

ВЛИЯНИЕ НА СТЕПЕНТА НА РЕЦИРКУЛАЦИЯ НА ОТРАБОТИЛИТЕ ГАЗОВЕ ВЪРХУ ОБРАЗУВАНЕТО НА АЗОТНИ ОКСИДИ (NO_x) В ЦИЛИНДРИТЕ НА ДИЗЕЛОВИТЕ ДВИГАТЕЛИ С ВЪТРЕШНО ГОРЕНЕ

INFLUENCE OF EXHAUST GASES RECIRCULATION RATE ON NO_x FORMATION IN DIESEL ENGINES

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ РЕЦИРКУЛАЦИЯ ОТРАБОТЕННЫХ ГАЗОВ ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЙ АЗОТНОГО ОКСИДА В ЦИЛИНДРЫ ДИЗЕЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Eng. Punov P., Ass. Prof. Dr. Eng. Evtimov T.
Technical University – Sofia, Bulgaria

Abstract: The publication described the reasons for the formation of NO_x in diesel engines and methods for their reduction. Described are various systems of EGR. Made a model of a diesel engine by Ricardo Wave software. Theoretically investigated the influence of EGR rate on the specific quantity of nitrogen oxides and specific fuel consumption. A survey was made with three different values of fuel/air ratio and 2500rpm. Finally a comparison of the engine power, specific NO_x quantity and fuel/air ratio.

KEYWORDS: DIESEL ENGINES, NITROGEN OXID FORMATION, EGR, THEORETICAL MODEL

1. Въведение.

Използването на електронно управляеми горивовпръскащи системи при съвременните дизелови двигатели повишава качеството на смесообразуване и термичния к.п.д. на работния цикъл, но от друга страна повишените стойности на налягане и температура в цилиндъра водят до образуване на по-големи количества азотни окиси. Това са силно токсични химични съединения, които заедно с въглеродородите участват в образуването на киселини в атмосферата и причиняват образуването на киселинните дъждове. Азотните окиси, образуващи се в цилиндрите на двигателите се състоят основно от NO (около 90%) и NO_2 и най-общо се отбелязват с NO_x [1]. Те се образуват зад фронта на пламъка, в зоната на продуктите на горенето. За да може да се образуват азотни окиси са необходими: висока температура (над 1500°C) и наличие на свободни кислород и азот в горивната камера. При тези условия молекулите на азота и кислорода дисоциират и азота става реакциоспособен. Тъй като дизеловите двигатели работят с бедни горивовъздушни смеси ($\alpha > 1$) в цялото си работно поле по всяко време е изпълнено условието за наличие на свободен кислород, но образуването на азотни окиси се осъществява основно в режимите на средно и пълно натоварване, когато се повишава температурата в горивната камера. Нивата на отделяните в атмосферата NO_x от леките автомобили са лимитирани от Европейските норми за съдържание на токсични компоненти в отработилите газове на дизеловите двигатели „Евро“. Нивата на съдържание непрекъснато се намаляват като за Евро 5 (действащите норми от 2009г.) допустимото съдържание на азотни окиси е намалено от 0,25 г/км при Евро 4 на 0,18 г/км, а с влизането в сила на нормите Евро 6 през 2014 се предвижда нивата да се намалят до 0,08 г/км [2]. Тези рестриктивни законодателни мерки налагат извършването на задълбочена изследователска дейност с цел да се оптимизират работните процеси в дизеловите двигатели и да се търсят нови решения за намаляване на токсичните компоненти в отработилите газове.

Намаляването на количествата отделяни азотни окиси от дизеловите двигатели се постигна основно чрез системи за рециркулация на отработилите газове или чрез системи за неутрализирането им в изпускателните системи, работещи на принципа на селективна каталитична редукция (SCR) [3].

