

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АВТОТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ НА ВЫБРОСЫ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ С ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ

*Марченко А.П., доктор технических наук, Парсаданов И.В., доктор технических наук,  
Поливянчук А.П., кандидат технических наук*

*Наведені принцип дії та методика випробування мікротунеля МКТ- 2 для контролю масових викидів дизельних твердих часток. Наведено результати експериментальних досліджень впливу частоти обертання колінчатого вала двигуна та навантаження на концентрацію, масові і питомі викиди твердих частинок з відпрацьованими газами дизеля 4ЧН/12/14.*

*The principle of action and technique of use a model sample microtunnel MKT-2 for control of mass emissions diesel particles are described. The results of experimental studies of the effect of speed and load on the motor shaft on the concentration, mass and specific emissions of particulate matter from diesel 4CH/12/14 exhaust gases are given.*

С введением экологических норм EURO в странах Европейского Союза начали действовать ограничения на массовые выбросы твердых частиц (ТЧ) с отработавшими газами дизелей. В результате поэтапного ужесточения к 2009 году допустимый уровень выбросов ТЧ снизился наиболее существенно по сравнению с другими показателями токсичности дизелей. Для двигателей легковых автомобилей – с 0,14 до 0,005 г/км (в 28 раз), для двигателей грузовых автомобилей – с 0,36 до 0,02 г/кВт·ч (в 18 раз).

Для измерения массовых выбросов ТЧ необходимо специальное дорогостоящее оборудование, которое в Украине не производится. Вместе с тем, отечественное двигателестроение испытывают острую потребность в данном оборудовании, поскольку экологическими стандартами предусматривается нормирование массовых выбросов ТЧ дизелей, а спектр двигателей, в отношении которых действуют данные нормы, постоянно расширяется.

В Восточно-украинском национальном университете им. В. Даля разработана и изготовлена система контроля выбросов ТЧ – макетный образец микротуннеля МКТ-2 [1]. Данная система была установлена на испытательный стенд автотракторного дизеля 4ЧН12/14 (СМД-23) научно-исследовательской лаборатории кафедры ДВС Национального технического университета «ХПИ», на котором проведены исследования по оценке влияния режимов работы дизеля на выбросы ТЧ с отработавшими газами.

### **Постановка задачи**

Целью исследований являлось экспериментальное определение выброса ТЧ с отработавшими газами (ОГ) и анализ зависимостей, описывающих влияние частоты вращения коленчатого вала дизеля и нагрузки, на концентрацию, массовый и удельный выбросы ТЧ.

Для достижения указанной цели решены следующие задачи:

1. Выбраны режимы работы и проведены экспериментальные исследования дизеля с определением в ОГ концентрации, массовых и удельных выбросов ТЧ.
2. В результате обработки и анализа экспериментальных данных получены уравнения регрессии, устанавливающие зависимость влияния частоты вращения коленчатого вала ( $n$ ) и нагрузки ( $L$ ) на выбросы ТЧ.

### **Методика измерений выбросов ТЧ с помощью микротуннеля МКТ-2**

Микротуннель МКТ-2 (рис. 1) – измерительная система, разработанная в соответствии с требованиями международных стандартов [2,3], принцип действия которой состоит в следующем.

Часть ОГ с массовым расходом  $G_{\text{exh}}^t$  отбирается из выпускной системы двигателя и подается в разбавляющий туннель, где происходит их смешивание с атмосферным воздухом. Этим обеспечивается имитация естественного процесса разбавления ОГ, которые выбрасываются дизелем в атмосферу. Из туннеля поток разбавленных ОГ с массовым расходом  $G_{\text{sam}}$  через один из шаровых кранов поступает либо в байпасную магистраль, либо в рабочий канал, в котором установлен патрон с фильтрами для отбора ТЧ.

При подготовке пробы к анализу открыт кран К1 и разбавленные ОГ протекают через байпасную магистраль. С помощью дросселя Д обеспечивается регулировка давления в данной магистрали таким образом, чтобы в момент переключения кранов не возникало гидравлического удара. При выполнении процедуры отбора проб ТЧ открыт кран К2 и вся проба разбавленных ОГ протекает через фильтры. При этом фиксируется продолжительность данной процедуры -  $\tau_{\text{sam}}$ .

