



**«БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

# **Многофакторное прогнозирование экологических характеристик дизеля на основе вычислительных методов и метода натурного эксперимента**



Новиков Максим Александрович

Научный руководитель:  
д.т.н. проф. Обозов А.А.

05.02.04 «Тепловые двигатели»

# Актуальность проблемы

Работа дизелей транспортного сельскохозяйственного назначения оценивается комплексом эксплуатационно-технических показателей. В настоящее время важнейшими из них являются показатели токсичности отработавших газов (ОГ). Это обусловлено как ухудшением экологической обстановки, так и ужесточением требований, предъявляемых к двигателям внутреннего сгорания современными нормативными документами на токсичность ОГ.

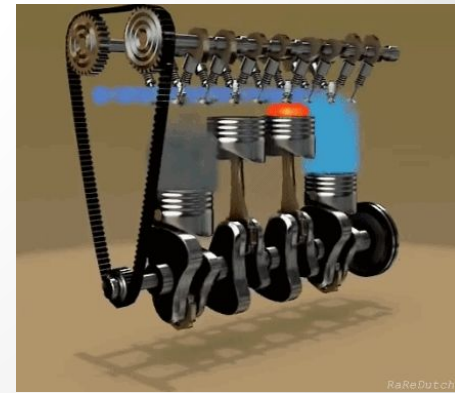
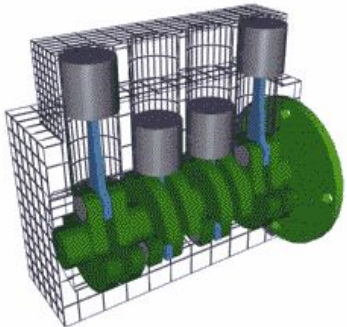
| Категория*                                    | Нормы токсичности | Дата введения | CO   | CH | CH + NOx | NOx   | Твердые частицы (сажа) |
|---|-------------------|---------------|------|----|----------|-------|------------------------|
| N <sub>1</sub> , Класс II, 1305...<br>1760 кг | Euro 3            | январь 2001   | 0,80 | –  | 0,72     | 0,65  | 0,07                   |
|   | Euro 4            | январь 2006   | 0,63 | –  | 0,39     | 0,33  | 0,04                   |
|   | Euro 5            | сентябрь 2010 | 0,63 | –  | 0,295    | 0,235 | 0,005 <sup>A</sup>     |
|   | Euro 6            | сентябрь 2015 | 0,63 | –  | 0,195    | 0,105 | 0,005 <sup>A</sup>     |
|   | Euro 1            | октябрь 1994  | 6,90 | –  | 1,70     | –     | 0,25                   |
|   | Euro 2, IDI       | январь 1998   | 1,5  | –  | 1,20     | –     | 0,17                   |
|   | Euro 2, DI        | январь 1998   | 1,5  | –  | 1,6      | –     | 0,20                   |
| N <sub>1</sub> , Класс III >1760 кг           | Euro 3            | январь 2001   | 0,95 | –  | 0,86     | 0,78  | 0,10                   |
|   | Euro 4            | январь 2006   | 0,74 | –  | 0,46     | 0,39  | 0,06                   |
|   | Euro 5            | сентябрь 2010 | 0,74 | –  | 0,350    | 0,280 | 0,005 <sup>A</sup>     |
|   | Euro 6            | сентябрь 2015 | 0,74 | –  | 0,215    | 0,125 | 0,005 <sup>A</sup>     |

*Стандарты Евросоюза по токсичности ОГ г/км*

# Научная новизна

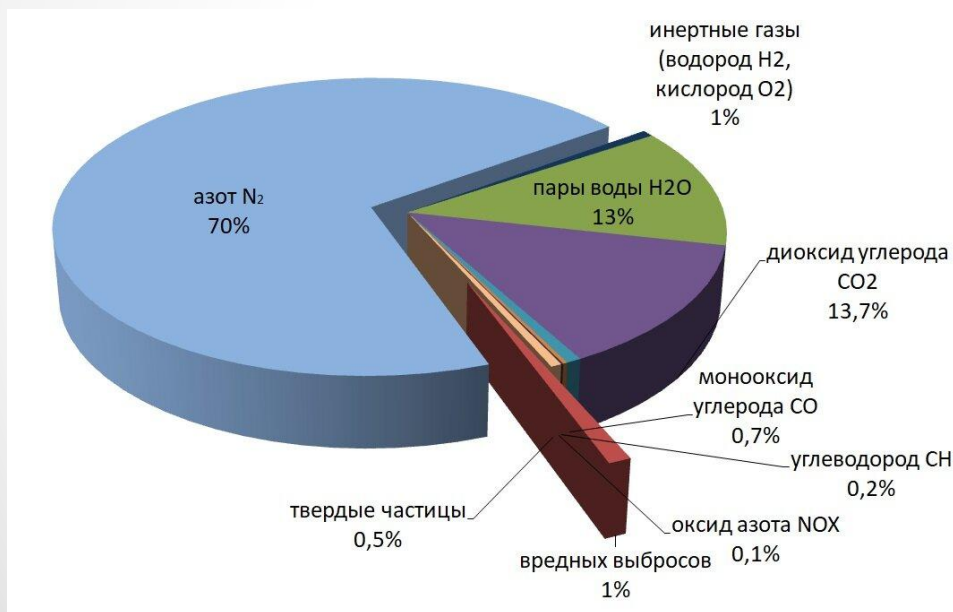
**Научная новизна** заключается в формировании модели многофакторного прогнозирования экологических характеристик дизеля, на основе экспериментальных данных верифицирована математическая модель расчета РП дизеля, учитывающая его конструктивные особенности (форма КС, ориентацию каждой ТС, вихревое число и т.д.) и регулировочные параметры (характеристики топливоподачи, настройки ТПА и т.д.);

- экспериментально установлено влияние характеристик топливоподачи при различных настройках параметров ТПА (угла впрыска топлива (УВТ)  $\varphi$ , количества топлива) на экономичность и выбросы  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CH}$  и  $\text{CO}$  с ОГ дизеля и дана их количественная



# Анализ состояния вопроса

## Состав отработавших газов

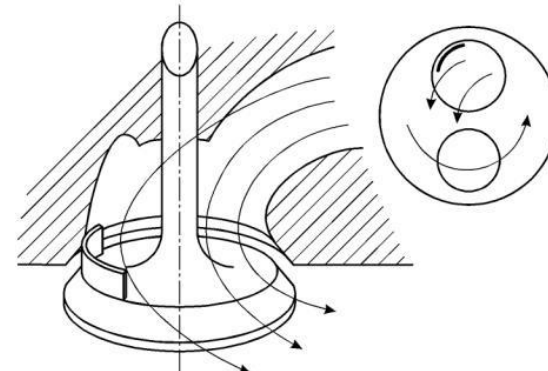
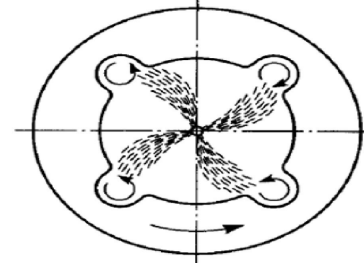
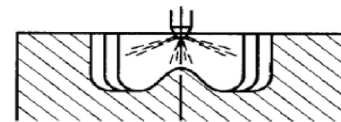


Монооксид углерода (CO)  
Диоксид углерода (CO<sub>2</sub>)  
Оксиды азота (NO<sub>x</sub>)  
Несгоревшие углеводороды (CH)  
Дисперсные (твердые) частицы (PM)  
Двуокись серы (SO<sub>2</sub>)

# МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

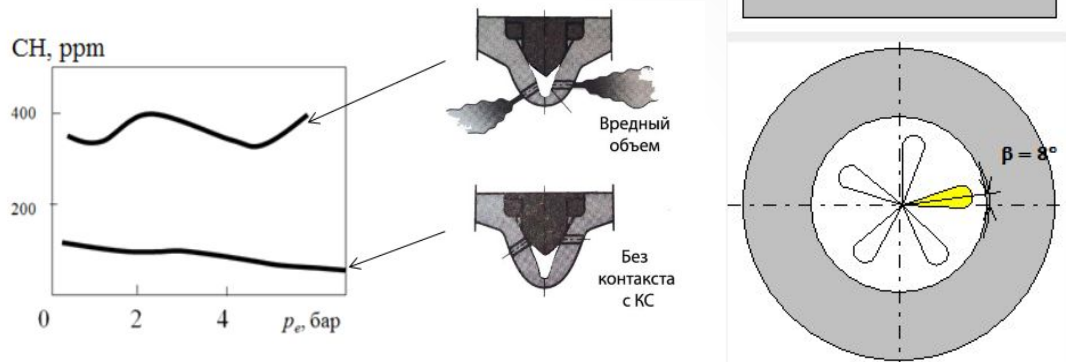
## ПАРАМЕТРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭФФЕКТИВНЫЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

- степень сжатия;
- форма камеры сгорания;
- интенсивность движения воздушного заряда;



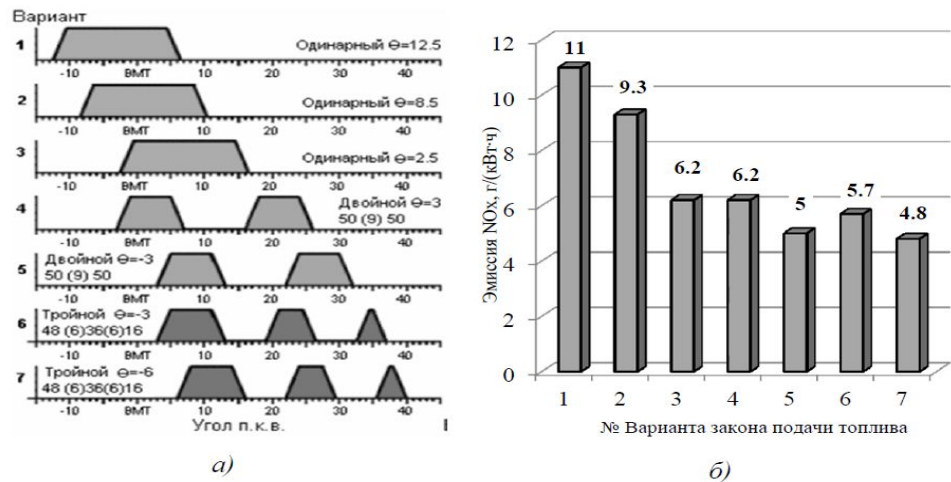


- число, ориентация сопловых отверстий и конструктивные особенности распылителя форсунки;