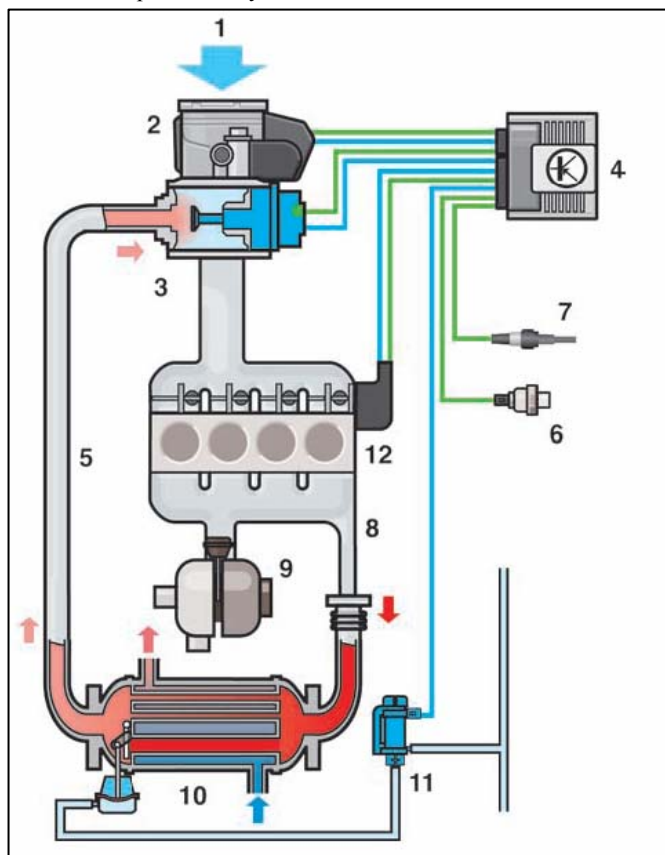
2. Неутрализиране на азотните окиси чрез рециркулация на отработилите газове.

Тъй като дизеловите двигатели работят в цялото си работно поле с бедни горивовъздушни смеси, т.е. в горивната

камера винаги има излишен кислород, образуването на азотни окиси може да бъде контролирано само чрез намаляване на максималните стойности на температурата по време на горенето. Най-често понижаването на температурите се постига чрез използване на системи за рециркулация. Това са прости системи, с помощта на които част от отработилите газове се връщат в пълнителната система на двигателите и от там отново постъпват в цилиндрите. Отработилите газове се състоят основно от инертни газове, като въглероден двуокис и водна пара, които не могат да участват в горивния процес и забавят окислителните реакции. Това заедно с намаленото количество кислород, което постъпва за сметка на отработили газове, понижавайки максималните температури води и до намаляване на образуващите се азотни окиси.

Рециркулацията на отработилите газове бива два типа: вътрешна и външна [2]. Вътрешната рециркулация се постига, като се подберат по подходящ начин моментите на затваряне на изпускателните и на отваряне на пълнителните клапани. Обикновено увеличаването на продължителността на припокриване на клапаните около ГМП води до повишаване на количеството отработили газове, които остават в горивната камера и участват в образуването на работното вещество за следващия работен цикъл. Външната рециркулация се осъществява, като част от отработилите газове се отклоняват от изпускателната система и през външен тръбопровод се подават в пълнителния колектор. Количеството на отработилите газове, което се връща в пълнителната система се управлява от електронният блок за управления на двигателя посредством електрически клапани. Предимството на външната рециркулация, е че може точно да се контролира количеството на отработилите газове пропускани към пълнителната система. През последните години, за да се подобри ефекта от рециркулацията се прилагат системи за охлаждане на газовете преди тяхното постъпване в пълнителния колектор. Като охлаждащ флуид се използва охладителната течност на двигателя и по този начин допълнително се намалява температурата на работното вещество, постъпващо в цилиндрите. На *fig.1* е дадена принципната схема на система за рециркулация с охлаждане на отработилите газове [4]. Подобна система води до повишаване с около 15-20% на отделената топлина към охладителната система, което налага да се повиши обема на охладителната течност и охладителната способност на радиатора. Когато се използва охладждане на отработилите газове обикновено радиаторът се изработва с байпасен канал, проходното сечение на който се управлява с помощта на клапа, задвижвана от пневмо-електрическа система. Когато двигателят не е достигнал определена работна тем-

пература отработилите газове се подават през байпасния канал, в обход на радиатора, като по този начин се намалява времето за подгряването му.



Фиг. 1. Система за рецикулация с охлаждане на отработилите газове.

