

УДК 621.43

Онищенко Д.О., Буданов Р.Е., Зотов А.А., Ложкин Н.С., Панкратов С.А.

Разработка методики расчёта рабочего процесса дизеля ЧН21/21 с целью определения нестационарных локальных термических граничных условий

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия

Onishchenko D.O., Budanov R.E., Zotov A.A., Lozhkin N.S., Pankratov S.A.

Development of the method of engine process calculation for CHN21/21 diesel in order to determine unsteady local thermal boundary conditions

Bauman Moscow State Technical University

Одной из остро стоящих задач перед отраслью двигателестроения, является форсирование и модернизация существующих среднеоборотных дизелей с целью соответствия современным требованиям и экологическим нормам, это приводит к увеличению максимальной температуры рабочего цикла, что, в свою очередь, приводит к повышению теплонапряженности деталей, контактирующих с горячими газами. В данной работе были получены граничные условия (ГУ), необходимые для расчёта тепло-напряжён-деформированного состояния (ТНДС) крышки цилиндра. Трёхмерный нестационарный расчёт рабочего процесса дизеля проведён в программном комплексе «AVL Fire» в модуле «Fire Workflow Manager». В качестве исходных данных для моделирования использованы результаты расчета в программном комплексе «Дизель-РК». Верификация полученной индикаторной диаграммы дизеля ЧН21/21 проводилась путем сравнения результатов расчета с экспериментальными данными, предоставленными при испытании двигателя на ООО «УДМЗ».

Полученная индикаторная диаграмма рабочего процесса хорошо согласуется с экспериментальной.

Ключевые слова: поршневой двигатель, дизель, математическая модель, рабочий процесс, AVL Fire, оптимизация, граничные условия.

One of the acute problems facing the engine building industry is boosting and modernization of the existing medium-speed diesel engines, in order to meet modern requirements and emission standards, this leads to an increase in the maximum operating temperature of the cycle, which in turn leads to increased thermal stress of parts in contact with hot gases. In this paper, boundary conditions, which are needed for thermal-stress-strain state calculation of the cylinder head, were obtained. The three-dimensional non-stationary calculation of the engine process of a diesel engine carried out in the «AVL Fire» software package in the «Fire Workflow Manager» module. Results of calculation in "Diesel-RK" software package were used as initial data for modeling. Verification of derived indicator diagram of the DM-21 diesel was carried out by comparing the calculation results with the experimental data provided by the engine test of OOO "UDMZ". The resulting indicator diagram of engine process model agrees well with the experimental data.

Keywords: piston engine, diesel engine, mathematical model, engine process, AVL Fire, optimization, boundary conditions.

В ходе эксплуатации дизелей ЧН21/21 (ООО «УДМЗ») были выявлены дефекты алюминиевых крышек цилиндров (разрушение газового стыка, охватывающего втулку цилиндра, течи по форсуночному колодцу и выпускному каналу). С целью повышения надёжности и эксплуатационных свойств данного семейства двигателей, необходимо проведение оптимизации конструкции крышки цилиндра, с целью снижения концентрации напряжений. Первостепенной задачей является изучение теплообмена между рабочим телом и основными деталями

двигателя, для чего необходимо проведение трехмерного нестационарного расчета рабочего процесса дизеля и дальнейшего определения локальных нагрузок [1].

Повышение мощности и экономичности дизелей различного назначения связано с увеличением максимальной температуры рабочего цикла, что, в свою очередь, приводит к повышению теплонапряженности деталей, контактирующих с горячими газами: крышек цилиндра, клапанов, турбин, гильз цилиндра, поршня. В ходе выполнения работ по модернизации, с ростом мощностных показателей двигателя, появляется необходимость в оценке надёжности основных исходных деталей двигателя. С целью получения достоверного результата, необходимо использование современных программных комплексов, которые позволяют определить локальные нагрузки на основные детали двигателя [2].