Влияние конструкции распылителя на выбросы

- характеристика топливоподачи (количество стадий, количество топлива в каждой стадии, угловой интервал между порциями и угол начала подачи топлива);



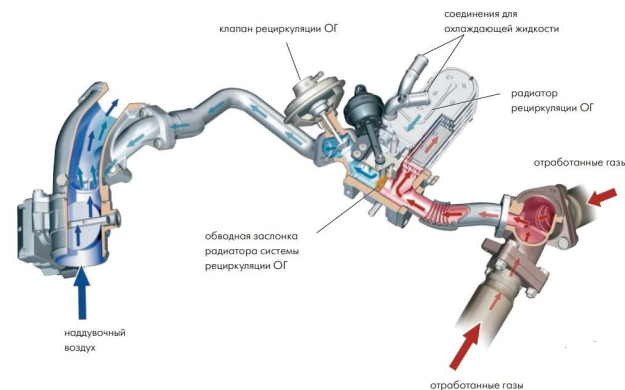
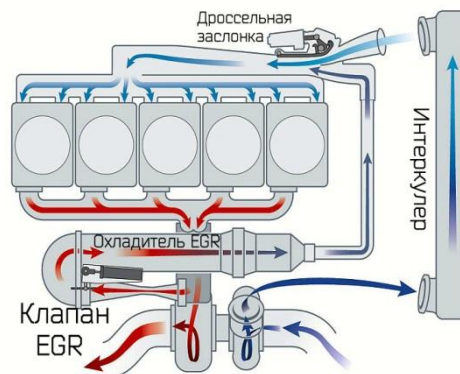
Исследуемые характеристики топливоподачи и значения эмиссии NOx в ОГ

- максимальное давление  
подачи топлива;

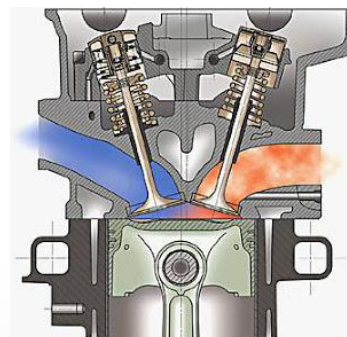


- газодинамические  
характеристики впускных и  
выпускных каналов головки  
блока цилиндров;

- система рециркуляции  
отработавших газов;



- зазор «головка поршня –  
цилиндр» и расположение  
поршневых колец на поршне.



# КОНСТРУКТИВНЫЕ СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

## КАТАЛИТИЧЕСКИЕ НЕЙТРАЛИЗАТОРЫ

В устройствах каталитической нейтрализации используются окислительно-восстановительные реакции для химического доокисления или восстановления продуктов неполного окисления топлива при протекании их через активную зону нейтрализатора.



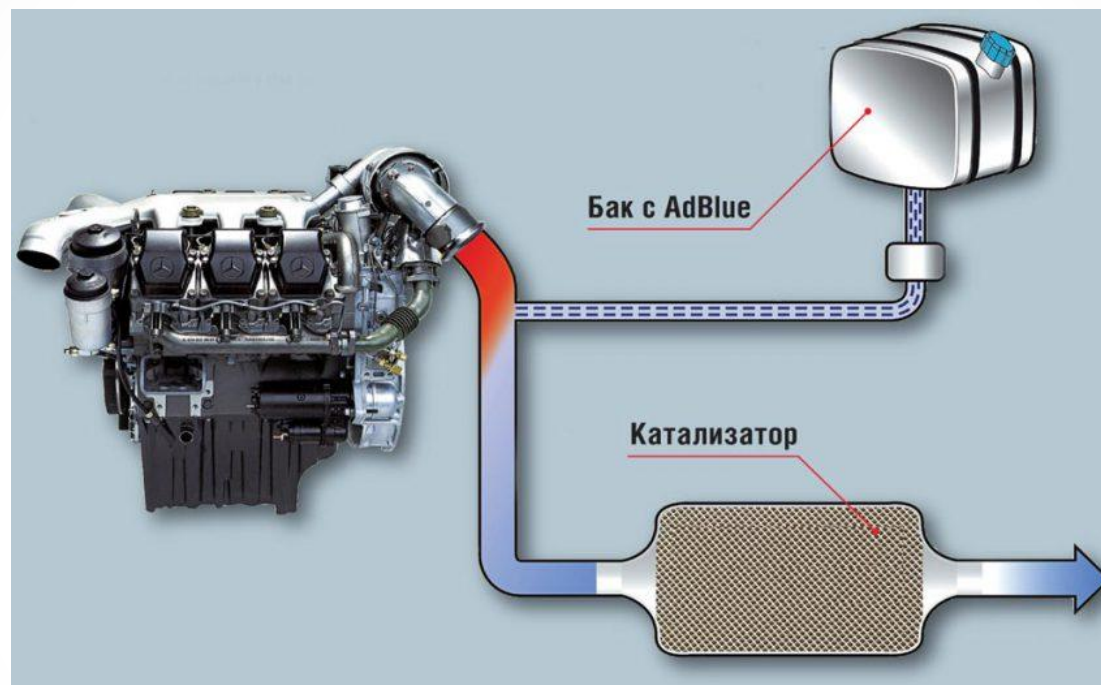


# Сажевые фильтры

Представляет собой керамический блок из карбида кремния с большим количеством тонких каналов для прохода отработанных газов. Частицы сажи, задерживаясь на поверхности этих каналов, под действием повышенной температуры и других факторов окисляются и превращаясь в углекислый газ выбрасываются в атмосферу с выхлопными газами.

