноважні концентрації оксидів азоту $NO_{рівн}$ починають зростати з початку згоряння в циліндрі двигуна, що відповідає 340° п.к.в. при застосуванні РВГ та 344° п.к.в. без застосування РВГ. Отримані максимальні рівноважні концентрації оксидів азоту $NO_{рівн}$ відповідають значенню максимальних температур газів T в циліндрі двигуна і складають: при роботі з РВГ 2021 млн^{-1} , без РВГ 3242 млн^{-1} . Ці величини значно вищі в порівнянні з експериментально зміряними концентраціями оксидів азоту в ВГ (200 млн^{-1} і 1090 млн^{-1}) відповідно. Разом з тим розрахунки показують, що при даному коефіцієнті РВГ можна очікувати зниження оксидів азоту в 1,58 разів.

Значне перевищення розрахункових значень концентрації оксидів азоту в порівнянні з зміряними можна пояснити тим, що двигун працював на стехіометричній суміші ($\alpha = 1,0$), а розглянута методика опробована на збіднених сумішах ($\alpha > 1$) [2].

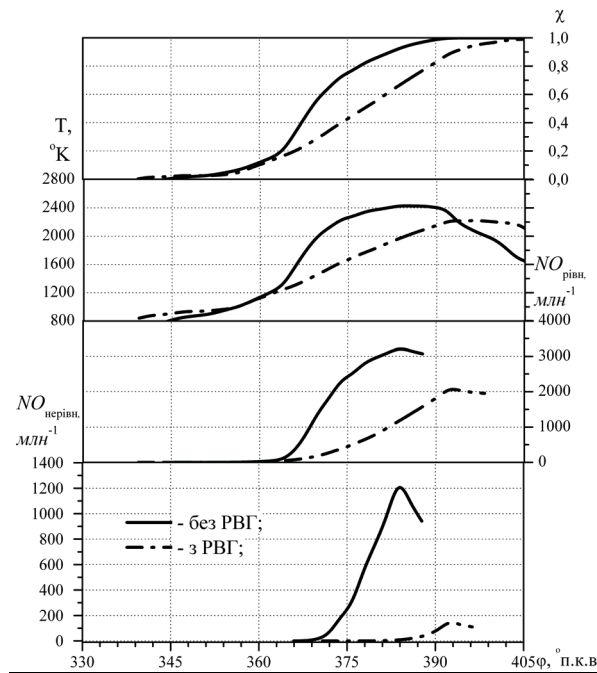


Рисунок 1. – Характеристика зміни температури газів T , рівноважних та нерівноважних концентрацій NO та коефіцієнта виділення теплоти χ в залежності від кута повороту колінчастого вала двигуна 6Ч9.5/6.98 за режиму роботи $n = 2000 \text{ хв}^{-1}$, $M_k = 30 \text{ Н} \cdot \text{м}$ та $R_{BG} = 11,5\%$

Розрахунок нерівноважних концентрацій NO для цього ж режиму роботи двигуна проведено за методикою запропонованою в [6] і приведеною в [2]. Диференціальне рівняння утворення оксидів азоту в залежності від кута повороту колінчастого вала має вид:

$$\frac{dM_{NO}}{d\varphi} = \left(\frac{K_1 (M_{N_2} - \frac{M_{NO}}{2})(M_{O_2} - \frac{M_{NO}}{2})}{V^2} - \frac{K_2 M_{NO}^2}{V^2} \right) \frac{6n}{V}, \quad (7)$$

де φ – кут повороту кривошипа;

n – частота обертання колінчастого вала, хв^{-1} ;

V – об'єм камери згоряння в даний момент часу, см^3 ;

K_1, K_2 – константи швидкостей прямої та зворотної реакцій, $\text{см}^3/\text{моль} \cdot \text{с}$.

Константи швидкостей реакцій визначається за виразами:

$$K_1 = 5,48 \cdot 10^{13} e^{\frac{107060}{1,985T}}, \quad (8)$$

$$K_2 = 2,6 \cdot 10^{12} e^{\frac{63800}{1,985T}}, \quad (9)$$

На основі цієї методики створена програма розрахунку нерівноважних концентрацій оксидів азоту за бімолекулярним механізмом. Рівняння (7) в загальному вигляді не інтегрується. Для вирішення рівняння (7) розрахунку нерівноважних концентрацій оксидів азоту за бімолекулярним механізмом застосований чисельний метод інтегрування Рунге-Кутта.