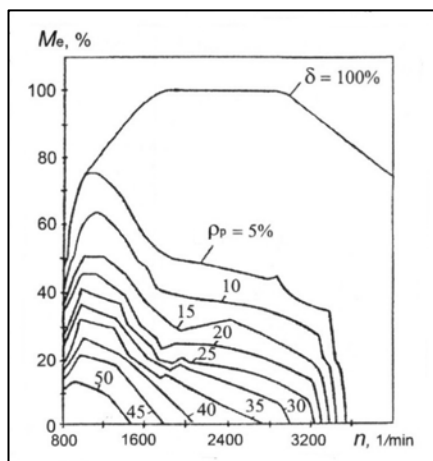
1- Вход на въздуха към двигателя, 2- Дроселова клапа, 3- Клапан за управление на дебита на отработилите газове, 4- ЕБУ, 5- Тръбопровод, 6- Възприемател за температурата на двигателя, 7- Ламбда сонда, 8- Изпускателен колектор, 9- Турбокомпресор, 10- Охладител на отработилите газове, 11- Клапана за управление на охлаждането на ОГ, 12- Механизъм за управление на допълнителните тръбопроводи.

Отношението на количеството на подаваните отработили газове към цялото количество работно вещество, постъпващо в двигателя се нарича степен на рецикулация, т.е:

$$\rho_p = G_{or} / G_{pв} \cdot 100, \%$$

където G_{or} е количеството рециркулирани отработили газове, $G_{pв}$ – количеството работно вещество, постъпващо в двигателя.

Степента на рецикулация е необходимо да бъде управлявана във функция от режима на работа на двигателя и температурата на охлаждащата течност [2]. На фиг. 2 е даден



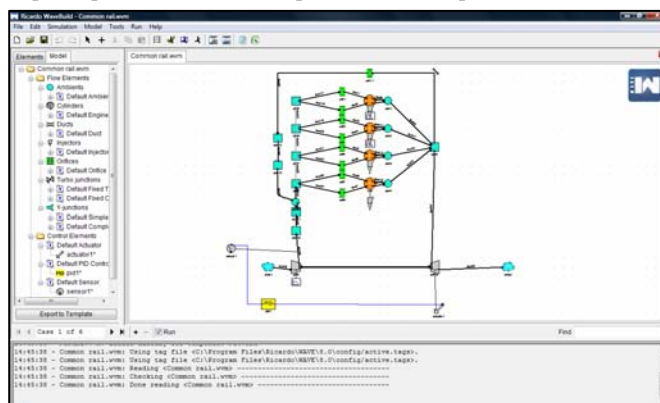
Фиг. 2. Изменение на степента на рецикулация на отработилите газове в работното поле на дизелов двигател

примерен закон, по който се изменя ρ_p във функция от честотата на въртене и натоварването.

С нарастването на натоварването на двигателя и честотата на въртене е необходимо постепенно да се намалява степента на рецикулация, за да не се влоши допълнително икономичността на двигателя. При натоварване над 80% намалява количеството свободен кислород в горивната камера, поради намаляване на въздушното отношение и това води до намаляване на образуването на азотни окиси. Прекратяването на рецикулацията при високи честоти на въртене може да се обясни с намаленото време за извършване на работния процес и намаляване на количеството работно вещество постъпващо в двигателя, което води до понижаване на максималните температури в горивната камера.

3. Модел на дизелов двигател с акумулаторна горивна уредба и система за рецикулация на отработилите газове.

За провеждане на изследванията е създаден модел на дизелов двигател в работната среда на програмата Ricardo Wave. Моделът на двигателя (фиг. 3) е създаден, като са използвани отделни блокове, зад всеки от които е заложен определен математичен модел и се дефинира със съответни геометрични параметри [5]. Работният процес в цилиндрите на двигателя е



