

УДК 621.436

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СОДЕРЖАНИЯ ОКСИДА АЗОТА И АВТОМАТИЧЕСКАЯ РЕЦИРКУЛЯЦИЯ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Интыков Т.С., Жакенов А.Г., Жакенов Б.К., Кутенько С.Ю.

Карагандинский государственный технический университет, Караганда, e-mail: s.kutenko@kstu.

В статье представлена математическая модель эмиссии оксидов азота, которая позволяет при известном значении кмолей воды в цилиндре количественно оценить выброс оксидов азота. Определены трудности, влияющие на осуществление автоматического регулирования рециркуляцией отработавших газов на дизельных двигателях. Представлена принципиальная схема автоматического устройства частичной рециркуляции отработавших газов двигателя. Описана работа устройства на примере дизельного двигателя Д-240. Достоинство устройства по данной схеме в том, что оно работает только от одного датчика, каковым служит дифференциальный трансформатор, подвижный сердечник которого жестко связан с рейкой топливного насоса дизеля. Использование ферродинамического преобразователя, в качестве сравнительного органа, устраняет необходимость установки дополнительного датчика положения перепускной заслонки. Кроме этого схема проста по исполнению, т.к. она включает в себя малое количество комплектующих узлов и деталей, а, следовательно, более надежна в работе.

Ключевые слова: дизельный двигатель, отработавшие газы, оксиды азота, математическая модель, устройства очистки

CONTENTS DESIGN PROCEDURE OXIDE OF NITROGEN AND AUTOMATIC RECIRCULATION THE FULFILLED GASES OF DIESEL ENGINES

Intykov T.S., Zhakenov A.G., Zhakenov B.K., Kutenko S.J.

Karaganda State technical university, Karaganda, e-mail: s.kutenko@kstu

In article the mathematical model of issue of oxides of nitrogen which allows at known value of kmoly water in the cylinder quantitatively is presented to estimate emission of oxides of nitrogen. The difficulties influencing implementation of automatic control by recirculation of fulfilled gases on diesel engines are defined. The schematic diagram of the automatic device of partial recirculation of the fulfilled gases of engines is presented. Operation of the device on an example of the diesel D-240 engine is described. is more scarlet, and is therefore more reliable in work. Advantage of the device according to this scheme that it works only from one sensor to what the differential transformer which mobile core is rigidly connected with a lath of the fuel pump of a diesel engine serves. Use of the ferrodynamic converter, as comparative body, eliminates need of installation of the additional sensor of provision of a perepuskny zaslonka. Besides the scheme is simple on execution since it includes small number of completing knots and details, and is therefore more reliable in work.

Keywords: the diesel engine, the fulfilled gases, nitrogen oxides, mathematical model, cleaning devices

В настоящее время горнодобывающая промышленность во многом характеризуется использованием мощного самоходного оборудования с приводом от дизелей. Вопросы безопасности труда в нашей стране придается приоритетное значение. Ужесточаются требования по охране труда на пороге вступления Казахстана в ВТО. Многочисленными научно-исследовательскими институтами, производственными предприятиями и санитарно-эпидемиологическими учреждениями проведены целые комплексы исследований в этой области. В настоящее время создано большое разнообразие газоочистительной аппаратуры для двигателей внутреннего сгорания. Постоянно проводятся работы по изысканию путей, позволяющих снизить выход токсичных компонентов непосредственно из цилиндров дизеля. Использование этих мероприятий дает положительный эффект, однако и в этом случае в рудничную атмосферу выбрасываются вредные вещества в концентрациях, значительно превышающих санитарные нормы для рудничного воздуха. Это сильно

затрудняет эксплуатацию самоходного оборудования с приводом от дизелей, особенно при его массовом использовании, так как вынуждает подавать большое количество свежего воздуха для поддержания рудничной атмосферы в пределах санитарных норм. в некоторых горно-геологических условиях по этим причинам использование дизельного оборудования невозможно.

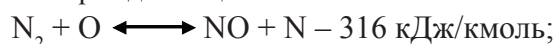
В связи с этим, для подземных рудников одной из задач первоочередной важности и в настоящее время остается изыскание, исследование и внедрение более эффективных способов и средств снижения токсичности отработавших газов дизельного оборудования. Более того, актуальность решения этой проблемы возрастает вследствие необходимости значительного расширения в ближайшем будущем области и объемов внедрения самоходного оборудования на предприятиях горнодобывающей промышленности.

Одним из ядовитых токсических компонентов отработавших газов в ДВС являются оксиды азота. Известно, что токсич-

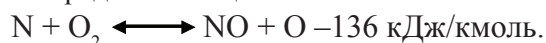
ность оксидов азота по действию на живой организм в 10 раз выше, чем токсичность угарного газа. При разработке модели образования оксидов азота было принято, что оксиды азота являются продуктом реакции окисления азота в зоне продуктов сгорания.