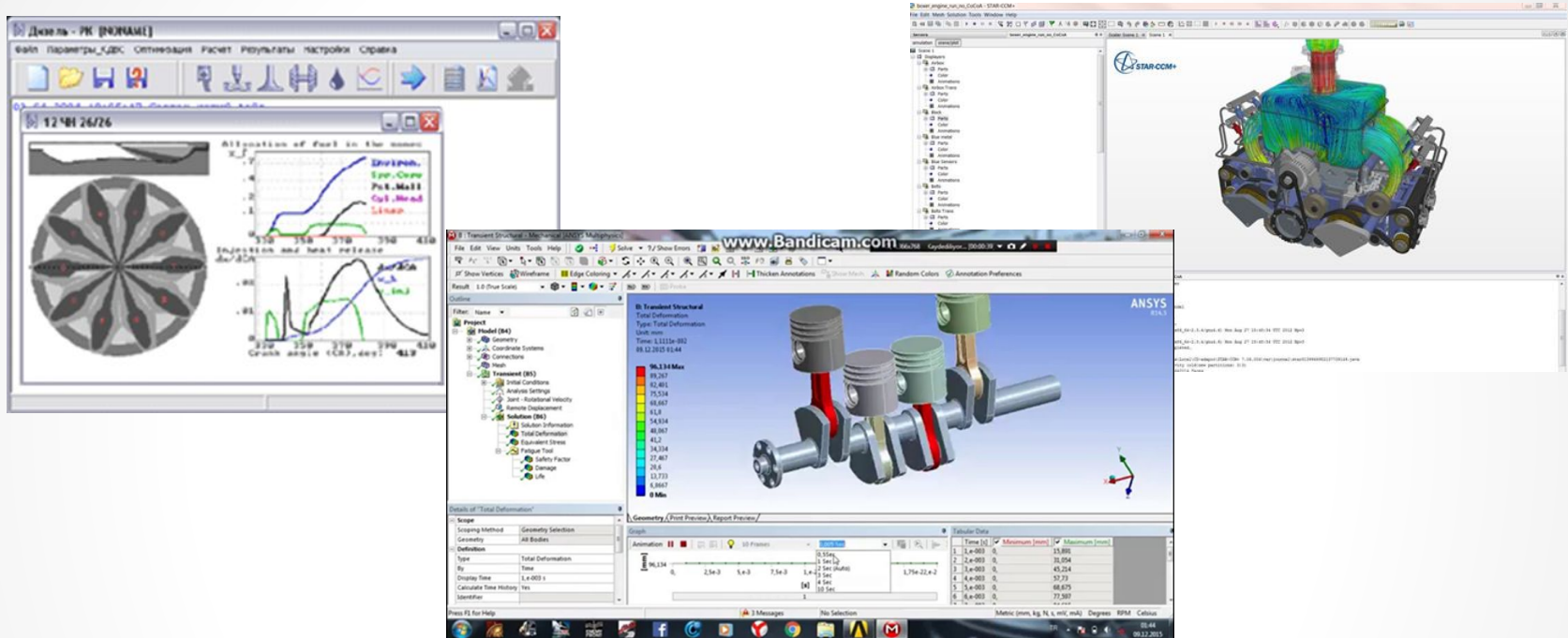


# Использование мочевины



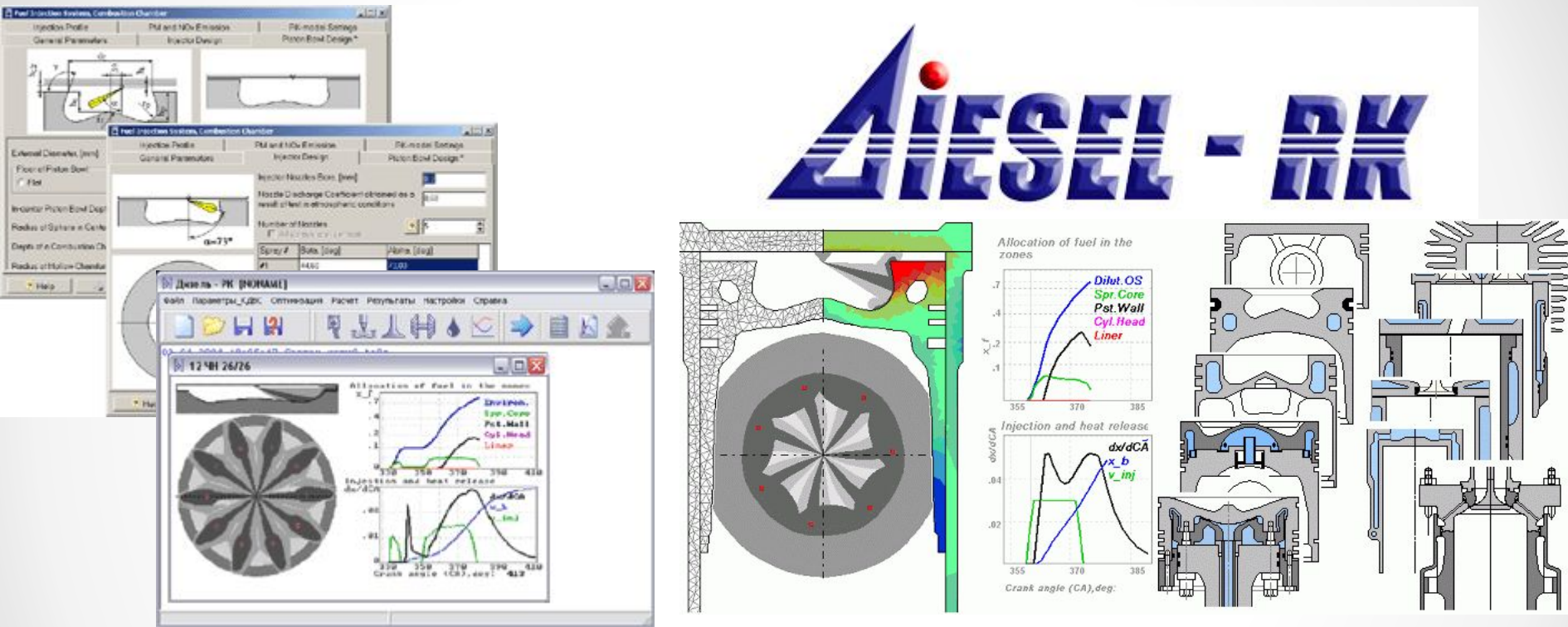
Жидкостная система нейтрализации вредных выбросов в ОГ, или SCR-нейтрализатор, представляет собой закрытую систему, через которую проходит очищенный от сажи выхлоп дизеля.

# МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЯ



В настоящее время в виду сокращения времени на модернизацию и создание новых образцов двигателей, широкое распространение получило математическое и компьютерное моделирование ДВС. Наибольшей популярностью пользуются программы: KIVA; STAR-CD; FIRE (AVL); VECTIS.

# ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДИЗЕЛЬ РК



Программный комплекс ДИЗЕЛЬ РК разрабатывается уже в течение более чем 20 лет, и за это время он прошел проверку применительно к двигателям различной размерности, быстроходности и применения. Математические модели постоянно развиваются, расширяя круг решаемых с помощью комплекса задач. Результаты расчета постоянно сопоставляются с экспериментальными данными разных авторов (в основном, с данными заводов - изготовителей двигателей).

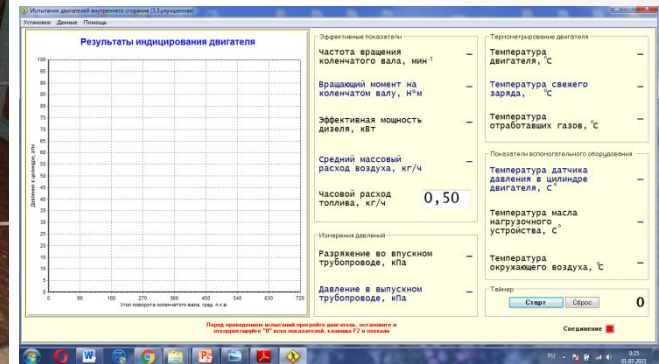
## ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

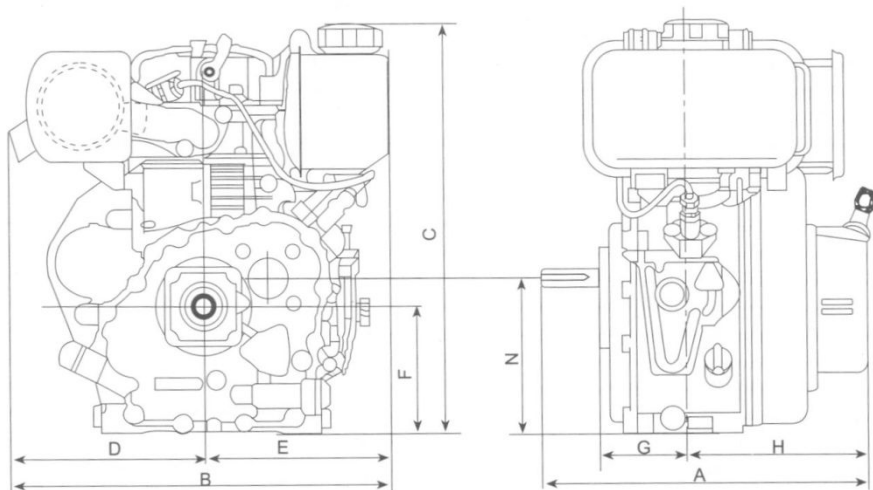
1. Создание испытательного стенда с дизелем Д-240 ММЗ.
2. Разработка методик и проведение экспериментальных исследований на двигателях КМ-170FA и Д-240 ММЗ.
3. Математическая обработка полученных экспериментальных данных.
4. Математическое моделирование внутрицилиндровых процессов и процессов образования токсичных компонентов с помощью программного комплекса «Дизель-РК» МГТУ им. Н.Е. Баумана.
5. Анализ согласованности полученных экспериментальных и расчетных данных.



# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТЕНДЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЗЕЛЕЙ.

Автоматизированный лабораторный стенд для изучения рабочих процессов дизельных двигателей внутреннего сгорания РПДД-ГНм с двигателем КМ 170FA

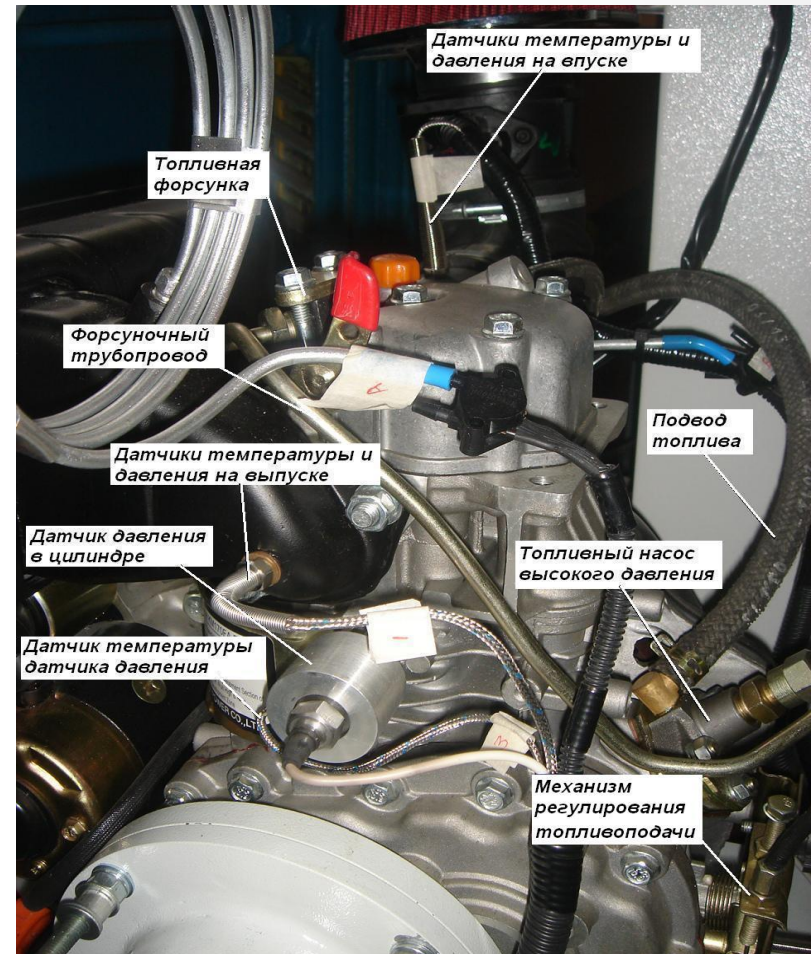
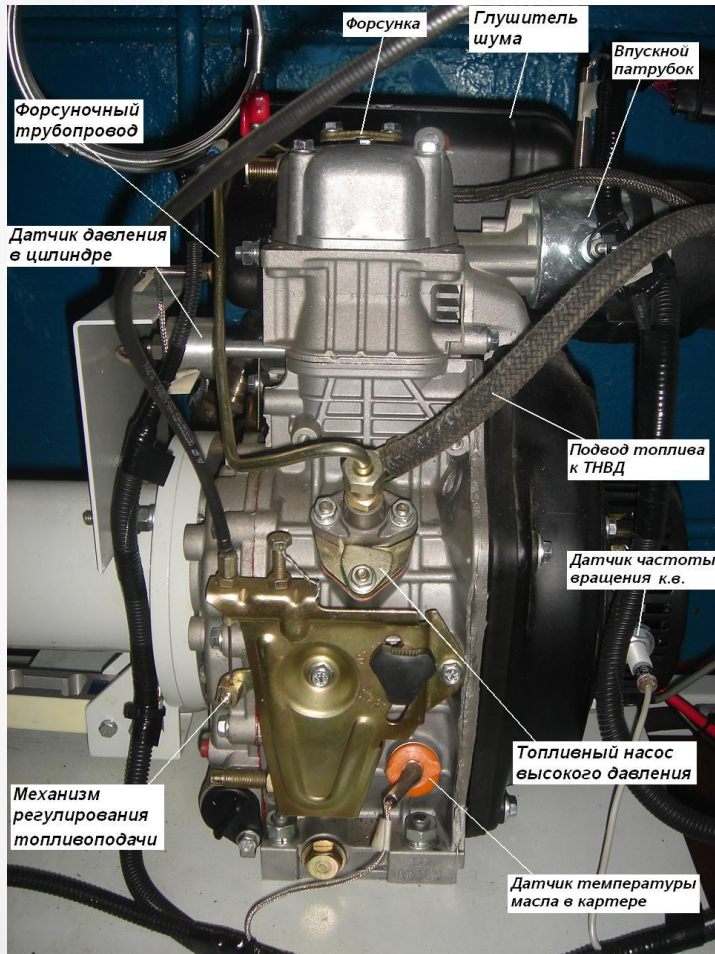