Фиг. 3. Модел на двигателя, разработен с помощта на програмата Ricardo Wave

моделиран с помощта на математичен модел на базата на първия принцип на термодинамиката за отворена термодинамична система, т.е. приема се че параметрите на работното вещество са еднакви в целия обем на цилиндъра. За отчитане на газообменните процеси са зададени геометричните параметри, законите за движение и коефициентите на дебита на пълнителните и изпускателните клапани. За моделиране на горивния процес се изхожда от закона за подаване на горивото и чрез математическите модели за разпръскване и изпарение се определя скоростта на отделяне на топлина в горивната камера. Като входящи параметри за горивната уредба в конкретната задача са зададени: законът за подаване на гориво, големината на цикловата порция гориво, продължителността на впръскване, налягането на впръскване, диаметърът и броят отвори на разпръсквача, температурата на гориво, моментът на подаване на горивото, цетановото число на горивото и др. Диференциалният закон за подаване на горивото е зададен с п-образна форма. Това е идеална форма на закона, която може да се постигне с акумулаторна горивна уредба, т.е. при относително постоянно налягане на впръскване. Пълнителната и изпускателната система са моделиране чрез тръбопроводи и съответни свързващи елементи. Движението на работното вещество в тръбопроводите се описва с помощта на неустановен едномерен математичен модел. За повишаване налягането на пълнене е използван турбокомпресор, като са въведени съответните характеристики на компресора и турбината, намиращи се на разположение в библиотеките на програмата. След компресора въздухът преминава през междинен охладител преди да постъпи в цилиндрите на двигателя. Налягането на пълнене се регулира с помощта на обходен канал на турбината с регулируемо сечение. В модела на двига-

теля е използвана външна система за рециркулация с охлаждане на отработилите газове. В тръбопровода е моделирано дресиращо сечение, с помощта на което се управлява дебитът на газовете отклонявани за рециркулация.

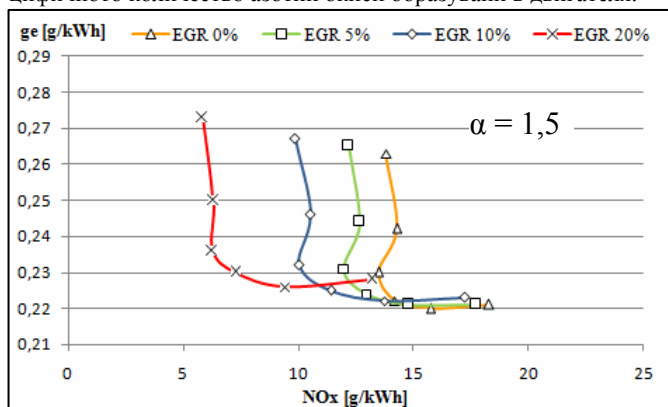
По-важните входни параметри за двигателя са дадени в таблица 1.

Таблица 1

Брой цилиндри [i]	4
Диаметър на цилиндъра [D]	86,5mm
Ход на буталото [H]	85mm
Степен на сгъстяване [ε]	17
Честота на въртене [n]	2500 min ⁻¹
Въздушно отношение [α]	1,5....2,5
Налягане на подаване на горивото [p _{раи}]	100 MPa
Начало на подаване на горивото [θ]	-20....5°KB
Продължителност на подаване на горивото [φ]	20° KB
Диаметър на отворите на разпръсквача	0,1 mm
Налягане на пълнене [p]	0,12 MPa

4. Резултати от изследванията.

С помощта на описания модел на дизелов двигател в програмата Ricardo Wave са проведени теоретични изследвания на влиянието на степента на рециркулация върху образуването на азотни окиси в цилиндрите на двигателя. Тъй като образуването на NO_x зависи силно от температурата в горивната камера и количеството свободен кислород (т.е. от въздушното отношение α), изчисленията са проведени при различни стойности на началото на подаване на горивото θ и въздушното отношение α. Увеличаването на степента на рециркулация, едновременно с намаляването на образуваните азотни окиси води до влошаване на мощностно-икономичните показатели на двигателя. Поради това резултатите са показани като параметрични криви при постоянна стойност на степента на рециркулация в полето на изменение на специфичния разход на гориво и специфичното количество азотни окиси образувани в двигателя.

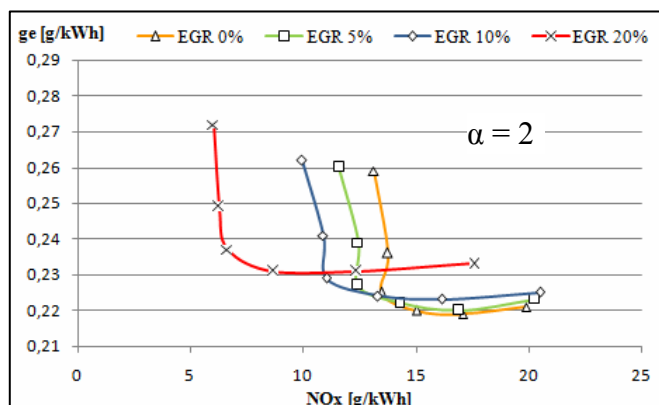


Фиг. 4. Влияние на степента на рециркулация на отработилите газове върху специфичното количество азотни окиси и специфичният разход на гориво при α = 1,5 и n = 2500 min⁻¹.