Нульмерные программные комплексы не позволяют получить локальные ГУ, необходимые для расчёта ТНДС крышки цилиндра, поэтому разработка математической модели рабочего процесса дизеля был выполнен в программном комплексе для решения трехмерных задач вычислительной гидродинамики - «AVL Fire» [3], в модуле «Fire Workflow Manager». Программный комплекс обладает физико-химическими моделями глубокого уровня детализации. Термохимические механизмы процессов горения и образования токсических компонентов учитывают локальное распределение концентраций топлива, окислителя и продуктов горения, а также распределение температур в камере сгорания.

При моделировании сгорания был учтён процесс газообмена (процесс наполнения и выпуска), где геометрические параметры впускных и выпускных каналов были получены из предоставленной конструкторской документации. Граничные и начальные условия в цилиндре задаются по результатам нульмерного моделирования рабочего

процесса, для решения данной задачи использован программный комплекс “Дизель-РК” [4]. Основные параметры двигателя, использованные для расчёта, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные исходные данные

Величина	Значение
Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	1480
Мощность, кВт	1158
Приведённый удельный расход топлива, г/(кВт•ч)	214
Степень повышения давления в компрессоре	3,2
Коэффициент избытка воздуха	2,0
Температура газов перед турбиной, °С	590

На этапе подготовки расчета было проведено разбиение рассматриваемой области на контрольные объёмы. В случае расчета рабочего процесса поршневого двигателя, подвижными элементами, как правило, являются поршень и клапаны. Необходимо подчеркнуть важность генерации сетки, для получения точных результатов вычислений, поскольку грубое или неточное разбиение может существенно повлиять на параметры потока жидкости или газа [5]. Генерация сетки проводилась в модуле Fame Engine Plus (рисунок 1) на основе поверхностной сетки, полученной из твёрдотельной модели [3].

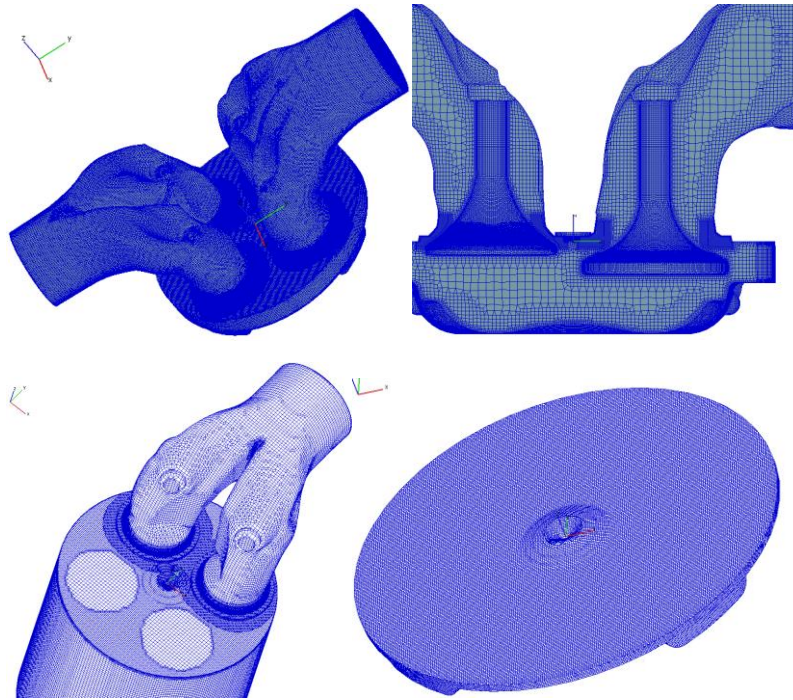


Рисунок 1 – Расчётная сетка при разных углах поворота коленчатого вала (УПКВ)

Поверхности крышки цилиндра и клапанов были предварительно разбиты на зоны для получения граничных условий для дальнейшего расчёта ТНДС крышки цилиндра (рисунок 2).