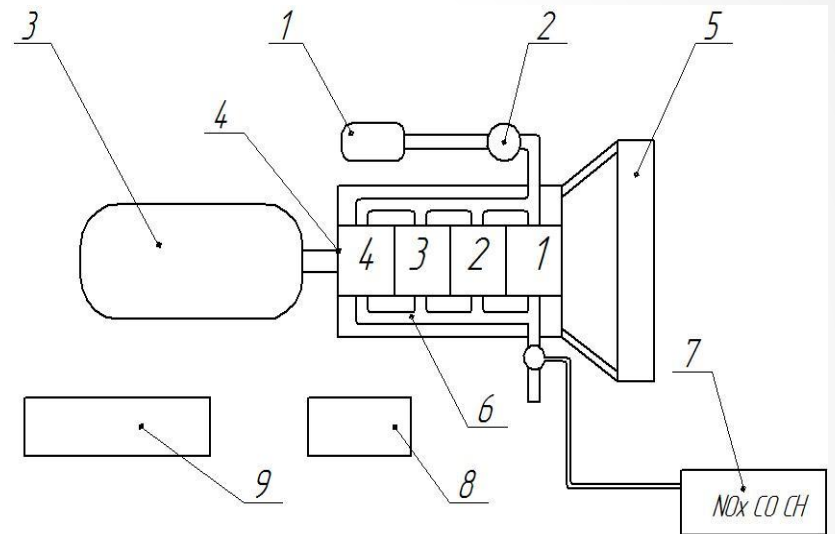
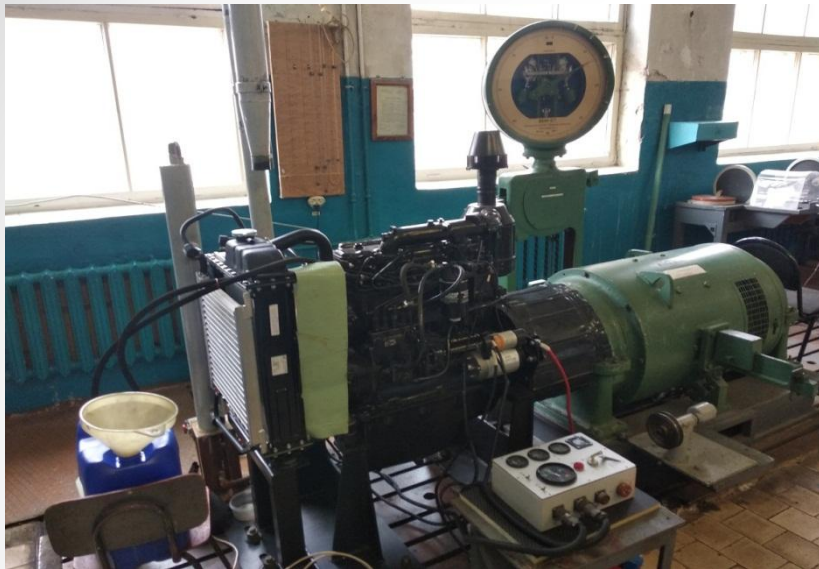
|  |  |
|--|--|
| Тип двигателя                                  | Четырехтактный, с<br>воспламенением от<br>сжатия     |
| Число цилиндров и их<br>расположение           | 1 цилиндр  |
| Диаметр цилиндра, мм                           | 70   |
| Ход поршня, мм                                 | 57   |
| Рабочий объем двигателя, л                     | 0,219  |
| Степень сжатия                                 | 20   |
| Число впускных клапанов                        | 1  |
| Число выпускных клапанов                       | 1  |
| Камера сгорания                                | Открытого типа с<br>центральным расположением        |
| Топливоподающая<br>аппаратура                  | Топливный насос                                      |
| Форсунка                                       | с четырёх дырчатым<br>распылителем закрытого<br>типа |
| Распылитель форсунки                           | 4-х сопловой, диаметр<br>отверстия<br>0,31 мм        |
| Номинальная<br>мощность/частота<br>(кВт/мин-1) | 2,8/3600   |



# РАСПОЛОЖЕНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДВИГАТЕЛЯ И ДАТЧИКОВ



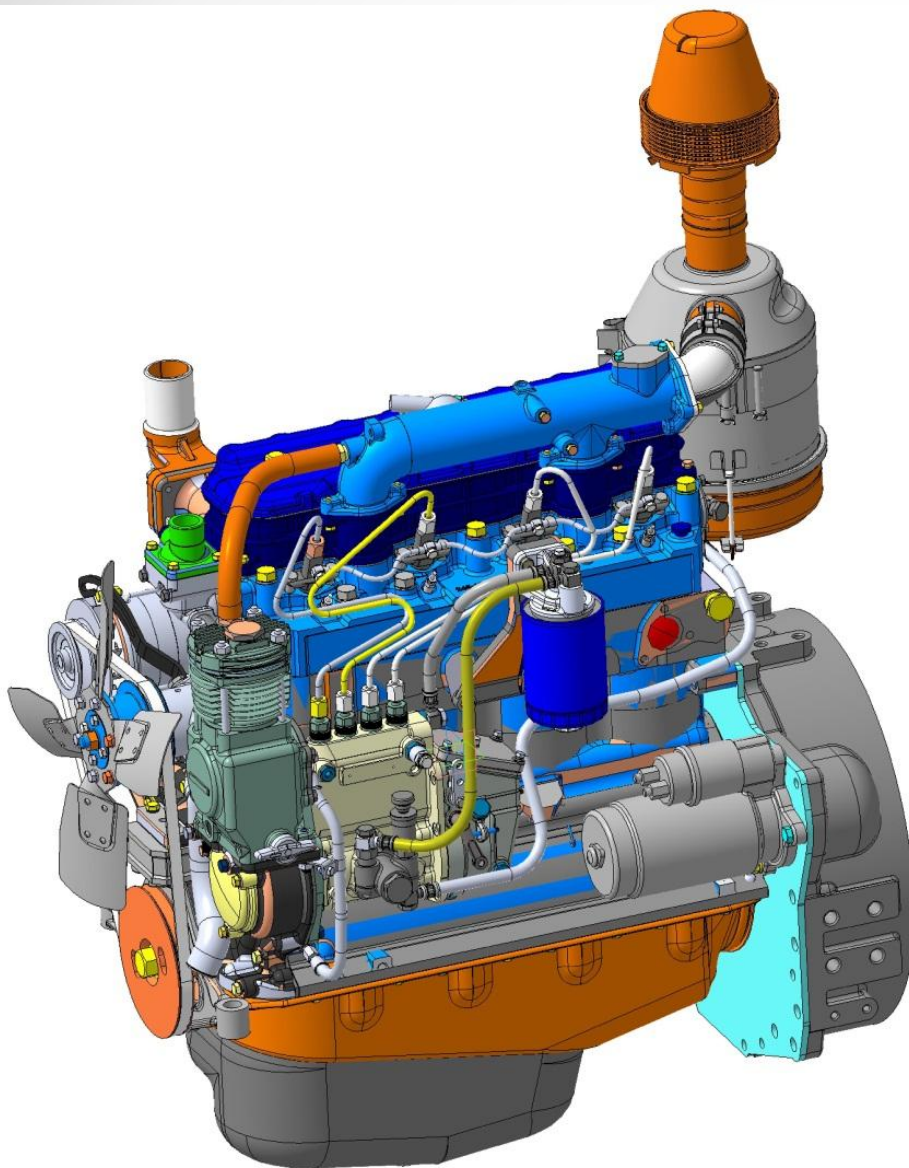
# ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД С ДВИГАТЕЛЕМ Д-240 ММЗ