Окисление атмосферного и содержащегося в топливе азота происходит по цепному механизму:

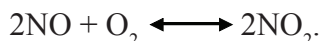
зарождение цепи



продолжение цепи



Определяющей является первая реакция, скорость которой зависит от концентрации в цилиндре дизеля атомарного кислорода. При максимальных температурах цикла в цилиндре двигателя образуется только оксид азота NO, который в выпускном тракте двигателя при наличии кислорода в ОГ окисляется до NO₂:



Рециркуляция увлажненных ОГ в цилиндры двигателя снижает образование оксидов азота. При определенном количестве молекул паров воды в цилиндре двигателя

$$M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{доп}} = 0,496 M_{\text{N}_2} \frac{1}{(1-X)} - (M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{сг}} + M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{влаж}}), \quad (2)$$

где M_{N_2} – часовой расход азота,

$$M_{\text{N}_2} = 0,79 \alpha^1 L_0 G_T. \quad (3)$$

Доля диссоциации паров воды находится из уравнения:

$$\frac{\sqrt{X^3}}{1-X} \cdot \sqrt{\frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{\sum M}} P_{\text{ср}} = K_p, \quad (4)$$

где $M_{\text{H}_2\text{O}}$ – суммарное количество паров воды, кмоль/ч; $\sum M$ – суммарное количество молей продуктов сгорания, которое приближенно определяется как сумма расхода двигателем воздуха и дополнительно подаваемой воды, кмоль/ч; $P_{\text{ср}}$ – среднее давление сгорания, МПа; K_p – константа равновесия диссоциации молекул воды приданной температуре.

Степень диссоциации паров воды также определяется, используя выражение:

$$K = \frac{\alpha^3 P}{(100-\alpha)^3 (200-\alpha)}, \quad (5)$$

где K – константа равновесия; P – парциальное давление, МПа.

Количество паров воды, получаемое при полном сгорании топлива при известном химическом составе по массе:

оксиды азота вообще образовываться не будут, так как молекулы воды будут надежно «защемлять» молекулы азота от столкновения с атомарным кислородом [1]. В то же время атомарный кислород быстро расходуется во взаимодействии с молекулами воды, образуя при этом насыщенную молекулу O₂ по схеме:



Для полного устранения образования оксидов азота необходимо в реагирующей смеси иметь такую концентрацию паров воды, которая располагала бы суммарным молекулярным эффективным сечением для соударений, равным или большим суммарного эффективного сечения молекул азота. Этот вывод можно записать в виде неравенства:

$$\sigma_{\text{N}_2} \cdot N_2 \leq \sigma_{\text{H}_2\text{O}} \cdot N_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (1)$$

где σ_{N_2} и $\sigma_{\text{H}_2\text{O}}$ – эффективное сечение молекул азота и воды; N_2 и $N_{\text{H}_2\text{O}}$ – концентрация молекул азота и воды.

Окончательная формула определения количества подаваемой воды в цилиндры двигателя для полного устранения образования оксидов азота имеет вид:

$$M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{сг}} = \frac{H}{2G_T} \quad (6)$$

и при известной молекулярной массе топлива:

$$M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{сг}} = 15 \frac{G_T}{m_T}. \quad (7)$$

Количество молей воды, поступающих с влажным воздухом:

$$M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{сг}} = \alpha L_0 G_T. \quad (8)$$

Влагосодержание окружающего воздуха при заданной температуре определяется с использованием выражения:

$$d_0 = 0,622 \frac{P_n}{B_0 - P_n}. \quad (9)$$

Давление насыщенного водяного пара определяется с использованием выражения:

$$P_H = \exp \left(13,54 - \frac{5054}{T} + \ln P_0 \right). \quad (10)$$

При известных количествах дополнительно подаваемой в цилиндры двигателя воды, можно определить число «нейтрализованных» молей азота. Обозначим их через $[M_{\text{N}_2}]$, тогда:

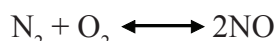
$$[M_{N_2}] = \frac{(M_{H_2O}^{доп} + M_{H_2O}^{CF} + M_{H_2O}^{влаж})(1-X)}{0,496}. \quad (11)$$

Количество молей азота, «способных» образовывать оксиды, определится как разность $(M_{N_2} - [M_{N_2}])$.

