

Научная статья
УДК 621.433.2

Разработка методики моделирования рабочего процесса дизеля Д-245 при конвертации его на газ при использовании программного комплекса FlowVision

Эдуард Андреевич Савастенко¹, Александр Сергеевич Стряпунин²

^{1,2}Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹e.d.u.a.r.d@inbox.ru

²alex.s.study@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается моделирование рабочего процесса дизеля Д-245, работающего на природном газе. Компьютерное моделирование проводилось с использованием отечественного CFD-модуля FlowVision. Рассмотрены все этапы построения модели: создание геометрической модели, особенности задания движения клапанов и поршня, особенности адаптации расчётной сетки и процесса горения газового топлива. Представлены результаты расчёта в форме визуализации, в численных значениях и графическом виде. Особенную ценность результаты приобретают при возможности наблюдать в реальном времени за процессами впуска, сжатия, сгорания, рабочего хода и выпуска, а также оценивать численные значения температур, давлений, скоростей и других параметров. Проведен сравнительный анализ процессов сгорания при различных коэффициентах избытка воздуха. Получены соответствующие диаграммы.

Ключевые слова: CFD моделирование, дизель Д-245, газовый двигатель, природный газ, FlowVision, рабочий процесс.

Для цитирования: Савастенко Э.А., Стряпунин А.С. Разработка методики моделирования рабочего процесса дизеля Д-245 при конвертации его на газ при использовании программного комплекса FlowVision // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №2 (36).

Original article

Methodology development for modeling of the diesel D-245 work process when converting it to gas using the FlowVision software complex

Eduard A. Savastenko¹, Alexander S. Stryapunin²

^{1,2}Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),
Moscow, Russia

¹e.d.u.a.r.d@inbox.ru

²alex.s.study@mail.ru

Abstract. The article discusses the modeling of the working process of the D-245 diesel engine running on natural gas. Computer simulation was carried out using the domestic FlowVision CFD module. All stages of model building are considered. These are the creation of a geometric model, the features of setting the movement of valves and pistons, the features of adapting the computational grid and the process of burning gas fuel. The results of the calculation are presented in the form of visualization, in numerical values and in graphical form. The results are of particular value when it is possible to observe the processes of intake, compression, combustion, power stroke and exhaust in real time, as well as to evaluate the numerical values of temperatures, pressures, speeds and other parameters. Comparative analysis of combustion processes at various excess air ratios has been carried out. Relevant diagrams have been received.

Keywords: CFD modeling, diesel D-245, gas engine, natural gas, FlowVision, workflow.

For citation: Savastenko E.A., Stryapunin A.S. Methodology development for modeling of the diesel D-245 work process when converting it to gas using the FlowVision software complex. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2023. №2 (36).

Введение

В последние годы вопрос снижения токсичности ДВС и экономии нефтяных топлив вышел на первый план. Одно из направлений развития – это электрификация автомобильного транспорта, однако, в ближайшее время она не может быть осуществлена в полном объеме [1]. Другое направление – это совершенствование существующих двигателей. Несмотря на то, что существует ряд методов улучшения экологических показателей [2], особую популярность набирает конвертация автомобилей на газовое топливо. Это позволяет снижать выбросы токсичных веществ, экономить нефтепродукты и повышать срок службы двигателя на 20-25% [3]. В современном мире при переводе двигателей на альтернативные виды топлив [4] большая роль уделяется оценке рабочего процесса. Применение расчётных программных комплексов позволяет быстро решать эту задачу, а также вносить необходимые изменения в конструкцию двигателя или системы питания для обеспечения необходимых параметров мощности, экономичности и токсичности. Последнее время активно развиваются отечественные

программные продукты, которые не уступают по всем показателям зарубежным аналогам. Одним из таких программных CFD-комплексов является *FlowVision*. Этот программный комплекс (ПК) позволяет решать задачи движения потоков жидкостей и газов, смешивания веществ, горения, теплообмена, диффузии и др. Большую ценность имеет не только получение численных результатов моделирования, но и получения визуализации процесса. Это позволяет быстро оценить достоверность построения модели и скорректировать данные. Результаты моделирования показывают высокую сходимость с экспериментом [5].

В данной работе был применён ПК *FlowVision* для моделирования рабочего процесса двигателя Д-245 при конвертации его на газ. Для этого необходимо было провести несколько предварительных этапов:

- формирование геометрической модели;
- задание характеристик движущихся деталей двигателя;
- моделирование процесса смешивания природного газа и воздуха;
- настройка модели;
- моделирование процесса горения.

В результате моделирования была получена визуализация рабочего процесса, а также построена индикаторная диаграмма.

Ниже кратко рассмотрены этапы моделирования и проведён анализ полученных результатов.

Формирование геометрической модели

За основу для расчёта принят дизельный двигатель Д-245. По документации и основным геометрическим размерам была построена модель одного цилиндра с упрощёнными впускным и выпускным каналами, поршнем и клапанами (рис. 1). Остальные цилиндры и детали в геометрическую модель не были включены с целью сокращения временных и машинных затрат.