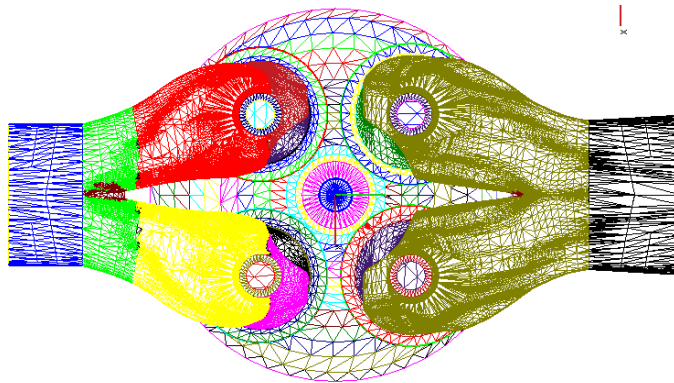


Рисунок 2 – Разбивка на зоны крышки цилиндра и каналов

В качестве граничных условий задаются температуры поршня, крышки цилиндра, втулки, впускного и выпускного клапанов. В качестве начальных условий для расчета используются термодинамические параметры газа в цилиндре двигателя, во впускном и выпускном каналах

на момент начала расчета (30 градусов УПКВ): давление, температура, кинетическая энергия турбулентности, масштаб турбулентности (таблица 2). Граничные условия, а также давление и температура газа в цилиндре двигателя взяты из нульмерного расчёта рабочего процесса. Значения масштаба турбулентности и кинетической энергия турбулентности рассчитаны по рекомендациям [1].

Таблица 2 – Граничные и начальные условия

Граничное условие	Значение
Температура поршня	531 К
Температура крышки цилиндра	462 К
Температура втулки	405 К
Температура впускного клапана	323 К
Температура выпускного клапана	619 К
Начальные условия в цилиндре двигателя	
Давление	2,34 бар
Температура	341 К
Кинетическая энергия турбулентности	$30 \text{ м}^2/\text{с}^2$
Масштаб турбулентности	0,006 м
Начальные условия во впускном канале двигателя	
Давление	2,5 бар
Температура	317 К
Кинетическая энергия турбулентности	$30 \text{ м}^2/\text{с}^2$
Масштаб турбулентности	0,006 м
Начальные условия в выпускном канале двигателя	
Давление	2,1 бар
Температура	705 К
Кинетическая энергия турбулентности	$30 \text{ м}^2/\text{с}^2$
Масштаб турбулентности	0,006 м

Проведено моделирование рабочего процесса для моделей сгорания Магнуссена-Хартагера (при этом варьировался параметр В) и трёхзонной расширенной модели когерентного пламени (варьировался параметр смешения) [6].

В основе модели Магнуссена-Хартагера лежит допущение о том, что скорость реакции горения зависит от одного из трёх необходимых для сгорания факторов: концентрация топлива, концентрация воздуха и концентрация горячих продуктов сгорания[7]:

$$\bar{w}_r = \frac{B}{\tau_t} \rho \min\left(\bar{m}_T, \frac{\bar{m}_{O_2}}{L_0}, C \frac{\bar{m}_{np.cz.}}{1 + L_0}\right)$$

,где \bar{w}_r – средняя скорость реакции горения, \bar{m}_T , \bar{m}_{O_2} , $\bar{m}_{np.cz.}$ – средние концентрации топлива, кислорода и продуктов сгорания, L_0 – стехиометрическое количество воздуха, В и С - эмпирические коэффициенты, учитывающие свойства топлива и параметры турбулентности (В меняется в пределах от 3 до 25 и определяется по экспериментальной индикаторной диаграмме, по данным для аналогичного двигателя или по нульмерному моделированию рабочего процесса; С принимается равным 1.0 для двигателей с воспламенением от сжатия), $t_t = \bar{k}/\bar{e}$ – время турбулентного перемешивания.