Отношение массовых расходов  $G_{sam}$  и  $G_{exh}^t$ , называемое коэффициентом разбавления ОГ ( $q$ ), в ходе испытаний устанавливается таким, чтобы температура пробы перед фильтрами  $t_f$  не превышала  $52\text{ }^\circ\text{C}$ .

После завершения испытаний измеряется масса ТЧ ( $M_f, \text{мг}$ ), как прирост массы рабочих фильтров за время испытаний. Перед взвешиванием фильтры стабилизируются в специальной камере. Для контроля параметров  $G_{sam}$ ,  $G_{exh}^t$ ,  $\tau_{sam}$ ,  $t_f$  и управления шаровыми кранами К1 и К2 используется микропроцессорный блок, связанный с компьютером. По результатам испытаний вычисляются:

$$\text{– массовые выбросы ТЧ, } PT_{mi} = \frac{M_{fi}}{M_{sami}} \cdot q_i \cdot G_{exhi}, \text{ г/ч,}$$

где  $i$  – индекс режима;  $M_{sami} = G_{sami} \cdot \tau_{sami}$  – масса разбавленных ОГ, прошедших через фильтры, г;  $G_{exhi}$  – массовый расход ОГ в выхлопной системе дизеля, кг/ч;

$$\text{– удельные выбросы ТЧ, } PT_i = \frac{PT_{mi}}{N_{ei}}, \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч),}$$

где  $N_{ei}$  – эффективная мощность дизеля на  $i$ -м режиме, кВт;

– концентрации ТЧ в ОГ дизеля, приведенные к нормальным условиям (н.у.),

$$C_{mci} = \frac{PT_{mi}}{G_{exhi}} \cdot \rho_{exhi}, \text{ г/м}^3,$$

где  $\rho_{exhi}$  – плотность ОГ при н.у., кг/м<sup>3</sup>.

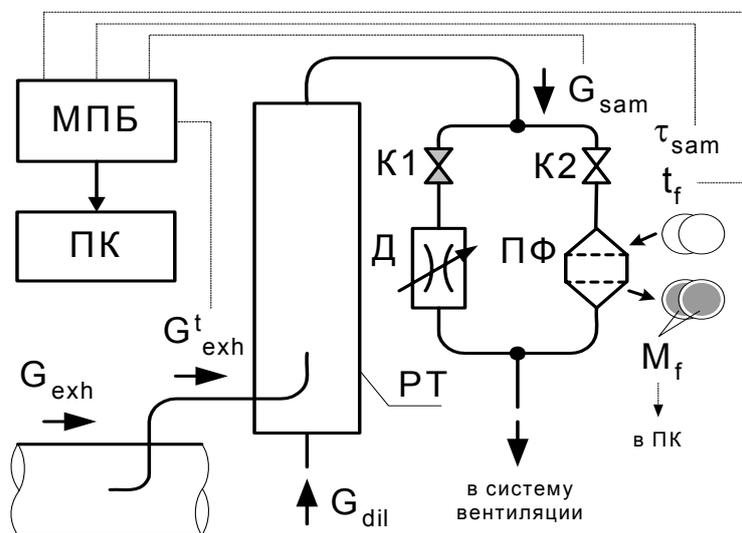


Рис. 1 Принципиальная схема микротуннеля МКТ-2:

МПБ – микропроцессорный блок; ПК – персональный компьютер; PT – разбавляющий туннель; К1, К2 – шаровые краны; Д – дроссель; ПФ – патрон с фильтрами для отбора ТЧ.

Монтаж МКТ-2 на испытательном стенде дизеля 4ЧН12/14 (рис. 2) проведен в соответствии с установленными требованиями. Пробоотборник ТЧ расположен на осевой линии прямолинейного участка выхлопной трубы двигателя и направлен навстречу потоку ОГ; расстояния до ближайших гидравлических сопротивлений соответствуют требуемым значениям (6 диаметров трубопровода перед пробоотборником ТЧ и 3 – за ним).

### Выбор контрольных режимов испытаний, измерение выбросов и концентраций ТЧ

При выборе контрольных режимов работы дизеля использовался принцип максимального отображения в ходе испытаний диапазонов  $n$  и  $L$  при равномерном характере их изменения. В результате был выбран 2-факторный план  $3 \times 4$  (12 режимов испытаний) с 3-мя уровнями варьирования параметра  $n$  – 1000, 1500 и 2000 мин<sup>-1</sup> и 4-мя уровнями варьирования  $L$  – 25, 50, 75 и 100% для каждого скоростного режима. С помощью МКТ-2 на каждом контрольном режиме были определены: массовый, удельный выбросы и концентрация ТЧ.