Количество молей кислорода определим по выражению

$$M_{O_2} = 0,21(\alpha - 1)L_0 G_T. \quad (12)$$

При проведении расчетов по образованию оксидов азота примем бимолекулярную реакцию



При условии достижения равновесия скорости прямой и обратной реакции, кинетическое уравнение равновесных концентраций оксида азота будет иметь вид:

$$K_1 \left(M_{N_2} - \frac{M_{NO}}{2} \right) \left(M_{O_2} - \frac{M_{NO}}{2} \right) = K_2 M_{NO}^2. \quad (13)$$

Приняв выражение для констант равновесия, получим:

$$K \left(M_{N_2} - \frac{M_{NO}}{2} \right) \left(M_{O_2} - \frac{M_{NO}}{2} \right) = M_{NO}^2. \quad (14)$$

После преобразования выражения оно приводится к виду квадратного уравнения:

$$aM_{NO}^2 + bM_{NO} - c = 0, \quad (15)$$

где

$$a = 1 - \frac{k}{4}; \quad (16)$$

$$b = \frac{k}{2}(M_{N_2} - M_{O_2}); \quad (17)$$

$$c = k(M_{N_2} \times M_{O_2}), \quad (18)$$

где $k = 21,12 e^{\frac{43260}{RT}}$, см³/(моль·с); T – результирующая температура цикла.

Подставляя в уравнение значения общего количества кмоль азота и количества кмоль «способных» к образованию оксидов и решив квадратное уравнение, определим содержание кмоль оксида азота в отработавших газах при работе дизеля без рециркуляции и с рециркуляцией увлажненных отработавших газов.

Таким образом, по данной математической модели, зная наличие кмоль воды в цилиндре дизеля, можно количественно оценить выброс оксидов азота при работе его по любому из ранее перечисленных процессов.

Осуществление автоматического регулирования рециркуляцией отработавших газов (ОГ) на дизельных двигателях представляет ряд трудностей:

во-первых, в выборе способа управления перепускным органом;

во-вторых, в определении требуемого закона регулирования, который обеспечил бы оптимальную рециркуляцию ОГ;

в-третьих, в создании устройства, позволяющего осуществить такое регулирование на реальной машине. При этом необходимо учесть, что рециркуляция ОГ будет оптимальной только в том случае, если удастся создать устройство, которое обеспечивало бы определенный и постоянный избыток кислорода в цилиндрах дизеля на всех возможных режимах его работы.

Таким образом, разработка автоматического устройства частичной рециркуляции ОГ для дизеля Д-240 должна включать в себя ряд последовательных этапов, обеспечивающих создание работоспособной конструкции для использования ее непосредственно на подземной машине.

Выбор способа управления рециркуляцией ОГ и рациональной схемы устройства основывался на технико-экономическом анализе работ по автоматическому регулированию рециркуляцией ОГ на дизельных двигателях. При этом определено, что наилучшим способом управления рециркуляцией ОГ является способ управления по положению рейки топливного насоса, косвенно определяющего нагрузку на дизеле.

Возможность управления рециркуляцией ОГ в зависимости от хода рейки топливного насоса подтверждается в ряде работ и обусловлено тем, что характер изменения параметров рабочего процесса и токсичности ОГ при рециркуляции мало зависит от скоростного режима работы дизеля и определяется, в основном, нагрузкой на двигателе и количеством перепускаемых газов. При этом само устройство должно удовлетворять следующим требованиям:

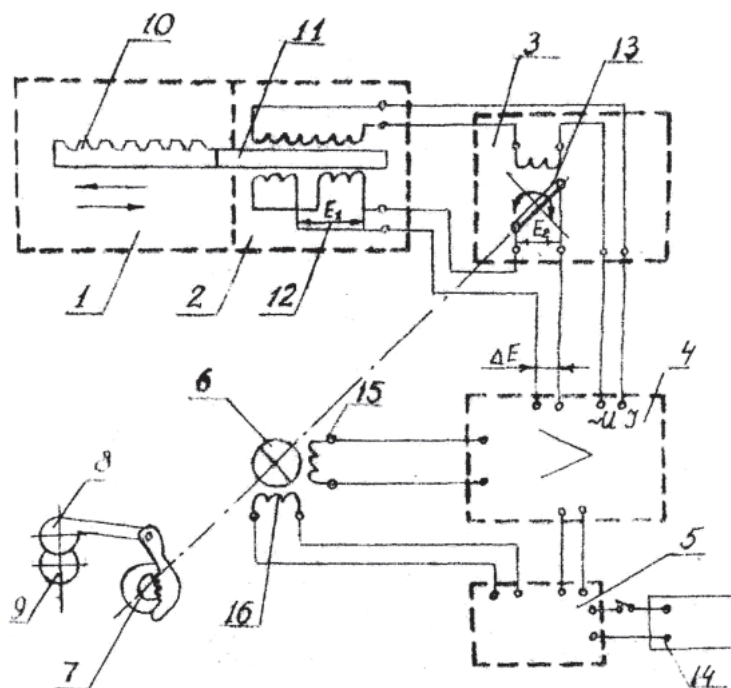
- регулирование рециркуляцией ОГ должно осуществляться по заданному закону в зависимости от хода рейки топливного насоса дизеля;

- компактность и простота конструкции;
- надежность и безопасность при эксплуатации.