Трёхзонная расширенная модель когерентного пламени (ECFM-3Z), в основе которой лежит допущение о том, что каждый контрольный объём можно разделить на три зоны, содержащие, топливо, окислитель (воздух) и топливо-воздушную смесь [8].

Результат моделирования рабочего процесса для различных моделей сгорания представлен на рисунке 3.

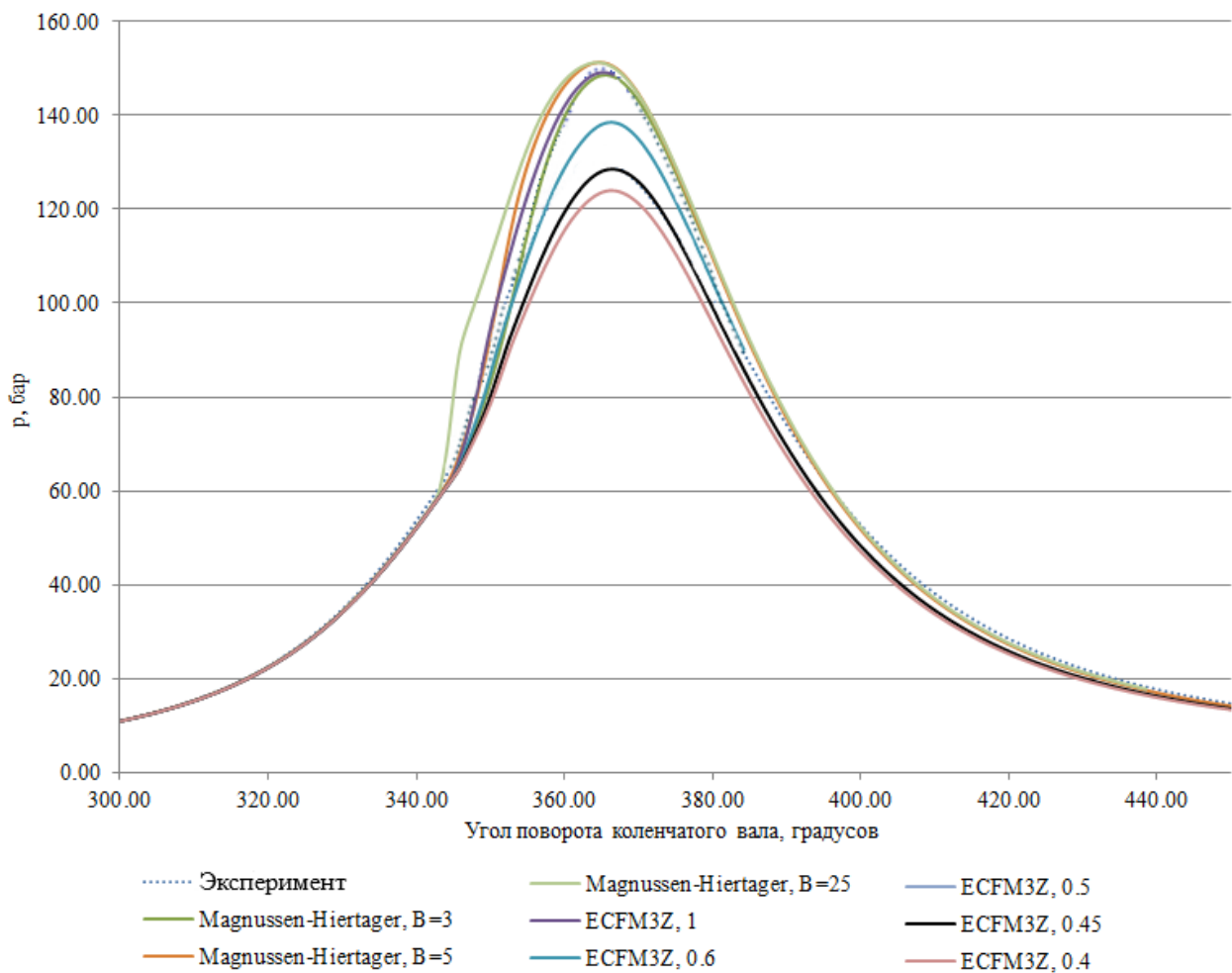


Рисунок 3 – Индикаторные диаграммы при различных моделях сгорания

На рисунке также представлена экспериментальная индикаторная диаграмма, полученная в ходе испытаний двигателя ЧН21/21. Наиболее соответствует эксперименту диаграмма, где использована модель сгорания Магнуссена-Хартагера при значении параметра В равном 3.

