

УДК 621.43.016

## УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЫСТРОХОДНОГО ДИЗЕЛЯ ЗА СЧЕТ МНОГОСТАДИЙНОЙ ПОДАЧИ ТОПЛИВА

А.Н. Авраменко, научн. сотр., к.т.н., ИПМаш имени А.Н. Подгорного  
НАН Украины

*Аннотация.* Проведен сравнительный расчетный анализ параметров рабочего цикла дизеля Д21А (2С 10,5/12) для вариантов штатного и модернизированного исполнения (с системой HCCI) и оценка выбросов вредных веществ с отработавшими газами при работе дизеля на номинальном режиме.

*Ключевые слова:* рабочий цикл, многостадийный впрыск топлива, токсичность отработавших газов.

## ПОКРАЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ШВИДКОХІДНОГО ДИЗЕЛЯ ЗА РАХУНОК БАГАТОСТАДІЙНОГО ВПОРСКУВАННЯ ПАЛИВА

А.М. Авраменко, наук. співр., к.т.н., ИПМаш імені А.М. Підгорного  
НАН України

*Анотація.* Проведено порівняльний розрахунковий аналіз параметрів робочого циклу дизеля Д21А (2С 10,5/12) для варіантів штатного та модернізованого виконання (із системою HCCI) та оцінка викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами при роботі дизеля на номінальному режимі.

*Ключові слова:* робочий цикл, багатостадійне впорскування палива, токсичність відпрацьованих газів.

## IMPROVEMENT OF ECOLOGICAL PARAMETERS OF THE HIGH-SPEED DIESEL ENGINE DUE TO MULTIPHASIC INJECTION OF FUEL

A. Avramenko, Research worker, Candidate of Technical Science,  
IPMach it A. Podgornogo NAS of Ukraine

*Abstract.* In this work a comparative calculation analysis of parameters of the diesel engine D21A (2C 10,5/12) working cycle for variants of regular and modernized execution (with HCCI system) and estimation of harmful substances with exhaust gases emissions at operation of the diesel engine on nominal conditions are given.

*Key words:* working cycle, multiphase fuel injection, toxicity of the exhaust gases.

### Введение

Система Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) – регулируемого гомогенизированного воспламенения от сжатия – занимает особое место среди современных систем, обеспечивающих организацию рабочего цикла ДВС [1–3]. Использование такой системы предполагает многостадийную подачу топлива в цилиндр ДВС. Подача пилотных

доз топлива может начинаться от момента закрытия впускного клапана и продолжаться после ВМТ [2, 3]. Система включает в себя такие основные элементы как топливная система типа Common Rail с возможностью реализации многостадийного впрыска и система внешней рециркуляции отработавших газов (ОГ). При этом степень рециркуляции ОГ может составлять от 5 до 25 % [1–3].

Использование такой системы, по данным работ [1–3], позволяет эффективно влиять на экологические показатели дизелей практически без ухудшения их топливной экономичности.

### Анализ публикаций

Использование численных методов, реализованных в современных программных комплексах, для оценки энергоэкологических показателей ДВС находит все большее применение [2–5]. Такой подход позволяет существенно снизить затраты на доводку рабочих процессов ДВС существующей конструкции и с высокой степенью достоверности оценивать показатели проектируемых двигателей [4–5]. Для описания турбулентных течений во впускной системе и цилиндре ДВС, как правило, используют  $k$ - $\epsilon$ , RNG  $k$ - $\epsilon$  или  $k$ - $\omega$  модели турбулентности [3, 5].

Процессы смесеобразования в цилиндре ДВС обычно описываются с использованием Wave или TAB моделей [5].

При этом удается добиться хорошего согласования расчетных и экспериментальных индикаторных диаграмм, а характеристики токсичности ОГ отличаются в среднем на 5–15 % [3–5].

Из проведенного литературного обзора видно, что расчетная оценка параметров рабочего цикла ДВС, оценка экологических показателей и совершенствование этих показателей за счет использования современных методов организации рабочего цикла является актуальной задачей двигателестроения.

### Цель и постановка задачи

Цель работы – совершенствование экологических показателей быстроходного дизеля.

В работе ставились такие задачи:

- провести литературный обзор по современным экспериментальным и расчетным методам исследования экологических показателей ДВС;
- провести моторный эксперимент по оценке экологических показателей ДВС;
- с использованием численных методов провести расчет рабочего цикла дизеля для вариантов штатного и модернизированного исполнения при работе дизеля на режиме номинальной мощности;
- оценить состав продуктов сгорания по таким компонентам как NO и твердые частицы (ТЧ);
- сравнить результаты расчета состава продуктов сгорания с данными эксперимента;
- сделать выводы и рекомендации по улучшению экологических показателей быстроходного дизеля.