Погрешность измерительного комплекса при определении контролируемых величин на режимах с нагрузкой 50-100% составила 4...7% и 14...17% на режимах с нагрузкой 25% (при малом содержании ТЧ в ОГ. Средние погрешности измерений величин  $PT_m$ ,  $PT$  и  $C_{Tч}$  составили 8...10% или  $\pm 1,78$  г/ч,  $\pm 0,04$  г/кВт\*ч и  $\pm 0,005$  г/м<sup>3</sup>, соответственно.

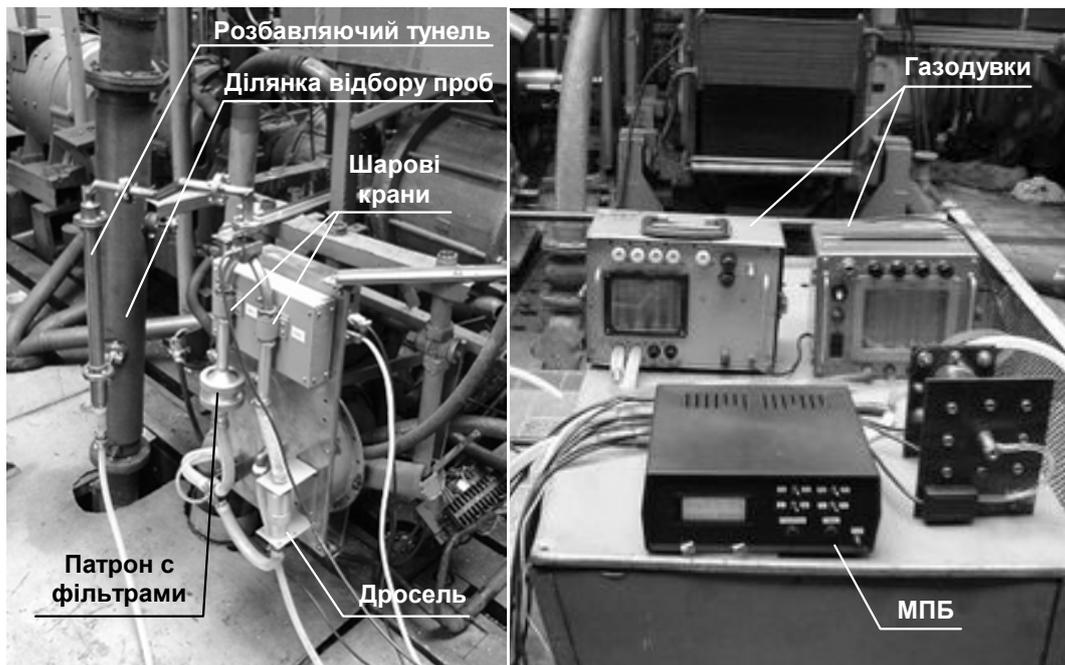


Рис. 2 Монтаж МКТ-2 на испытательном стенде дизеля СМД-23

### Установление зависимостей массового, удельного выбросов и концентрации ТЧ от параметров $n$ и $L$

Полученные экспериментальные данные о выбросах и концентрациях ТЧ на контрольных режимах испытаний использовались для определения регрессионных зависимостей:

$$Y = f(n, L),$$

где  $Y$  – обобщенное обозначение контролируемой величины -  $PT_m$ ,  $PT$  и  $C_{Tч}$ ;  $f(n, L)$  – уравнение регрессии, функция 2-х переменных –  $n$  и  $L$ .