Как видно из графиков, полученная расчетная индикаторная диаграмма в результате трехмерного нестационарного расчета рабочего процесса дизеля довольно близка к экспериментальной, максимальное отклонение составило 4,3%.

В результате выполнения трёхмерного нестационарного расчёта рабочего процесса дизеля ЧН21/21 получены значения нестационарных термических граничных условий второго рода со стороны рабочего тела, которые в дальнейшем необходимы для расчёта ТНДС крышки цилиндра

двигателя [9]. На рисунке 4 представлены значения локальных температур в поперечной плоскости сечения камеры сгорания двигателя на такте сжатия и сгорания.

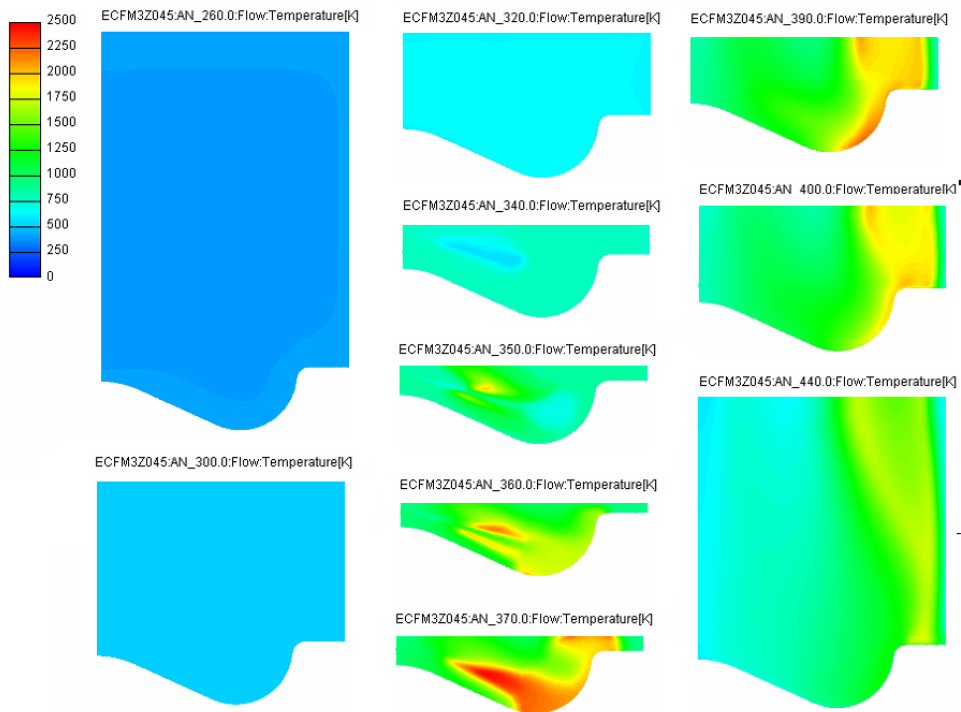


Рисунок 4 – Значения локальных температур

Также получены значения тепловых потоков в стенки расчётной модели, разбитые по зонам. На рисунке 5 представлены значения тепловых потоков на огневой поверхности крышки цилиндра.