### Основные этапы и результаты исследования

Объект исследования – параметры рабочего цикла и экологические показатели быстроходного дизеля. Исходные данные для сравнительного расчетного исследования вариантов штатного и модернизированного исполнения представлены в табл. 1.

Расчетная сетка, описывающая конфигурацию камеры сгорания (КС) дизеля, представлена на рис. 1.

Расчетная сетка содержит 305150 расчетных ячеек. Для дискретизации расчетной области была использована гексаэдральная сетка с минимальной высотой ячейки вблизи подвижных границ равной 0,01 мм. В дальнейшем было проведено численное моделирование рабочего цикла дизеля для вариантов штатного и модернизированного исполнения.

Таблица 1 Исходные данные для сравнительного расчетного исследования

Параметры	Штатный вариант	Модернизированный вариант
Диаметр сопловых отверстий, мм	0,3	0,22
Угол опережения впрыска топлива, град. п.к.в. до ВМТ	20	1-й – 130 2-й – 100 3-й – 40
Количество подвпрысков	–	3
Продолжительность впрыска, град. п.к.в.	20	20
Продолжительность подвпрысков, град. п.к.в.	–	10
Максимальное давление впрыска, МПа	42	70
Система рециркуляции отработавших газов	–	EGR

Модернизированный вариант с системой HCCI имеет топливную систему типа Common Rail, которая позволяет реализовывать многостадийный впрыск топлива (4 подвпрыска). Пилотная доза топлива подается за 130, 100 и 40 град. п.к.в. до ВМТ, а основная доза топлива впрыскивается за 12 град. п.к.в. до ВМТ.

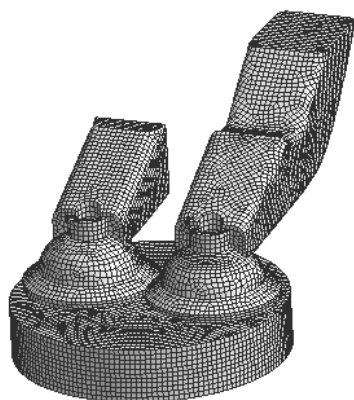


Рис. 1. Расчетная сетка, описывающая конфигурацию КС и впускных и выпускных каналов дизеля Д21А

Такой подход к организации процесса подачи топлива в цилиндр позволяет равномерно распределить топливо по объему цилиндра, добившись практически гомогенной смеси. Это позволяет в дальнейшем обеспечить более полное выгорание топлива в цилиндре дизеля.

За счет использования системы рециркуляции отработавших газов (EGR) удастся увеличить теплоемкость свежего заряда и тем

самым организовать сгорание топлива при более низкой максимальной температуре цикла.

Для моделирования процесса образования NO в цилиндре дизеля использовались такие механизмы:

- термический механизм Зельдовича;
- механизм, описывающий образование «топливных NO»;
- механизм, описывающий деструкцию NO.

Для моделирования процесса образования сажи и сульфатов в цилиндре ДВС используется модель «Magnussen and Hjertager» [6]. Далее было проведено сравнительное численное моделирование рабочего цикла дизеля штатного и модернизированного исполнения при работе на режиме номинальной мощности ( $N_e = 18,4$  кВт, при  $n = 1800$  мин<sup>-1</sup>).

Изменение среднетермодинамической температуры, осредненной по объему цилиндра, для расчетных вариантов штатного и модернизированного исполнения, в зависимости от угла поворота коленчатого вала, представлено на рис. 2.

У штатного варианта максимальная температура цикла достигает 1880 К, а у модернизированного 1810 К. Такое снижение температуры объясняется потерями теплоты на нагрев свежего заряда, смешанного с отработавшими газами, за счет увеличения его теплоемкости.