Наиболее приемлемой является схема автоматического устройства частичной рециркуляции отработавших газов дизеля, представленная на рисунке. Устройство состоит из датчика, выполненного в виде дифференциального трансформатора (ДТ) 2, подвижный сердечник 11 которого взаимодействует с рейкой топливного насоса, фер-

родинамического преобразователя (ПФ) 3 с подвижной рамкой 13; усилителя 4; преобразователя напряжения 5; реверсивного двигателя 6; кинематической передачи 7 и перепускной заслонки 8, встроенной в перепускную трубу 9. Реверсивный двигатель, перепускная заслонка и рамка ПФ

кинематически связаны между собой, поэтому ферродинамический преобразователь в схеме выполняет роль сравнительного устройства, следящего за перемещением рейки топливного насоса дизеля и положением, в котором находится перепускная заслонка.



Принципиальная схема автоматического устройства частичной рециркуляции отработавших газов ДВС:

1 – топливный насос, 2 – дифференциальный трансформатор, 3 – ферродинамический трансформатор, 4 – усилитель, 5 – преобразователь напряжения, 6 – реверсивный двигатель, 7 – кинематическая передача, 8 – перепускная заслонка, 9 – перепускная труба, 10 – рейка топливного насоса, 11 – подвижный сердечник, 12 – вторичная обмотка трансформатора, 13 – рамка, 14 – аккумуляторы, 15, 16 – обмотка реверсивного двигателя

Автоматическая рециркуляция осуществляется следующим образом: при питании первичных обмоток ДТ и ПФ переменным током от преобразователя напряжения 5 во вторичной обмотке 12 ДТ и рамке 13 ПФ индуцируются переменные напряжения, величина и фаза которых зависят от положения сердечника 11 и рамки 13. При рассогласованных положениях сердечника 11 и рамки 13, за счет перемещения рейки 10 топливного насоса 1 с изменением нагрузки на дизеле, напряжения индуцируемые во вторичной обмотке ДТ и рамке ПФ не будут равны друг другу и на вход усилителя 4 будет подаваться напряжение (равное разности указанных напряжений), величина и фаза которого зависит от величины и направления рассогласования. Это переменное напряжение, усиленное электронным усилителем 4, подается на управляющую обмотку реверсивного двигателя 6.

Электродвигатель, обрабатывая поступивший сигнал, поворачивает с помощью кинематической связи перепускную заслонку 8 и рамку 13 ПФ до момента нового согласования положения сердечника 11 и рамки 13, т.е. до получения равенства напряжений, индуцируемых во вторичной обмотке 12 ДТ и рамке 13 ПФ (поворот реверсивного двигателя в ту или иную сторону зависит от фазы напряжения рассогласования). Таким образом, каждому положению подвижного сердечника 11 ДТ, определяемому перемещением рейки 10 топливного насоса дизеля, соответствует свое строго определенное положение рамки 13 ПФ и перепускной заслонки 8, управляющей рециркуляцией ОГ. Питание электрической схемы осуществляется от аккумуляторных батарей 14 через преобразователь напряжения 5. Напряжение питания не менее 110 В.

Достоинство устройства по данной схеме в том, что оно работает только от одного датчика, каковым служит дифференциальный трансформатор, подвижный сердечник которого жестко связан с рейкой топливного насоса дизеля. Использование ферродинамического преобразователя, в качестве сравнительного органа, устраняет необходимость установки дополнительного датчика положения перепускной заслонки. Кроме этого схема проста по исполнению, т.к. она включает в себя малое количество комплектующих узлов и деталей, а, следовательно, более надежна в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хриновский З.А. Предотвращение окисления азота при сгорании топливно-воздушных смесей в двигателях / Тр. ТНIIМСХ. – Вып. 87 – Ташкент, 1976. – С.72–87.
2. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1971. – 160 с.
3. Кульчинский А.Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей: учебное пособие для студентов вузов. – М.: Акад. Проект, 2004. – 400 с.
4. Исследование параметров рециркуляции увлажненных газов дизеля Д-240 // Отчет, тема 27-81-39.инв. № 02812005738 // ЖезказганНИПИцветмет. – 1981. – 67 с.
5. А.С. 1265387 СССР. Прямоточный монациклон / У.А. Абдулгасис, В.А. Негматов, В.Г. Дьяченко; опубл. 1986, Бюл. № 39. – 2с: ил.