Принципиальная схема испытательного стенда



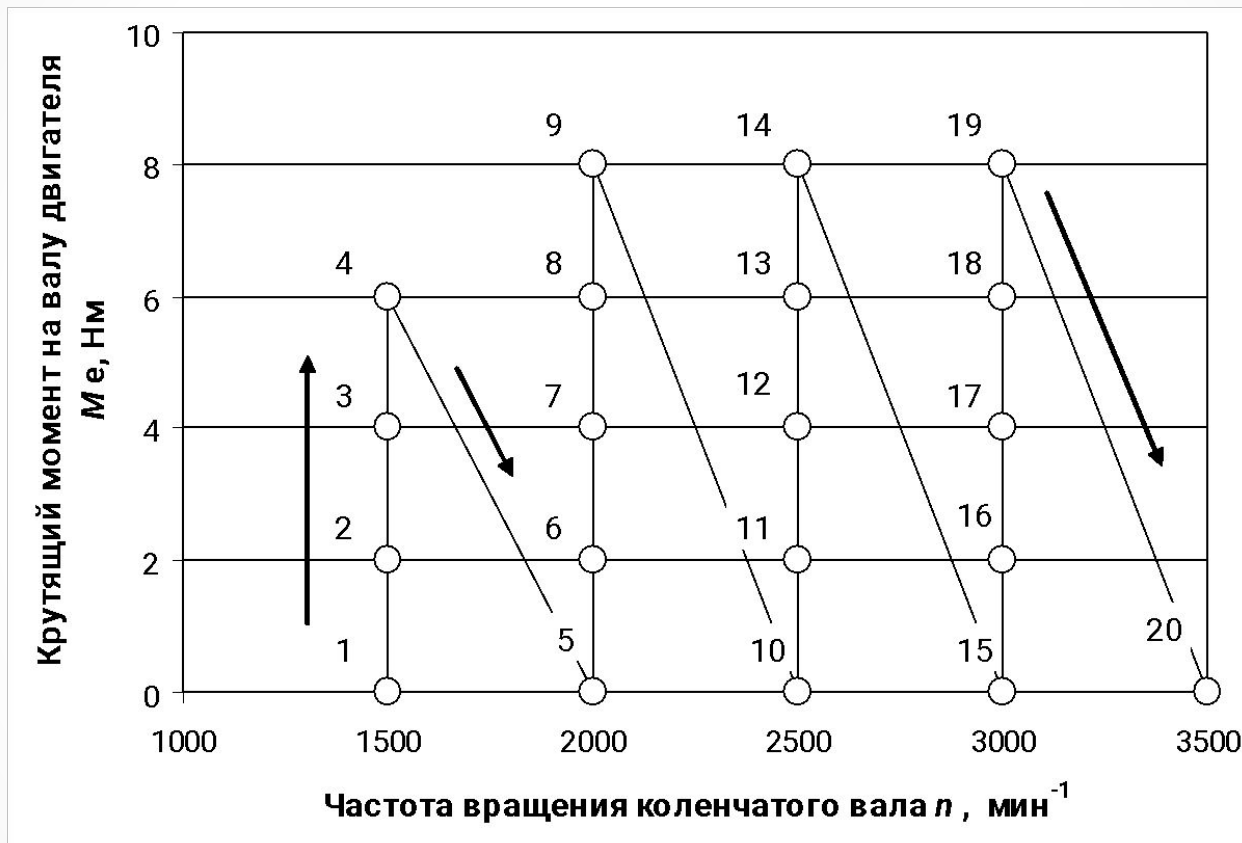




| Тип двигателя   | Четырехтактный, с воспламенением от сжатия  |
|---|---|
| Число цилиндров и их расположение                             | 4 цилиндра, рядное                          |
| Диаметр цилиндра, мм  | 110   |
| Ход поршня, мм  | 125   |
| Рабочий объем двигателя, л                                    | 4,75  |
| Степень сжатия  | 16  |
| Число впускных клапанов                                       | 1   |
| Число выпускных клапанов                                      | 1   |
| Камера сгорания   | Открытого типа с центральным расположением  |
| Топливоподающая аппаратура                                    | Топливный насос 4УТНИ                       |
| Форсунка  | с пятидырчатым распылителем закрытого типа  |
| Распылитель форсунки  | 5-ти сопловой, диаметр отверстия<br>0,31 мм |
| Максимальный крутящий момент/частота (Н·м/мин <sup>-1</sup> ) | 298/1600                                    |
| Номинальная мощность/частота (кВт/мин <sup>-1</sup> )         | 59,1/2200                                   |

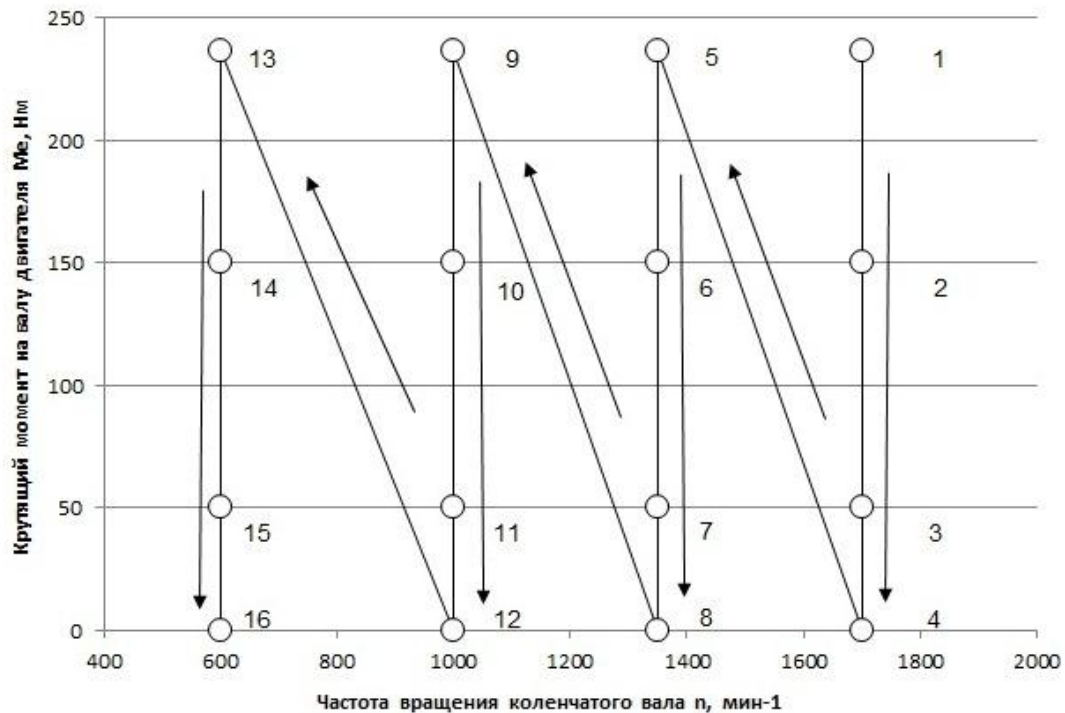


# РАЗРАБОТКА МЕТОДИК И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ДВИГАТЕЛЯХ КМ-170ФА И Д-240 ММЗ.



План эксперимента для двигателя КМ-170ФА

# РАЗРАБОТКА МЕТОДИК И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ДВИГАТЕЛЯХ КМ-170ФА И Д-240 ММЗ.



План эксперимента для двигателя Д-240 ММЗ.

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

| №  | $n, \text{ мин}^{-1}$ | $n, \text{ мин}^{-1}$ | Мкр | $t, \text{ с}$ | $G, \text{ кг/ч}$ | CO <sub>2</sub> % | CH, ppm | NOx, ppm | CO <sub>2</sub> , % | O <sub>2</sub> % | $\lambda$ |
|----|-----------------------|-----------------------|-----|----------------|-------------------|-------------------|---------|----------|---------------------|------------------|-----------|
| 1  | 1448                  | 1500                  | 0   | 184,49         | 0,195             | 0,120             | 47,000  | 404,000  | 2,610               | 16,300           | 0,000     |
| 2  | 1510                  | 1500                  | 2   | 161,95         | 0,222             | 0,100             | 52,000  | 469,000  | 3,070               | 15,300           | 0,000     |
| 3  | 1497                  | 1500                  | 4   | 130,90         | 0,275             | 0,900             | 49,000  | 573,000  | 3,060               | 14,200           | 0,000     |
| 4  | 1537                  | 1500                  | 6   | 83,26          | 0,432             | 0,210             | 61,000  | 11,000   | 4,000               | 20,100           | 0,000     |
| 5  | 2047                  | 2000                  | 0   | 151,96         | 0,237             | 0,050             | 14,000  | 3,000    | 0,690               | 20,100           | 0,000     |
| 6  | 2057                  | 2000                  | 2   | 134,76         | 0,267             | 0,080             | 45,000  | 194,000  | 1,900               | 17,300           | 0,000     |
| 7  | 2043                  | 2000                  | 4   | 100,22         | 0,359             | 0,080             | 49,000  | 410,000  | 3,440               | 15,100           | 0,000     |
| 8  | 2010                  | 2000                  | 6   | 83,32          | 0,432             | 0,120             | 52,000  | 748,000  | 6,300               | 20,100           | 0,000     |
| 9  | 2023                  | 2000                  | 8   | 51,00          | 0,706             | 1,120             | 141,000 | 572,000  | 9,180               | 6,260            | 1,367     |
| 10 | 2497                  | 2500                  | 0   | 110,98         | 0,324             | 0,081             | 40,000  | 331,333  | 3,187               | 15,800           | 0,000     |
| 11 | 2487                  | 2500                  | 2   | 103,48         | 0,341             | 0,120             | 47,333  | 299,000  | 3,287               | 15,433           | 0,000     |
| 12 | 2463                  | 2500                  | 4   | 91,50          | 0,393             | 0,110             | 42,667  | 376,333  | 3,563               | 14,500           | 0,000     |
| 13 | 2403                  | 2500                  | 6   | 70,20          | 0,513             | 0,100             | 14,667  | 504,667  | 3,797               | 12,500           | 0,000     |
| 14 | 2507                  | 2500                  | 8   | 53,12          | 0,678             | 0,223             | 66,000  | 693,000  | 7,357               | 9,700            | 1,877     |
| 15 | 3080                  | 3000                  | 0   | 97,79          | 0,368             | 0,110             | 43,000  | 282,000  | 3,080               | 15,800           | 0,000     |
| 16 | 3000                  | 3000                  | 2   | 82,66          | 0,436             | 0,097             | 36,000  | 398,667  | 3,663               | 14,600           | 0,000     |
| 17 | 2957                  | 3000                  | 4   |                |                   |                   |         |          |                     |                  |           |
| 18 | 2817                  | 3000                  | 6   |                |                   |                   |         |          |                     |                  |           |
| 19 | 2773                  | 3000                  | 8   |                |                   |                   |         |          |                     |                  |           |
| 20 | 3470                  | 3500                  | 0   |                |                   |                   |         |          |                     |                  |           |