Так как вид уравнения регрессии, обеспечивающего достаточную точность, не был известен заранее, то рассматривались 3 зависимости, из которых была выбрана наиболее достоверная:

– зависимость 1,  $Y = K_1 \cdot f_n(Y) \cdot f_L(Y)$ , (1)

где  $K_1$  – постоянный коэффициент;  $f_n(Y)$  и  $f_L(Y)$  – функции одной переменной, характеризующие влияние каждого из параметров  $n$  и  $L$  на величину  $Y$ ;

– зависимость 2,  $Y = K_2 + f_n(Y) + f_L(Y)$ , (2)

где  $K_2$  – постоянный коэффициент;

– зависимость 3,  $Y = A_0 + A_1 \cdot n + A_2 \cdot L + A_{11} \cdot n^2 + A_{22} \cdot L^2 + A_{12} \cdot n \cdot L$ , (3)

где  $A_0, A_1, A_2, A_{11}, A_{22}, A_{12}$  – постоянные коэффициенты.

Выбор указанных зависимостей обусловлен широким спектром их применения, простотой определения и удобством использования при анализе и расчетных исследованиях. В работе [4] показано, что при вычислениях топливно-экономических показателей ДВС по результатам многофакторного эксперимента может использоваться зависимость (1).

В качестве критериев точности каждой зависимости рассматривались среднеквадратичные отклонения (СКО) расчетных данных от соответствующих экспериментальных значений, выраженные в абсолютных единицах (с размерностью величины  $Y$ ) –  $S_Y$  и в относительных единицах (%) –  $s_Y$ :

$$S_Y = \left( \left( \frac{\sum_{i=1}^m (Y_{pi} - Y_i)^2}{m(m-1)} \right)^{0,5} \right), \quad (4)$$

где  $Y_{pi}$  – значение величины  $Y$ , вычисленное с помощью уравнения регрессии на  $i$ -м режиме;  $Y_i$  – экспериментальное значение величины  $Y$  на  $i$ -м режиме;  $m = 12$  – количество режимов испытаний;

$$s_Y = (S_Y / Y_{cp}) \cdot 100\%. \quad (5)$$

Здесь,  $Y_{cp}$  – средние значения величины  $Y$  в ходе эксперимента, равные для  $PT_m$ ,  $PT$  и  $C_{Tч}$  17,85 г/ч, 0,411 г/кВт\*ч и 0,052 г/мн<sup>3</sup>, соответственно.

Коэффициенты  $K_1$ ,  $K_2$  и функции  $f_n(Y)$ ,  $f_L(Y)$ , входящие в выражения (1) и (2), были определены по методике, изложенной в работе [4], а для вычисления коэффициентов  $A_i$  зависимости (3) использована методика, представленная в работе [5] (рис. 3, 4).

Для каждой зависимости (1) – (3) с помощью выражений (4) и (5) были определены значения СКО –  $S_Y$  и  $s_Y$ .