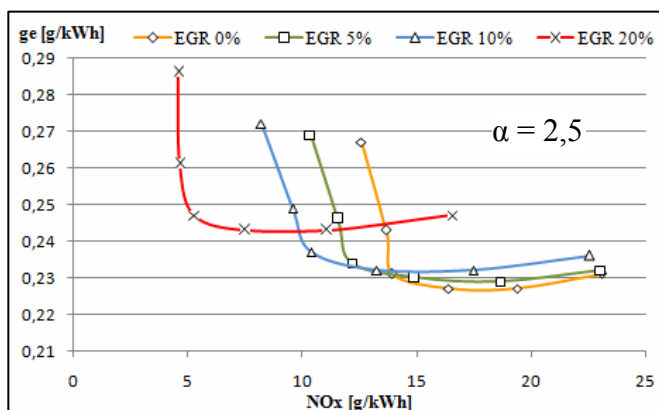
Увеличаването на степента на рециркулация до 20% (фиг. 4) води до намаляване на специфичното количество азотни окиси до два пъти и незначително повишаване на специфичния разход до 3%. Отделните криви на графиката са построени, като са зададени различни стойности на началния момент на подаване на горивото в интервала от 5° след до 20° преди ГМП. Характера на изменение на специфичното количество азотни окиси при изменение на началото на подаване се запазва при различните стойности на степента на рециркулация. С изместване на началния момент на подаване на горивото от 5° след до 10° преди ГМП не се забелязва промяна в специфичното количество азотни окиси, но се намалява значително специфичният разход с до 15%. При по нататъшното увелича-

ване на предварението започва бързо нарастване на специфичното количество азотните окиси и незначително намаляване на специфичния разход на гориво. При максималните стойности на момента на подаване на гориво преди ГМП се наблюдава тенденция към едновременно повишаване и на двата параметъра, което може да се обясни с нарастване както на максималните температури на работния процес така и с увеличаване на отрицателната работа преди ГМП.

Резултатите показват, че при всяка степен на рециркулация има определена стойност на момента на подаване на горивото, при която се наблюдава оптимално съчетание между специфичния разход на гориво и специфичното количество азотни окиси. При промяна на момента на подаване в едната или в другата посока от тази стойност се наблюдава рязко повишаване на единия от двата параметъра.



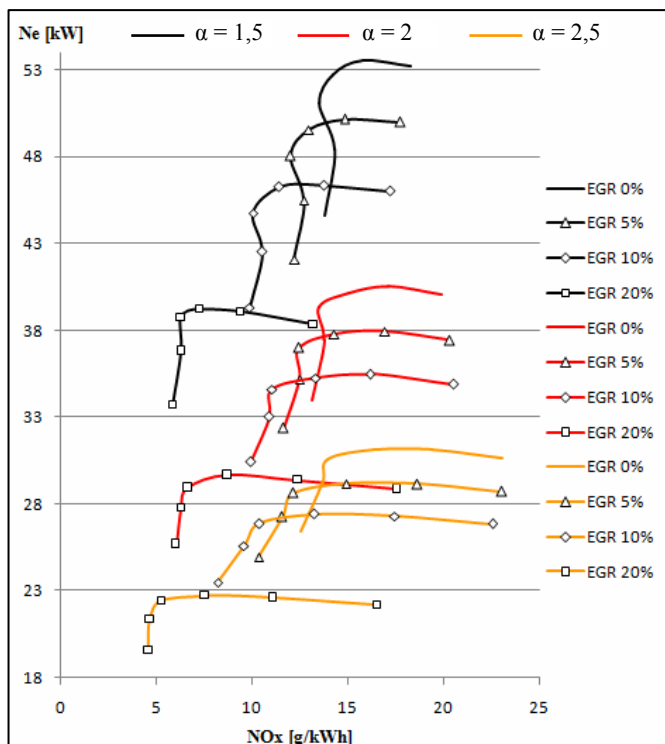
Фиг. 5. Влияние на степента на рециркулация на отработилите газове върху специфичното количество азотни окиси и специфичният разход на гориво при α = 2 и n = 2500 min⁻¹.