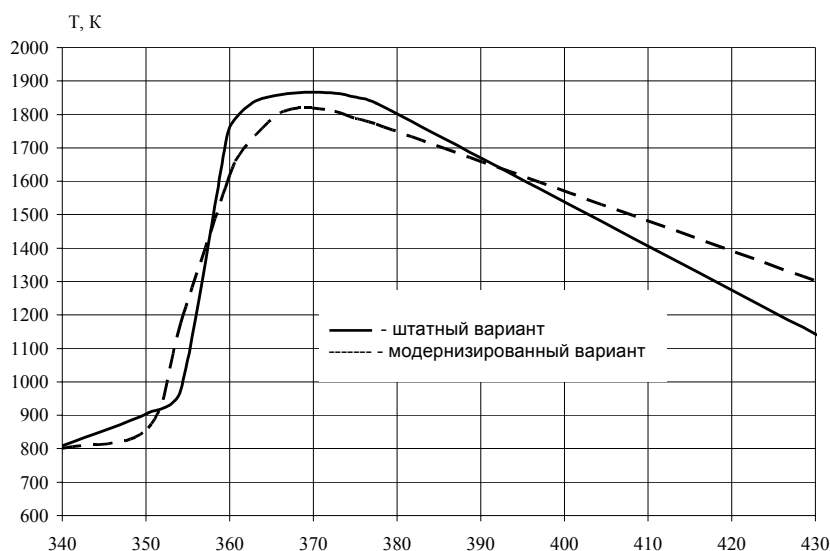


Рис. 2. Изменение среднетермодинамической температуры в цилиндре дизеля по углу п.к.в.

Изменение концентрации NO, осредненной по объему цилиндра, в зависимости от угла поворота коленчатого вала, представлено на рис. 3. У штатного варианта концентрация NO в ОГ достигает 1630 чнм, согласно данным проведенного эксперимента. Расчетные значения концентрации NO у штатного варианта достигают 1600 чнм, а у модернизированного – 1240 чнм (рис. 3).

Также следует отметить изменение характера образования NO в цилиндре дизеля у модернизированного варианта. Стабилизация концентрации NO в цилиндре у штатного варианта наступает через 108 град. п.к.в. после ВМТ, а у модернизированного – через 120 град. п.к.в. после ВМТ. Примеры распределения внутрицилиндровой температуры и массовой доли NO в меридиональном сечении КС для вариантов штатного и модерни-

зированного исполнения при работе дизеля на режиме номинальной мощности представлены на рис. 4 и 5.

У штатного варианта распределение температуры и массовой доли NO носит явно выраженный локальный характер (рис. 4). Максимальная температура отмечается в области центральной части КС в поршне и достигает 2695 К. Распределение массовой доли NO согласуется с температурным полем. Тогда как у модернизированного варианта максимальная температура отмечается в области верхней части КС и достигает 2528 К. Распределение температуры и массовой доли NO при движении поршня к НМТ у модернизированного варианта носит объемный характер и более равномерно по объему КС (рис. 5).

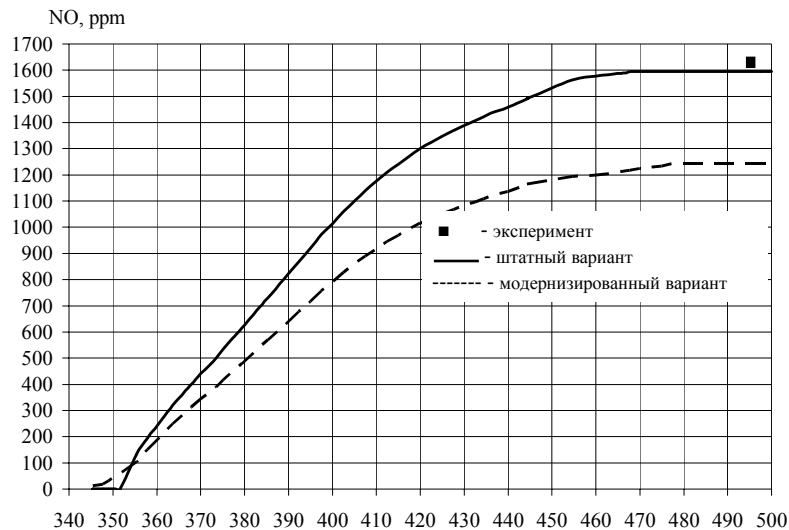


Рис. 3. Изменение концентрации NO в цилиндре дизеля по углу п.к.в.

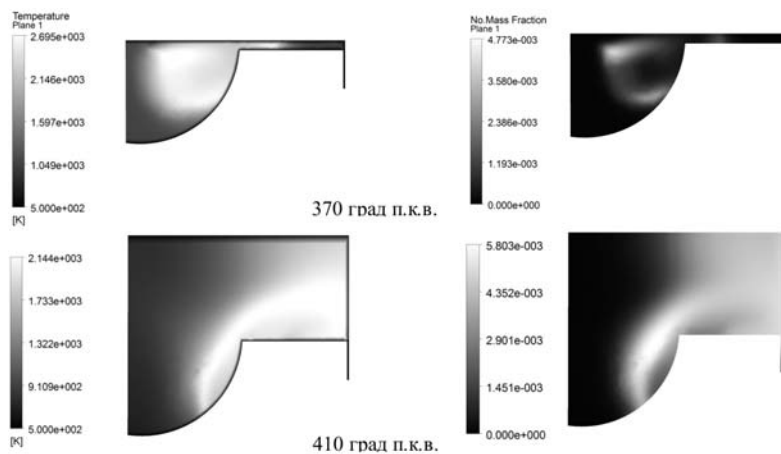


Рис. 4. Распределение температуры (а) и массовой доли NO (б) по объему КС дизеля на исследуемом режиме (штатный вариант)