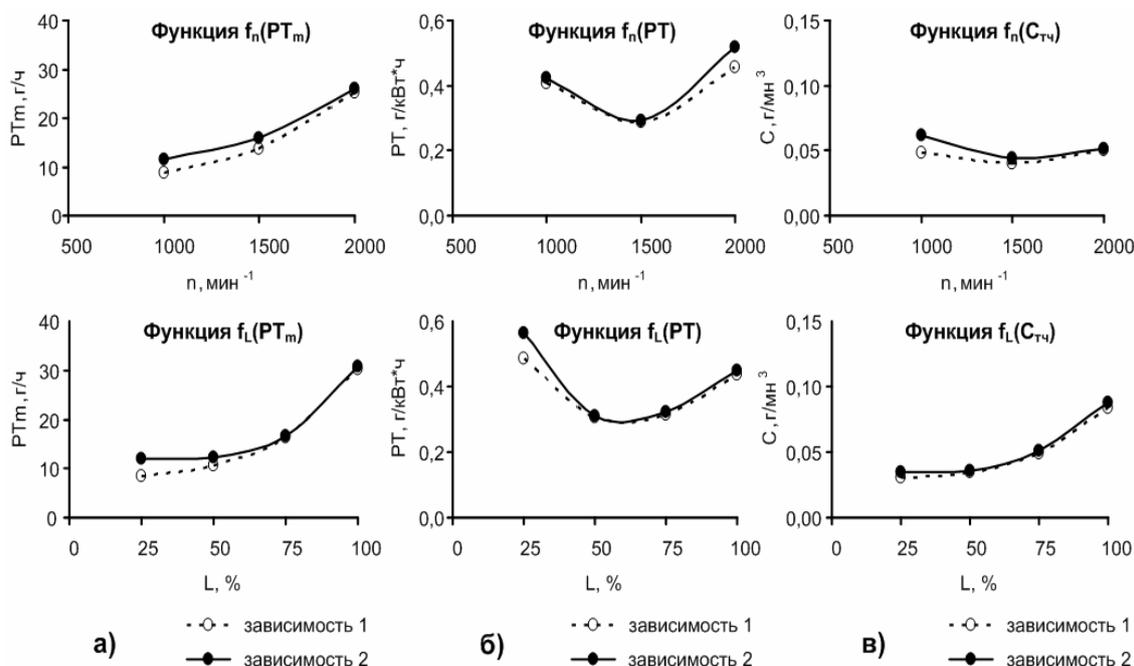


Рис. 3. Функции одной переменной  $f_n(Y)$  и  $f_L(Y)$ , характеризующие влияние  $n$  и  $L$  на: а) массовый выброс –  $PT_m$ ; б) удельный выброс –  $PT$ ; в) концентрацию –  $C_{Tч}$ .

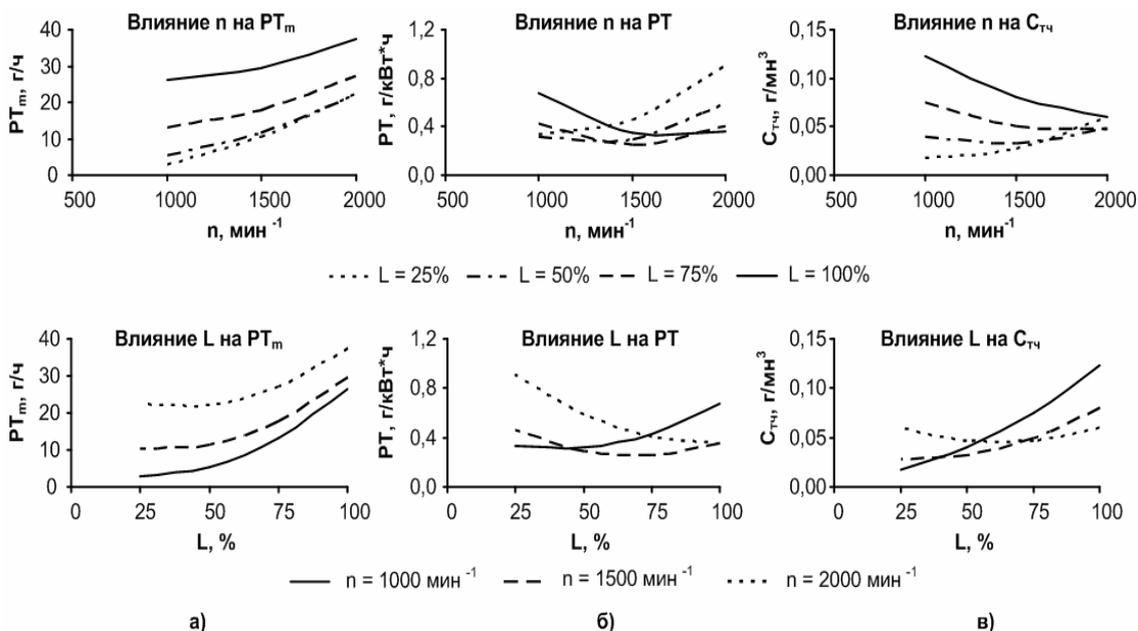


Рис 4. Уравнения регрессии в виде полиномов 2-й степени для оценки: а) массового выброса ТЧ –  $PT_m$ ; б) удельного выброса ТЧ –  $PT$ ; в) концентрации ТЧ –  $C_{Tч}$ .

Результаты исследования показали, что зависимости 1 и 2 не обладают достаточной точностью, так как значения  $s_Y$  для них составляют 29,3...38,6% (за исключением значения  $s_{PT_m} = 14,1\%$  для зависимости 2). Для полиномиальной зависимости 3 значения  $s_{PT_m}$  и  $s_{C_{Tч}}$  сопоставимы со средней погрешностью эксперимента, а значение  $s_{PT}$  превышает ее в 1,9 раза. Таким образом, из 3-х рассмотренных зависимостей наиболее достоверной является полином 2-й степени (3), который использовался для проведения дальнейшего анализа (см. рис. 4).