| №  | $n, \text{ мин}^{-1}$ | Me, Н/м | Me, кВт | кг/ч   | кг/ч  | *С   | *С   | *С    | кПа   | кПа   | *С    | *С   | *С   | $g_{\text{н}}/кг\text{ВЧ}$ |
|----|-----------------------|---------|---------|--------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|----------------------------|
| 1  | 1447,5                | 1,18    | 0,183   | 14,300 | 0,195 | 37,5 | 22,1 | 98,8  | 0,025 | 2,275 | 76,5  | 25,1 | 21,8 | 1069                       |
| 2  | 1510,0                | 2,00    | 0,317   | 15,900 | 0,222 | 46,6 | 22,3 | 117,3 | 0,033 | 2,267 | 93,6  | 28,0 | 21,9 | 702                        |
| 3  | 1496,7                | 3,43    | 0,537   | 14,467 | 0,275 | 54,3 | 22,6 | 148,0 | 0,100 | 2,333 | 105,7 | 32,1 | 22,1 | 512                        |
| 4  | 1536,7                | 6,17    | 0,993   | 15,033 | 0,432 | 58,4 | 22,8 | 206,7 | 0,033 | 2,500 | 113,0 | 35,3 | 22,1 | 435                        |
| 5  | 2046,7                | 0,67    | 0,217   | 17,600 | 0,237 | 63,3 | 22,9 | 121,7 | 0,233 | 1,400 | 117,7 | 38,6 | 22,2 | 1093                       |
| 6  | 2056,7                | 2,07    | 0,440   | 18,867 | 0,267 | 64,0 | 22,9 | 121,0 | 0,200 | 1,367 | 114,3 | 39,5 | 22,3 | 607                        |
| 7  | 2043,3                | 4,10    | 0,887   | 18,500 | 0,359 | 65,4 | 23,3 | 167,0 | 0,333 | 1,400 | 109,3 | 45,6 | 22,9 | 405                        |
| 8  | 2010,0                | 6,30    | 1,323   | 17,267 | 0,432 | 66,1 | 24,2 | 213,3 | 0,333 | 1,700 | 107,3 | 51,4 | 23,4 | 372                        |
| 9  | 2023,3                | 8,93    | 1,897   | 17,600 | 0,706 | 74,3 | 24,2 | 328,7 | 0,400 | 3,200 | 137,7 | 61,1 | 23,6 | 327                        |
| 10 | 2496,7                | 0,01    | 0,001   | 19,567 | 0,324 | 58,3 | 20,1 | 144,7 | 0,033 | 1,800 | 106,7 | 35,8 | 19,6 | 324383                     |

| №  | n    | n*   | Me  | Pe    | Pгорм | Pгорм * | CO     | CH    | Nox    | CO2    | O2     | $\lambda$ | Gt     | $\Delta H$ | t Gt   |
|----|------|------|-----|-------|-------|---------|--------|-------|--------|--------|--------|-----------|--------|------------|--------|
| 1  | 1700 | 1728 | 236 | 42,01 | 33,60 | 32,6    | 0,08   | 27,25 | 1866,5 | 9,07   | 18,775 |           | 10,297 | 252        | 34,96  |
| 2  | 1700 | 1773 | 150 | 26,70 | 21,36 | 21      | 0,025  | 16,5  | 2103,3 | 5,1275 | 13     |           | 7,0436 | 266        | 51,11  |
| 3  | 1700 | 1786 | 50  | 8,90  | 7,12  | 6,92    | 0,07   | 26,75 | 659,25 | 2,45   | 16,9   |           | 3,3626 | 280        | 107,06 |
| 4  | 1700 | 1789 | 0   | 0,00  | 0,00  | 1,2     | 0,1    | 35,75 | 172    | 1,49   | 18,4   |           | 2,2167 | 286        | 162,4  |
| 5  | 1350 | 1329 | 236 | 33,36 | 33,60 | 32,5    | 0,0425 | 11,75 | 2617   | 8,0925 | 9,145  | 661,4969  | 7,9876 | 168        | 45,07  |
| 6  | 1350 | 1394 | 150 | 21,20 | 21,36 | 21,45   | 0,0075 | 6,5   | 1559,8 | 4,73   | 13,3   |           | 5,3004 | 188        | 67,92  |
| 7  | 1350 | 1445 | 50  | 7,07  | 7,12  | 8,25    | 0,05   | 19,75 | 1001   | 2,3875 | 16,75  |           | 3,2186 | 202        | 111,85 |
| 8  | 1350 | 1481 | 0   | 0,00  | 0,00  | 1       | 0,105  | 34,25 | 136    | 1,2925 | 18,5   |           | 1,6307 | 214        | 220,77 |
| 9  | 1000 | 1031 | 236 | 24,71 | 33,60 | 25      | 0,03   | 24    | 2795,3 | 6,0325 | 11,7   |           | 5,1717 | 107        | 69,61  |
| 10 | 1000 | 1106 | 150 | 15,71 | 21,36 | 14,8    | 0,01   | 31,5  | 1665,5 | 3,465  | 14,975 |           | 3,3692 | 125        | 106,85 |
| 11 | 1000 | 1157 | 50  | 5,24  | 7,12  | 6,1     | 0,0675 | 32,5  | 615,75 | 2,025  | 17,1   |           | 2,1646 | 140        | 166,31 |
| 12 | 1000 | 1203 | 0   | 0,00  | 0,00  | 0,5     | 0,115  | 19,25 | 139,5  | 1,235  | 18,575 |           | 1,4319 | 150        | 251,41 |
| 13 | 600  | 728  | 236 | 14,83 | 33,60 | 18,2    | 0,0175 | 34,75 | 3069,3 | 4,67   | 13,425 |           | 3,084  | 60         | 116,73 |
| 14 | 600  | 785  | 150 | 9,42  | 21,36 | 12,2    | 0,0075 | 34,25 | 2114,5 | 3,15   | 15,425 |           | 2,3005 | 70         | 156,49 |
| 15 | 600  | 827  | 50  | 3,14  | 7,12  | 6,4     | 0,0175 | 32    | 1098,3 | 2,1425 | 16,9   |           | 1,7176 | 78         | 104,8  |
| 16 | 600  | 875  | 0   | 0,00  | 0,00  | 0,25    | 0,0925 | 35,25 | 216,5  | 1,21   | 18,4   |           | 1,1954 | 85         | 150,58 |

|       |      |      |     |
|-------|------|------|-----|
| 107,0 | 37,8 | 19,7 | 472 |
| 109,0 | 41,5 | 19,8 | 364 |
| 117,3 | 47,6 | 20,0 | 314 |
| 110,7 | 57,2 | 20,9 | 297 |
| 116,0 | 63,0 | 24,1 | 960 |
| 122,0 | 61,7 | 21,3 | 535 |
| 122,3 | 63,9 | 21,4 | 389 |
| 101,2 | 36,3 | 19,6 | 524 |
| 115,3 | 55,4 | 21,1 | 438 |
| 115,3 | 61,6 | 23,9 | 657 |

Массивы данных, полученные в ходе экспериментальных исследований, представлены в таблицах, графиках и гистограммах. Процесс обработки экспериментальных данных осуществлялся на основе известных методов математической статистики. Для анализируемых параметров определяли следующие статистические показатели

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

|                 | $n$    | $Me$   | $n^2$  | $Me^2$ | $n \cdot Me$ | CO     | CH     | NOx    | CO <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------------|--------|--------|--------|-----------------|----------------|
| $n$             | 1,000  |        |        |        |              |        |        |        |                 |                |
| $Me$            | 0,005  | 1,000  |        |        |              |        |        |        |                 |                |
| $n^2$           | 0,992  | -0,038 | 1,000  |        |              |        |        |        |                 |                |
| $Me^2$          | 0,026  | 0,965  | -0,019 | 1,000  |              |        |        |        |                 |                |
| $n \cdot Me$    | 0,260  | 0,950  | 0,214  | 0,928  | 1,000        |        |        |        |                 |                |
| CO              | -0,104 | 0,594  | -0,106 | 0,648  | 0,546        | 1,000  |        |        |                 |                |
| CH              | -0,028 | 0,673  | -0,038 | 0,750  | 0,627        | 0,830  | 1,000  |        |                 |                |
| NOx             | -0,246 | 0,721  | -0,241 | 0,643  | 0,584        | 0,349  | 0,417  | 1,000  |                 |                |
| CO <sub>2</sub> | 0,195  | 0,875  | 0,164  | 0,917  | 0,888        | 0,697  | 0,854  | 0,635  | 1,000           |                |
| O <sub>2</sub>  | -0,080 | -0,921 | -0,058 | -0,920 | -0,881       | -0,693 | -0,809 | -0,758 | -0,955          | 1,000          |

На первом этапе исследований после получения замеров концентрации химических компонентов в ОГ выполнялся корреляционный анализ данных. Приведена матрица коэффициентов корреляции, которая отражает наличие линейных зависимостей замеренных концентраций компонентов ОГ и режимных факторов.

При выполнении регрессионного анализа, для описания изменения концентрации компонентов ОГ в режимной области работы двигателя выбрали, так называемую «полную квадратику». Такое описание имеет следующий вид:

$$KONЦ = a + b \cdot n + c \cdot M_e + d \cdot n^2 + e \cdot M_e^2 + f \cdot n \cdot M_e$$



# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

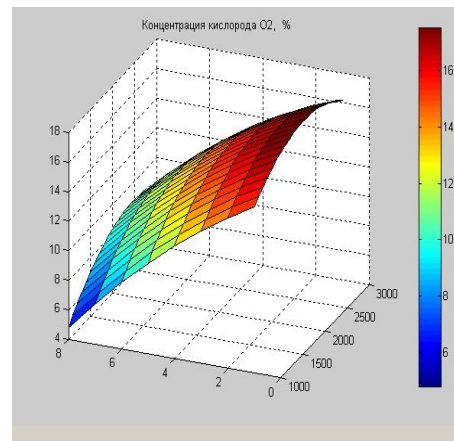
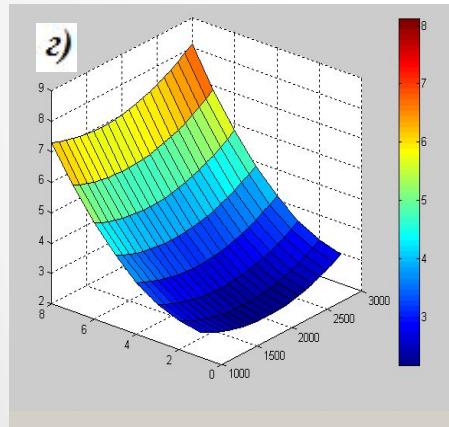
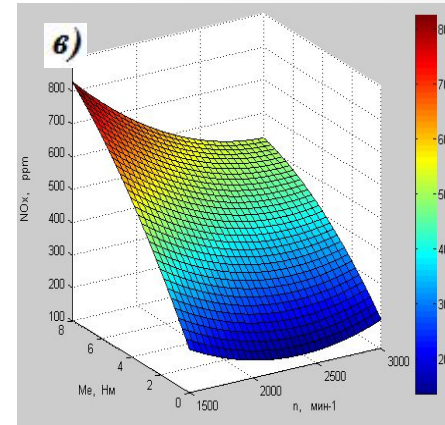
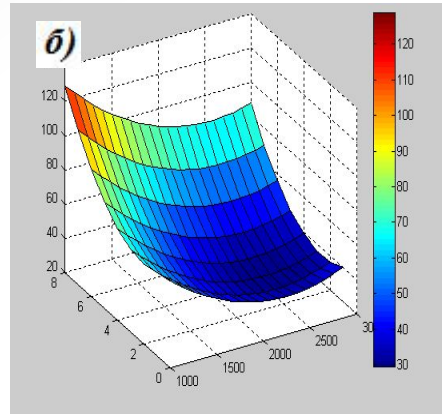
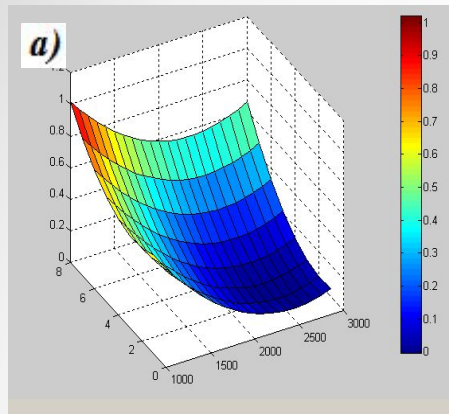


Иллюстрация изменения концентраций компонентов ОГ в режимной области двигателя:

- а) окись углерода  $CO$ , %;
- б) углеводороды  $CH$ , ppm;
- в) окислы азота  $NO_x$ , ppm ;
- г) углекислый газ  $CO_2$ , %;
- д) кислород  $O_2$ , %.

С использованием приведенных в таблице данных в среде программирования MATLAB были построены графики функций  $КОИЦ = f(n, M_e)$ , которые дают наглядное представление о том, как изменяются концентрации компонентов ОГ в режимной области двигателя



# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Анализ характера изменения концентрации компонентов ОГ в режимной области показывает следующее:

\* Концентрация токсичного компонента CO изменяется в пределах 0,05 .. 1,12%, что свидетельствует о хорошем сгорании топлива. На режиме номинальной эксплуатационной мощности  $C_{CO} = 0,66 \%$ . Наибольшая концентрация  $C_{CO} = 1,12 \%$  наблюдается при большой нагрузке и минимальных оборотах двигателя.

\* У химического компонента CH наблюдается приблизительно такой же характер изменения концентрации как у CO. Концентрация CH в зависимости от режима колеблется в пределах  $C_{CH} = 14 \dots 140$  ppm. Наибольший уровень концентрации компонента CH наблюдается на режиме при  $n = n_{\min}$  и  $Me = Me_{\max}$ .

\* Концентрация токсичного компонента NO<sub>x</sub> изменяется в пределах 250 ... 830 ppm, что является достаточно умеренной концентрацией данного компонента (если сравнивать с другими типами дизелей). Наибольшая концентрация  $C_{NOx} = 830$  ppm наблюдается при большой нагрузке и минимальных оборотах двигателя. На режиме номинальной эксплуатационной мощности  $C_{NOx} = 550$  ppm.

\* Концентрация углекислого газа CO<sub>2</sub> изменяется в зависимости от режима в пределах 0,7 ... 9,5%. Характер изменения концентрации данного компонента вполне очевиден.

\* Концентрация кислорода O<sub>2</sub> изменяется в зависимости от режима в пределах 5,8... 20,1%. Характер изменения концентрации данного компонента также вполне очевиден.

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДВИГАТЕЛЕЙ КМ170-ФА И Д-240 ММЗ В ПРОГРАММЕ ДИЗЕЛЬ РК

Диаметр цилиндра D, [мм] 110    Ход поршня S, [мм] 125    Степень сжатия 16  
 Число цилиндров ДВС 4    Номинальная частота вращения вала, [об/мин] 1700

Головка (ушка) цилиндра    Трение    Теплообмен и система охлаждения  
 Камера сгорания    Поршень, кольца

Способ вычисления средней температуры поршня (T<sub>ср\_порш</sub>)  
 По умолчанию  
 Задать явно  
 Пропорционально температуре головки: T<sub>ср\_порш</sub> = C · T<sub>ср\_гол</sub>  
 Расчет КЗ

Материал поршня (головки поршня)  
 Сталь     Алюминий

Эффективная площадь для расчета утечек через кольца, [м²] 1  
 Количество колец в зоне I 3  
 Количество колец в зоне II 0

Справка    Печать    OK    Отмена

Характеристика впрыска    Энтальпия РМ и НКс    Настройка нэт. модели  
 Общие параметры    Рассчитать \*\*\*\*    Камера в поршне

Количество форсунок 1  
 Диаметр соловых отверстий, [мм] 0.3  
 Коэффициент расхода солов при проливе в атмосферных условиях 0.7  
 Количество струй 5  
 Все струи идентичны  
 Сдвигание распылителя относительно оси КС, S, [мм] 0  
 Выступовая точка начала струй от дна камеры, H, [мм] 1.72

| Stray # | Beta, [deg] | Alpha, [deg] |
|---------|-------------|--------------|
| #1      | 0.00        | 66.30        |

Справка    Печать    OK    Отмена

Характеристика впрыска    Энтальпия РМ и НКс    Настройка нэт. модели  
 Общие параметры    Рассчитать \*\*\*\*    Камера в поршне

Способ задания форы  
 Задать по точкам     Задать размеры

Каталог форм КС

| Режим #1 | Режим #2 | Режим #3 | Режим #4 | Режим #5 | Режим #6 | Режим #7 | Р <sub>к</sub> [г/л] |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------------|
| D, [мм]  | 0.46     | 0.91     | 1.36     | 6.73     | 12.10    | 12.46    |                      |
| L, [мм]  | 15.23    | 15.24    | 15.28    | 15.34    | 16.22    | 17.09    | 0.9517               |

Название КС Ysm2  
 Надпоршневой зазор, [мм] 2

Справка    Печать    OK    Отмена

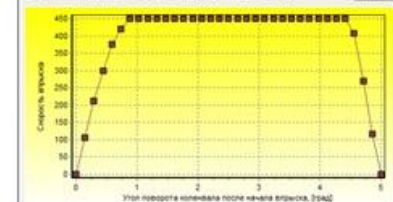
Общие параметры    Рассчитать \*\*\*\*    Камера в поршне  
 Характеристика впрыска    Энтальпия РМ и НКс    Настройка нэт. модели

Название пути #  
 Режим #1    Режим #2    Режим #3    Режим #4    Режим #5    Режим #6    Режим #7    Р<sub>к</sub> [г/л]

Только цикловая подача, соответствующая введенной характеристике впрыска, [г] (реальное)  
 Способ задания характеристики впрыска  
 В виде графика     Параметрически

Продолжительность впрыска, [град. ПКВ] 5  
 Максимальное давление впрыска, [бар] (для справки) 0

Справка    Печать    OK    Отмена



Выпускной коллектор    Впускные каналы    Время сечения выпуска  
 Впускной коллектор    Впускные каналы    Время сечения выпуска

Конструкция  
 а) Тандемные  
 б) Разветвленные  
 в) Одиночный (с)

Число каналов на цилиндр 1  
 Длина канала Lp, [мм] 107  
 Размеры поперечного сечения входной части канала (вид А)  
 Диаметр канала (диаметр эквивалентной трубы) Dp, [мм] 30.7  
 Периметр поперечного сечения канала Pp, [мм] 93.9

Клапан и седло  
 Задать размеры клапана  
 Диаметр стебля клапана, Ds, [мм] по умолчанию  
 Диаметр горла клапанного канала, Dt, [мм] по умолчанию  
 Диаметр тарелки клапана, Dv, [мм] по умолчанию

Эти размеры используются для оценки диаграммы время-сечения: экспресс-методом и методом расчета через ход клапана.  
 Коэф. расхода "Mu" при макс. открытии клапана, использ. в уравн: E<sub>f\_area</sub> = Mu \* (3.14/4) \* (D<sup>2</sup> - D<sub>s</sub><sup>2</sup>)  
 0.7

Справка    Печать    OK    Отмена

Способ расчета рабочего процесса  
 Задать явно  
 Вычислить цикловую подачу по величине коэф. избытка воздуха

Способ задания потерь во впускном устройстве (до компрессора)  
 Задать явно  
 Вычислить по перепаду давлений

Параметры окружающей среды  
 Задать явно  
 Переиспользовать, используя скорость и высоту полета

Способ задания потерь в выхлопной системе (после турбины)  
 Задать явно  
 Вычислить по перепаду давлений