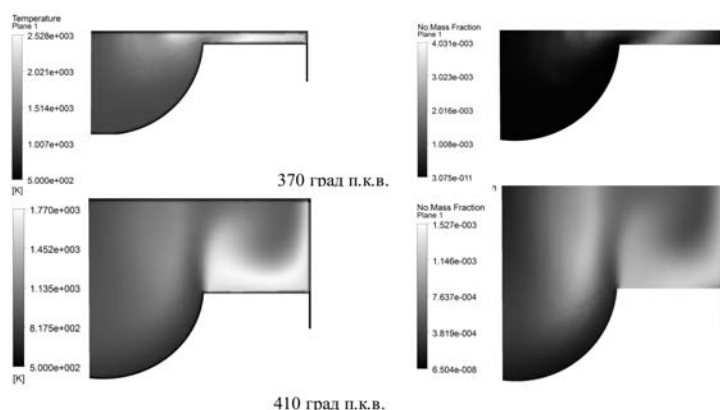


Рис. 5. Распределение температуры (а) и массовой доли NO (б) в цилиндре дизеля на исследуемом режиме (модернизированный вариант)

Таблица 2 Основные результаты исследования

Эксперимент			Численные методы							
			Штатный вариант				Модернизированный вариант			
NO <sub>x</sub> , ppm	СН, ppm	P <sub>z</sub> , МПа	NO, ppm	G <sub>ТЧ</sub> , кг/ч	P <sub>z</sub> , МПа	T <sub>z</sub> , К	NO, ppm	G <sub>ТЧ</sub> , кг/ч	P <sub>z</sub> , МПа	T <sub>z</sub> , К
1630	19	7,84	1594	11·10 <sup>-3</sup>	7,8	1880	1240	8·10 <sup>-3</sup>	7,7	1810

Из результатов, представленных в табл. 2, видно, что использование системы HCCI для дизеля Д21А позволяет эффективно влиять на его экологические показатели и может рассматриваться как перспективное направление по улучшению экологических показателей быстроходных дизелей с непосредственным впрыском топлива.

**Выводы**

Установлено, что использование системы гомогенизированного изменяемого воспламенения от сжатия (HCCI) для дизеля Д21А при работе на номинальном режиме позволяет:  
 – снизить концентрацию NO в ОГ дизеля на 22 % за счет выгорания топлива при более низкой максимальной температуре цикла;  
 – снизить массовый выброс сажи и сульфатов на 20 % за счет преобладания объемного смесеобразования и уменьшения участков «холодного пламени» в пристеночном слое камеры сгорания.

**Литература**

1. Kong S.C., Marriott C., Reitz R.D., Christensen M. / Modeling HCCI Engine Combustion Using Detailed and Reduced Chemical Kinetics with the CFD Code// SAE Paper 2001-01-1026, SAE Transactions. – 2001. – Vol. 110, Journal of Engines, Section 3. – P. 1007–1018.

2. Ra Y. A Model for Droplet Vaporization for use in Gasoline and HCCI Engine Applications / Y. Ra, R.D. Reitz // ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – Vol. 126, 2004. – P. 1–7.  
 3. Kong S.C. Numerical Study of Premixed HCCI Engine Combustion and Its Sensitivity to Computational Mesh and Model Uncertainties / S.C. Kong, R.D. Reitz // Combustion Theory and Modeling. – 2003. – Vol. 7 (2). – P. 417–433,  
 4. Авраменко А.Н. Оценка экономических, экологических и прочностных показателей быстроходного дизеля / А.Н. Авраменко / Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков. – 2009. – № 47. – С. 127–132.  
 5. Абрамчук Ф.И. Программный комплекс для моделирования внутрицилиндровых процессов ДВС / Ф.И. Абрамчук, А.Н. Авраменко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2010. – № 2. – С. 7–12.  
 6. On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion / Sixteenth Symp / B.F. Magnussen, B.H. Hjertager. (Int.) on Combustion. The Combustion Institute, 1976. – P. 719.

Рецензент: Ф.И. Абрамчук, профессор, д.т.н. ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 17 мая 2011 г.