Як видно з Рисунка 1, оксиди азоту NO починають утворюватися при температурі $T \approx 1500 \text{ К}$. Максимальні значення нерівноважних концентрацій оксидів азоту мають місце при максимальній температурі циклу, і становлять при застосуванні РВГ 159 млн^{-1} і без застосування РВГ 1289 млн^{-1} . Застосування РВГ в кількості $11,5\%$ призвело до зниження нерівноважних концентрацій оксидів азоту в $8,1$ разів. В порівнянні з отриманими експериментальними значеннями концентрацій оксидів азоту значення нерівноважних концентрацій оксидів азоту при застосуванні РВГ менші на $20,5\%$, а без застосування РВГ більші на $15,4\%$.

Отримані розрахунки нерівноважних концентрацій оксидів азоту близькі до концентрацій оксидів азоту, які отримані під час експериментальних випробовувань двигуна, і дозволяють оцінити вплив РВГ на утворення оксидів азоту в циліндрах двигуна.

Висновок. Таким чином, результати розрахунку утворення рівноважних та нерівноважних концентрацій оксидів азоту за біомолекулярним механізмом підтвердили ефективність застосування РВГ, як одного з методів зниження концентрацій оксидів азоту у ВГ двигуна при застосуванні КМРП.

Проведені розрахунки показують, що більш точні дані по кількісній оцінці утворення оксидів азоту отримуються при розрахунку нерівноважних концентрацій оксидів азоту за біомолекулярним механізмом.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гутаревич Ю.Ф. Поліпшення екологічних показників сучасного бензинового двигуна при регулюванні потужності відключенням групи циліндрів/ Гутаревич Ю.Ф., Карев С.В. – Автошляховик України: Окремий випуск. Вісник Центрального наукового центру ТАУ. – Вип. 14. – 2011 – С.29-31
2. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. М., «Машиностроение», 1973, – С.29-65, 91
3. Зельдович Я.Б. Окисление азота при горении / Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А. Окисление азота при горении. Изд-во АН СССР, 1947, – С.147
4. Гутаревич Ю.Ф. Вплив рециркуляції відпрацьованих газів на показники процесу згорання сучасного бензинового двигуна при комбінованому методі регулювання потужності / Гутаревич Ю.Ф., Карев С.В. – Вісник СевНТУ. – Випуск 134. – 2012 – С.44-47
5. Гутаревич Ю.Ф. Вплив рециркуляції відпрацьованих газів на паливну економічність та екологічні показники сучасного бензинового двигуна/ Гутаревич Юрій, Карев Станіслав/ Systems and means of motor transport (selected problems), Rzeszow 2011 – С.54-57
6. Eyzat P. A New Look at Nitrogen Oxides Formation in Internal Combustion / Eyzat P., Guibet J.C.; – SAE Paper 680124, 1968 – С.18.

РЕФЕРАТ

Гутаревич Ю.Ф. Розрахункові дослідження впливу рециркуляції відпрацьованих газів на утворення оксидів азоту при застосуванні комбінованого методу регулювання потужності сучасного бензинового двигуна / Гутаревич Ю.Ф., Карев С.В. // Вісник НТУ. – К.: НТУ. – 2012. – Вип. 26.

В статті показаний вплив рециркуляції відпрацьованих газів (РВГ) на утворення оксидів азоту при застосуванні комбінованого методу регулювання потужності (КМРП).

Об'єкт дослідження – бензиновий двигун 6Ч 9,5/6,98 з КМРП та РВГ.

Мета роботи – визначення впливу РВГ на утворення оксидів азоту при застосуванні КМРП на сучасному бензиновому двигуні.

В статті наведені результати розрахунку рівноважних і нерівноважних концентрацій оксидів азоту в процесі згорання в двигуні 6Ч 9.5/6.98 при застосуванні РВГ при КМРП, за режиму роботи $n = 2000 \text{ хв}^{-1}$, $M_k = 30 \text{ Н} \cdot \text{м}$ та коефіцієнту рециркуляції ВГ $R_{BG} = 11,5\%$. Розрахунок проведений для біомолекулярного механізму утворення оксидів азоту

За результатами розрахунку максимальні рівноважні концентрації оксидів азоту становлять при роботі з РВГ 2021 млн^{-1} , без РВГ 3242 млн^{-1} . Максимальні нерівноважні концентрації оксидів азоту становлять при застосуванні РВГ 159 млн^{-1} і без застосування РВГ 1289 млн^{-1} . Дані значення максимальних рівноважних та нерівноважних концентрацій оксидів азоту набувають при максимальному значенні температури в циліндрі двигуна, що підтверджується загальноприйнятою термічною теорією утворення оксидів азоту.

Отримані розрахунки нерівноважних концентрацій оксидів азоту близькі до концентрацій оксидів азоту, які отримані під час експериментальних випробовувань двигуна (при роботі з РВГ $NO_x = 200 \text{ млн}^{-1}$, без РВГ $NO_x = 1090 \text{ млн}^{-1}$).