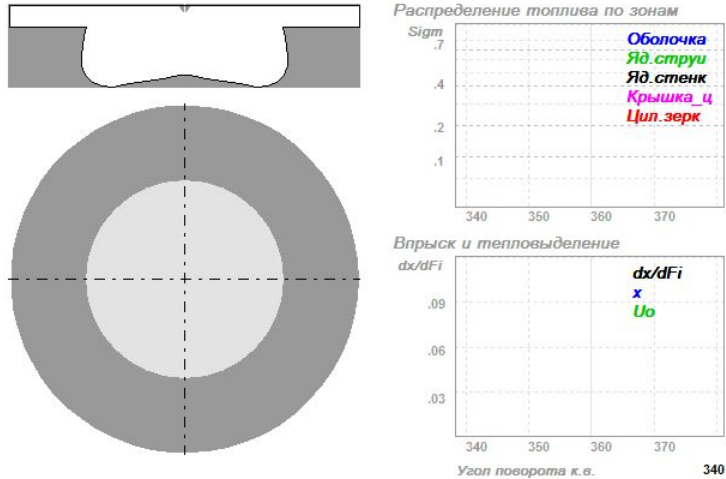
| #1  | #2   | #3   | #4   | #5   | #6   | #7   | #8   | #9   | #10  |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| "РМ-3600"   | 3600 |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Частота вращения коленчатого вала, [1/мин]        | 3600 | 2500 | 2000 | 1500 | 3600 | 3600 | 3600 | 3600 | 3600 |
| Коэффициент избытка воздуха при сгорании Alfa     | 1.75 | 1.75 | 1.75 | 1.75 | 1.75 | 1.75 | 1.75 | 1.75 | 1.75 |
| Угол опережения впрыска/зажигания, [град. до ВМТ] | 18.1 | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   |
| Давление окружающей среды, [бар]                  | 1.13 | 1.13 | 1.13 | 1.13 | 1.13 | 1.13 | 1.13 | 1.13 | 1.13 |
| Температура окружающей среды, [K]                 | 288  | 293  | 293  | 293  | 293  | 293  | 293  | 293  | 293  |
| Потери давления во впускном устройстве, [бар]     | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| Потери давления в выхлопной системе, [бар]        | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |

На первом этапе расчета были заданы основные параметры цилиндропоршневой группы, топливной аппаратуры, камеры сгорания, количества и расположение отверстий распылителя, характеристика впрыска, и состав используемого топлива

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДВИГАТЕЛЕЙ КМ170-ФА И Д-240 ММЗ В ПРОГРАММЕ ДИЗЕЛЬ РК

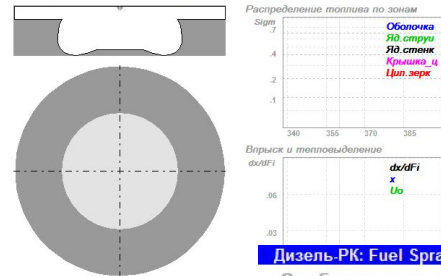
Дизель-РК: Fuel Spray Visualization [www.diesel-rk.bmstu.ru](http://www.diesel-rk.bmstu.ru)

Отображение результатов расчета смесеобразования и сгорания в дизеле  
2021-06-02 01-51-37 "D-240 MMZ" ||| Режим: #1 : "RPM=1800"



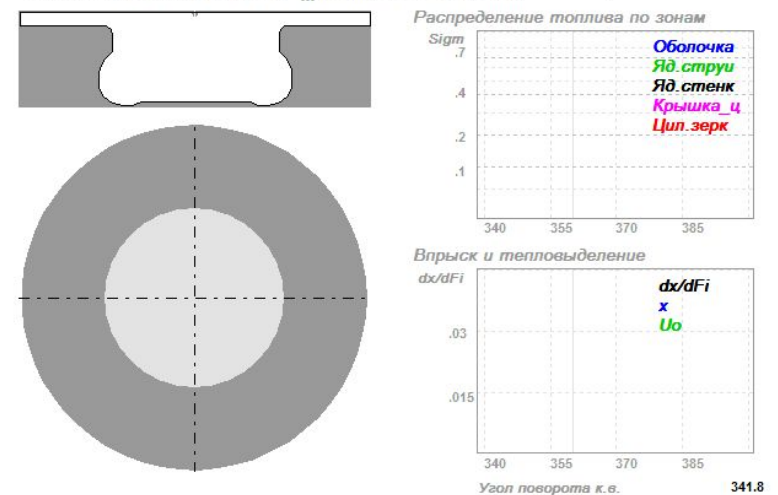
Дизель-РК: Fuel Spray Visualization [www.diesel-rk.bmstu.ru](http://www.diesel-rk.bmstu.ru)

Отображение результатов расчета смесеобразования и сгорания в дизеле  
2021-06-02 23-46-36 "D-240 MMZ" ||| Режим: #2 : "RPM=1700 2; "Alpha o"



Дизель-РК: Fuel Spray Visualization [www.diesel-rk.bmstu.ru](http://www.diesel-rk.bmstu.ru)

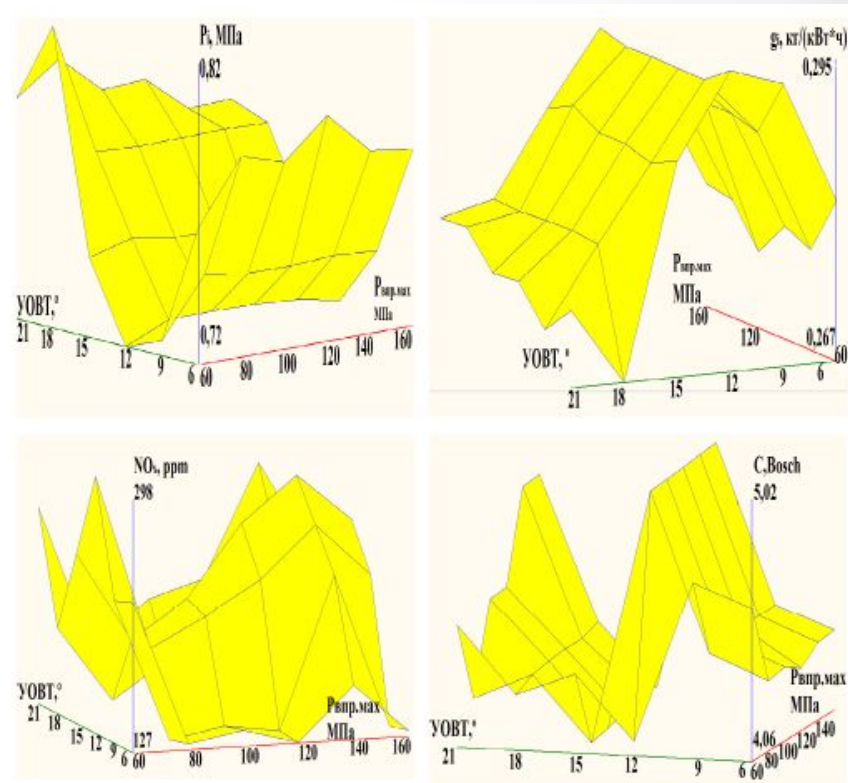
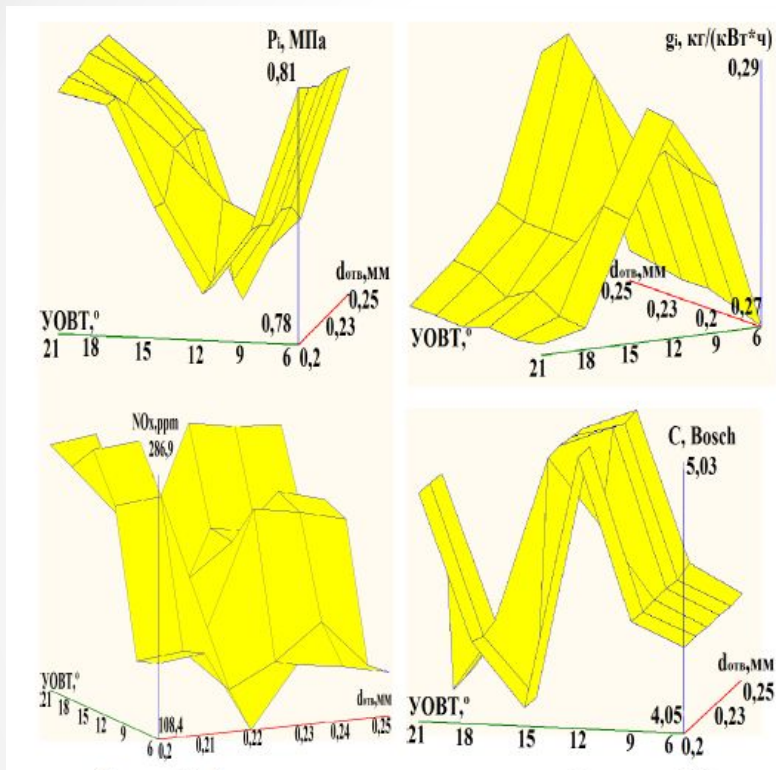
Отображение результатов расчета смесеобразования и сгорания в дизеле  
2021-07-01 01-06-50 "KM170FA" ||| Режим: #1 : "RPM=3600"



Согласно ранее описанному плану эксперимента были смоделированы аналогичные режимы для расчета характеристик образования оксидов азота в зависимости от угла опережения впрыска, давления перед форсункой.

В ходе моделирования была рассчитана и визуализирована распространение топливных струй исследуемых двигателей

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДВИГАТЕЛЕЙ КМ170-ФА И Д-240 ММЗ В ПРОГРАММЕ ДИЗЕЛЬ РК



Изменение диаметра сопловых отверстий и УОВТ

Изменение давления впрыска и УОВТ



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы проведен комплекс по созданию и пуско-наладки исследовательского моторного стенда на базе двигателя Д-240, и установка на него различной аппаратуры. Так были разработаны и определены методики проведения исследований для каждого моторного стендов.

На основе данных полученных экспериментальным путем была верифицирована математическая модель расчета РП дизеля (модель сгорания, образования оксидов азота, газообмена т.д.) и исследования возможностей повышения его экономичности и снижения выбросов  $\text{NO}_x$  с ОГ, позволяющую учитывать конструктивные и регулировочные изменения;

Выполнено расчетно-теоретическое исследование и проведен анализ влияния регулировочных параметров ТПА (угол впрыска топлива (УВТ), количества топлива), в том числе совместно, на показатели дизеля;

На основе анализа результатов численного исследования определены оптимальные значения настроек параметров ТПА, позволяющих обеспечить рациональное сочетание выбросов  $\text{NO}_x$  и удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ , и на основе полученных результатов были выданы рекомендации способствующие повышению показателей двигателя.

Таким образом, цель работы достигнута, поставленные задачи выполнены. Направлением дальнейшего развития темы может являться: исследование влияния рециркуляции отработавших газов на экологические и экономические параметры двигателя при работе с однофазным и многофазным впрыском.

**Спасибо за  
внимание!**