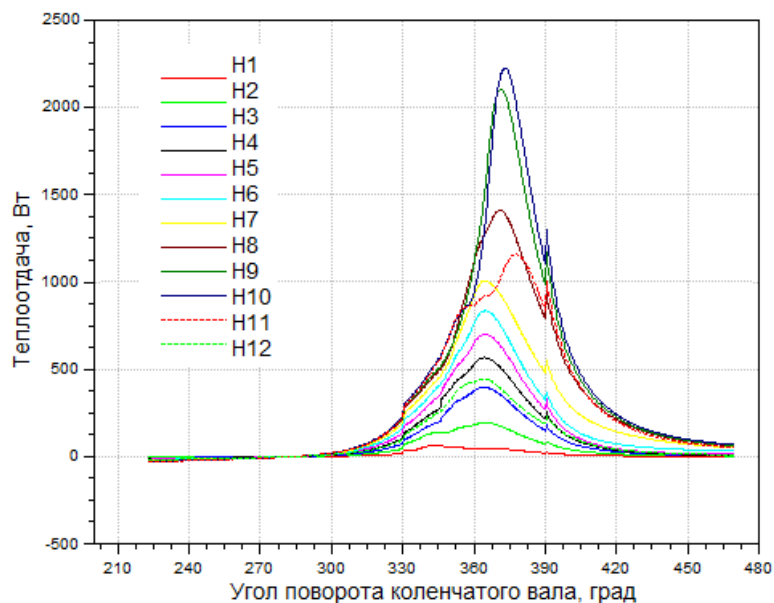


Рисунок 5 – Тепловые потоки по зонам крышки цилиндра

На основании полученных значений тепловых потоков можно выполнить расчёт ТНДС крышки цилиндра, необходимый для определения эквивалентных напряжений, возникающих в крышке от температурных и силовых нагрузок.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

- Разработана методика расчёта математической модели рабочего процесса дизеля ЧН21/21;
- Полученная расчетная индикаторная диаграмма в результате трехмерного нестационарного расчета рабочего процесса дизеля близка к экспериментальной, погрешность составляет 4,3%;
- По результату расчёта определены нестационарные локальные термические граничные условия.

Список использованной литературы

[1] Трёхмерное моделирование нестационарных теплофизических процессов в поршневых двигателях / Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О., Зеленцов А.А. М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.- 85 с.;

[2] Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин, и др.; Под ред. А.С. Орлина, М.С. Круглова. – 4-е изд. перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.

[3] FIRE. Users Manual Version 2013. AVL List GmbH Graz, Austria, 2013. (License Agreement for Use of the Simulation Software AVL FIRE between Moscow State Technical Univ. n.a. N.E. Bauman and AVL List GmbH, 2015).;

[4] Kuleshov A.S. Model for predicting air-fuel mixing, combustion and emissions in DI diesel engines over whole operating range // SAE Tech. Pap. Ser. – 2005. – N 2005-01-2119. – P. 1-16.

[5] Онищенко, Д.О. Улучшение эффективных и экологических показателей дизеля и снижение тепловых нагрузок на его основные детали: дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук (05.04.02) / Онищенко Дмитрий Олегович; МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Москва, 2013. – 234 с.

[6] Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: Учебник для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. – 590 с.;

[7] В. Ф. Magnussen, В. Н. Hjertageron. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. Symposium (International) on Combustion, 1977, P. 719-729.

[8] Colin O., Benkenida A. The 3-Zones Extended Coherent Flame Model (Ecfm3z) for Computing Premixed/ Diffusion Combustion. Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP, Vol. 59 (2004), No. 6, pp. 593-609

[9] Онищенко Д. О., Панкратов С.А. Моделирование теплового состояния крышки цилиндра и клапанов дизеля / Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение» - 2013. - № 4. – С. 94-108.