Следует отметить, что полиномиальная зависимость (3) позволяет достаточно точно оценивать влияние параметров  $n$  и  $L$  на величины  $PT_m$  и  $C_{Tч}$  и может использоваться для приближенной оценки значений величины  $PT$ .

#### **Анализ влияния параметров $n$ и $L$ на выбросы и концентрации ТЧ**

Анализ графиков, представленных на рис. 4, показывает:

– массовый выброс ТЧ –  $PT_m$  с увеличением  $n$  с 1000 до 2000  $\text{мин}^{-1}$  при фиксированном значении  $L$  возрастает по близкой к линейной зависимости с угловым коэффициентом 0,015 (г/ч)/ $\text{мин}^{-1}$ ; увеличение  $L$  с 25 до 60% мало сказывается на росте  $PT_m$ , но возрастание нагрузки в диапазоне в диапазоне 60...100% приводит к существенному росту выброса ТЧ; минимальное значение  $PT_m$  – 3,0 г/ч наблюдается при  $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ ,  $L = 25\%$ , максимальное – 37,4 г/ч – при  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ ,  $L = 100\%$ ;

– удельный выброс ТЧ –  $PT$  при возрастании  $n$  с 1000 до 2000  $\text{мин}^{-1}$  изменяется в зависимости от величины нагрузки: при  $L = 25\%$  - возрастает от 0,34 до 0,91 г/кВт\*ч, при  $L = 100\%$  - убывает от 0,67 до 0,36 г/кВт\*ч; при этом с ростом  $L$  от 25 до 100% возрастающая зависимость  $PT$  от  $n$  плавно переходит в убывающую; минимальное значение  $PT$  (0,25 г/кВт\*ч) наблюдается при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ ,  $L = 75\%$ , максимальное (0,91 г/кВт\*ч) – при  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ ,  $L = 25\%$ ;

– концентрация ТЧ –  $C_{Tч}$  при увеличении  $n$  с 1000 до 2000  $\text{мин}^{-1}$  изменяется в зависимости от значения нагрузки: при  $L = 25\%$  - возрастает от 0,02 (минимальное значение) до 0,06 г/м<sup>3</sup>, при  $L = 100\%$  - убывает от 0,12 (максимальное значение) до 0,06 г/м<sup>3</sup>; при этом с ростом  $L$  от 25 до 100% возрастающая зависимость  $C_{Tч}$  от  $n$  плавно переходит в убывающую.

Результаты сделанного анализа позволяют повысить точность измерений выбросов ТЧ путем корректировки продолжительности отбора проб ТЧ с учетом их содержания в ОГ дизеля: при малом содержании ТЧ данная продолжительность должна увеличиваться, при значительном содержании ТЧ – сокращаться.

#### **Выводы**

В результате проведенных исследований автотракторного дизеля на выбранных режимах работы получены уравнения регрессии в виде полиномов 2-й степени, описывающие влияние числа оборотов  $n$  и нагрузки  $L$  на массовый выброс, удельный выброс и концентрацию ТЧ в отработавших газах. СКО полиномов составили:  $s_{PT_m} = 11,3\%$ ,  $s_{PT} = 18,8\%$ ,  $s_{C_{Tч}} = 8,1\%$ . Средняя погрешность эксперимента составляет 8...10%.

Полученные уравнения регрессии позволяют повысить точность измерений выбросов ТЧ с отработавшими газами дизеля путем корректировки продолжительности отбора проб с учетом их содержания в ОГ.

#### **Литература**

1. Звонов В.А., Марченко А.П., Парсаданов И.В., Поливянчук А.П. Оценка выбросов твердых частиц с отработавшими газами автотракторного дизеля // Двигатели внутреннего сгорания // Научно-технический журнал. Харьков: НТУ "ХПИ". - 2006. - № 2 - С. 64–67.
2. Regulation № 49. Revision 2. Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) engines and vehicles equipped with C.I. engines with the regard to the emission of pollutants by the engine. Geneva, 1992. - 114 p.
3. ISO 8178. Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part 1: Test – bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions, 1996. – 94 p.
4. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. М.: «Мир», 1972. - 382 с.
5. Рафалес-Ламарка Э.Э. Инструкция по планированию эксперимента. – Луганск, Укр. проектно-констр. и научно-исслед. ин-т «УкрНИИУглеобогачение», 1969. – 126 с.