Фиг. 6. Влияние на степента на рециркулация на отработилите газове върху специфичното количество азотни окиси и специфичният разход на гориво при α = 2,5 и n = 2500 min⁻¹.

С нарастване на въздушното отношение α се запазва характера на влияние на степента на рециркулация върху специфичното количество образувани азотни окиси и специфичният разход на гориво (фиг. 5 и 6). Нарастването на количеството свободен кислород в горивната камера води до повишаване на специфичното количество азотни окиси, при работа на двигателя с начало на подаване на горивото над 10° след ГМП. При α = 2 имаме минимални стойности на специфичния разход на гориво, достигащи до 0,219 g/kWh, докато с нарастване на α до 2,5 специфичният разход започва отново да нараства.

С изменение на въздушното отношение на дизеловия двигател се променя неговата мощност. Степента на рециркулация влияе идентично върху мощността на двигателя при различни стойности на α (фиг. 7). С увеличаване на въздушното отношение, едновременно с нарастване на мощността на двигателя намалява диапазона на изменение и максималните стойности на специфичното количество азотни окиси. Резултатите показват, че една и съща мощност може да бъде постигната с различни стойности на въздушното отношение, степента на рециркулация и специфично количество образувани азот-



Фиг. 7. Влияние на степента на рецикулация на отработилите газове върху ефективната мощност и специфичното количество азотни окиси при различни стойности на α и $n = 2500 \text{ min}^{-1}$.

ни окиси. Например мощност от 39kW може да бъде постигната с въздушно отношение $\alpha = 2$ без рецикулация и $\alpha = 1,5$ и степен на рецикулация 20%, като специфичното количество азотни окиси е съответно 13,5 и 6,3 g/kWh. Вижда се, че конкретната мощност се постига с над два пъти по-малко количество азотни окиси при използване на по-богата смес и висока степен на рецикулация, а същевременно повишаването на специфичния разход е под 4%. За постигане на максималните мощностни показатели е необходимо да се намалява въздушното отношение до стойности, при които започва бързо нарастване на продуктите на непълното горене (свободен въглерод и въглероден окис) и да се прекрати процесът на рецикулация. При частични натоварвания е целесъобразно да се работи с пониски стойности на въздушното отношение и висока степен на рецикулация, този подход може да доведе до намаляване на азотните окиси над два пъти.

5. Заключение.

Проведените изследвания показват, че системите за рецикулация са ефективно средство за намаляване на съдържанието на азотни окиси в режимите на частично натоварване на дизеловите двигатели. Получените теоретични резултати показват, че с цел намаляване на азотните окиси в дизеловите двигатели, неговата мощност, при някои режими на частични натоварвания е целесъобразно да се управлява не чрез въздушното отношение α , а чрез степента на рецикулация. Този подход води до незначително повишаване на специфичния разход.

6. Литература.

- [1] Димитров, П.И., Двигатели с вътрешно горене (Първа част – теория на двигателите с вътрешно горене), ТУ–София, 2000, София;
- [2] Димитров, П.И., Системи за управление на процесите в двигателите с вътрешно горене (Втора част), ТУ–София, 2007, София;
- [3] Пунов, П., Т. Евтимов, Системи за неутрализиране на токсичните компоненти в отработилите газове на дизеловите двигатели, XVI Международна научно – техническа конференция trans&MOTAUTO'09, Слънчев бряг, 2009.

[4] Двигател Audi 2.0л TDI с системой впрыска Common rail, Audi SSP №420.

[5] Ricardo, Wave 8.0 help system.

Изследванията са извършени/подпомогнати по Договор № BG051PO001/07/3.3-02/8 „Механизми за осигуряване качествено изстраване на научните кадри”, финансиран по схема "Подкрепа за развитие на докторанти, постдокторанти, специализанти и млади учени" на ОП "Развитие на човешките ресурси" на "Европейския социален фонд".

This work is a part of the project BG051PO001/07/3.3-02/8–“MEQSI”, funded by scheme “Support of the development of PhD students, postdoctoral, post-graduate and young scientists” from the program “Development of human resources” of the “European social fund”.