Проведені розрахунки показують, що більш точні дані по кількісній оцінці утворення оксидів азоту отримуються при розрахунку нерівноважних концентрацій оксидів азоту за біомолекулярним механізмом.

Таким чином, результати розрахунку утворення рівноважних та нерівноважних концентрацій оксидів азоту за біомолекулярним механізмом підтвердили ефективність застосування РВГ, як одного з методів зниження концентрацій оксидів азоту у ВГ двигуна при застосуванні КМРП.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: КОМБІНОВАНИЙ МЕТОД РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ, РЕЦИРКУЛЯЦІЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ, ОКСИДИ АЗОТУ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, БІМОЛЕКУЛЯРНИЙ МЕХАНІЗМ.

ABSTRACT

Gutarevich Y.F. Calculations effect of exhaust gas recirculation on formation of nitrogen oxides in the application of the combined method of power control of modern gasoline engine / Gutarevich Y.F., Karev S.V. // Visnyk NTU. – K.: NTU. – 2012. – Vol. 26.

The article shows the effects of exhaust gas recirculation (EGR) on the formation of nitrogen oxides in the application of the combined method of power control (CMPC).

Object of study – the petrol engine 6CH 9.5 / 6.98 with CMPC and EGR.

Purpose – to determine the effect of EGR on the formation of nitrogen oxides in modern gasoline engines with CMPC.

The results of calculation of equilibrium and non-equilibrium concentration of nitrogen oxides in the combustion process in the engine 6CH 9.5/6.98 when applying EGR with CMPC at operation $n = 2000 \text{ min}^{-1}$, $M_k = 30H \cdot m$, and the coefficient of exhaust gas recirculation $R_{EGR} = 11,5\%$. The calculation was performed for the bimolecular mechanism of nitrogen oxide

According to the results of the calculation of the maximum equilibrium concentration of nitrogen oxides are working with EGR 2021p.p.m., without EGR 3242p.p.m.. The maximum non-equilibrium concentration of nitrogen oxides in the application form EGR 159 p.p.m. and without the use of EGR 1289p.p.m.. These maximum values of equilibrium and non-equilibrium concentration of nitrogen oxides correspond to the maximum values of the temperature in the cylinder, which is confirmed by the conventional theory of the formation of thermal NOx.

The calculated equilibrium concentrations of nitrogen oxides are close to the concentrations of nitrogen oxides obtained during the pilot testing of the engine (when using EGR = 200 p.p.m., without EGR = 1090p.p.m.).

Our calculations show that more accurate data to quantify the formation of nitrogen oxides are obtained by calculating the equilibrium concentration of nitrogen oxides by bimolecular mechanism.

Thus, the results of calculations of the formation of equilibrium and non-equilibrium concentration of nitrogen oxides by bimolecular mechanism confirmed the effectiveness of the EGR, as a method of reducing the concentration of nitrogen oxides in the exhaust gas with the engine application CMPC.

KEY WORDS: COMBINED METHOD POWER CONTROL, EXHAUST GAS RECIRCULATION, NITRIC OXIDE, A MATHEMATICAL MODEL, THE BIMOLECULAR MECHANISM.

РЕФЕРАТ

Гутаревич Ю.Ф. Расчетные исследования влияния рециркуляции отработавших газов на образование оксидов азота при применении комбинированного метода регулирования мощности современного бензинового двигателя / Гутаревич Ю.Ф., Карев С.В. // Вестник НТУ. – К.: НТУ. – 2012. – Вып. 26.

В статье показано влияние рециркуляции отработавших газов (РОГ) на образование оксидов азота при применении комбинированного метода регулирования мощности (КМРМ).

Объект исследования – бензиновый двигатель 6Ч 9,5 / 6,98 с КМРМ и РОГ.

Цель работы – определение влияния РОГ на образование оксидов азота при применении КМРМ на современном бензиновом двигателе.

В статье приведены результаты расчета равновесных и неравновесных концентраций оксидов азота в процессе сгорания в двигателе 6Ч 9.5/6.98 при применении РОГ при КМРМ, при режиме работы $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $M_k = 30H \cdot m$ и коэффициенте рециркуляции ОГ $R_{OG} = 11,5\%$. Расчет проведен для бимолекулярного механизма образования оксидов азота

По результатам расчета максимальные равновесные концентрации оксидов азота составляют при работе с РОГ 2021 млн^{-1} , без РОГ 3242 млн^{-1} . Максимальные неравновесные концентрации оксидов азота составляют при применении РОГ 159 млн^{-1} и без применения РОГ 1289 млн^{-1} . Данные значения максимальных равновесных и неравновесных концентраций оксидов азота отвечают максимальным значениям температуры в цилиндре двигателя, что подтверждается общепринятой термической теорией образования оксидов азота.