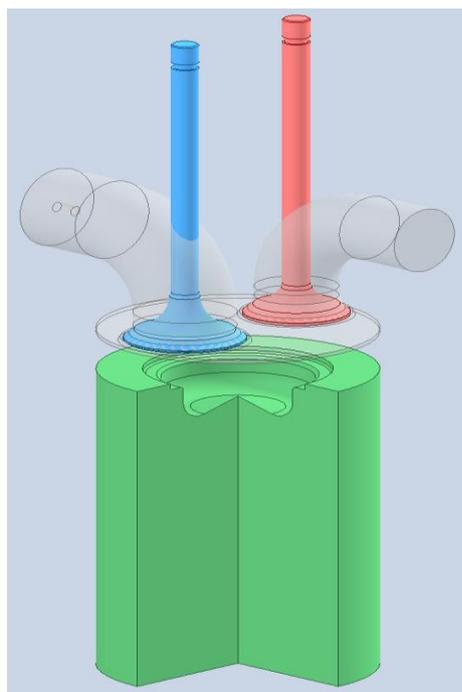


Рис. 1. Геометрическая модель цилиндра двигателя 4ЧН 11/12,5

Задание характеристик движущихся деталей двигателя

Важным этапом моделирования являлось задание характеристик поступательного движения поршня и клапанов. Поскольку в данной модели отсутствует жёсткая связь между данными деталями, ввиду отсутствия механизма газораспределения, то движение задавалось через специальные формулы от времени. Эти формулы каждый расчётный шаг определяли текущий угол поворота коленчатого вала и с какой скоростью должны двигаться компоненты соответственно этому углу в данный момент времени.

В виду отсутствия информации о геометрии профиля кулачков распределительных валов, но известных фазах газораспределения и высоте подъёма клапанов, было принято решение использовать кривую нормального распределения (рис.2) для ориентировочного задания закона движения клапанов:

$$h = h_{max} \cdot \left(4 \cdot (\alpha - b_1) \cdot \frac{\varphi_b - (\alpha - b_1)}{\varphi_b^2} \right)^k, \quad (1)$$

где h – подъём клапана, мм; h_{max} – максимальная высота подъёма клапана, мм; α – текущий угол поворота коленчатого вала, град. ПКВ; b_1 – угол начала открытия клапана, град. ПКВ; φ_b – длина фазы впуска/выпуска, град. ПКВ; k – коэффициент формы кривой.

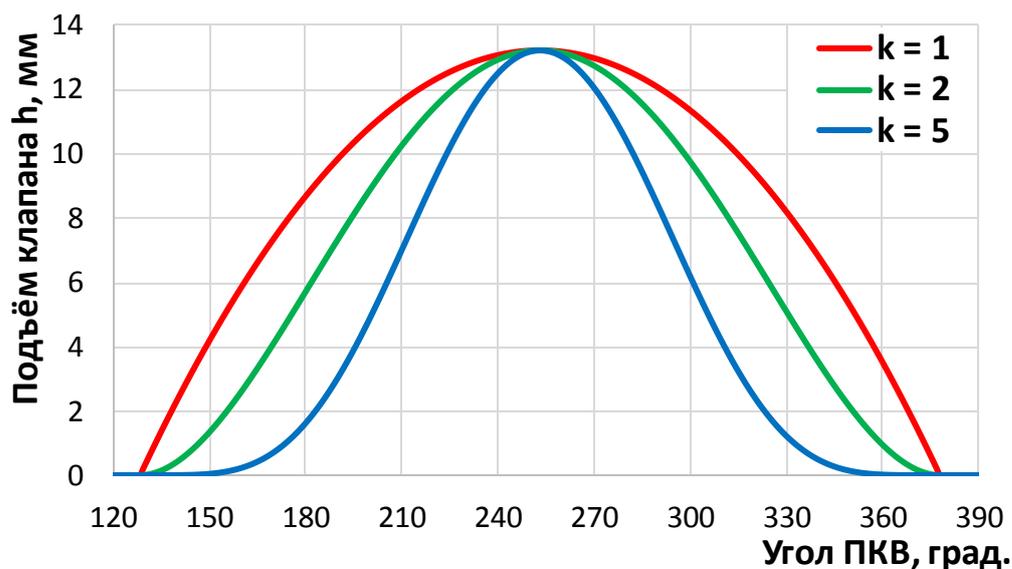


Рис. 2. Влияние коэффициента k на форму кривой подъема клапана

Коэффициент формы кривой для обоих клапанов был принят равным $k = 2$.

Моделирование процесса смешивания природного газа и воздуха

Первоначально планировалось оценить рабочий процесс двигателя, работающего на дизельном топливе, т.е. в классическом варианте. Создав геометрическую модель топливной форсунки, был смоделирован процесс впрыска жидкости в камеру сгорания (рис. 3).

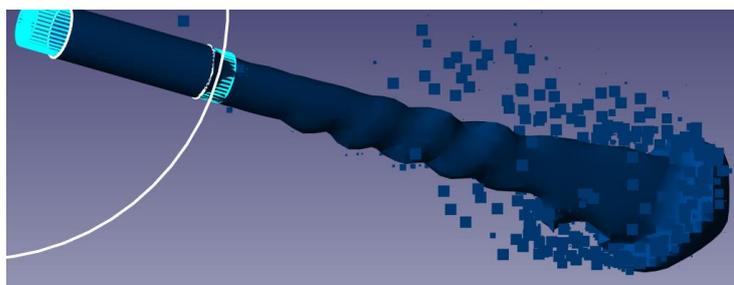


Рис. 3. Топливная струя ($d_{отв} = 0,3$ мм, $p = 500$ бар)

Из рисунка 3 видно, что распыливание имеет схожие черты с теорией (неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, распад капель), но очевидны неправильный фронт струи и капли в форме кубов. В данном ПК используется метод моделирования Эйлер-Эйлер, а не Эйлер-Лагранж. Это говорит о том, что капли хоть и имеют некую массу, но дальнейший их распад не может быть рассчитан в программе, а, следовательно, переход их в газообразную фазу для расчёта сгорания, также не может быть рассчитан

верно. Это позволяет сделать вывод, что на данный момент расчёт жидкого топлива в данном ПК затруднён, но может быть рассчитан с разбиением процесса на несколько этапов и используя дополнительные программы [6]. Поэтому для расчёта было выбрано перспективное газообразное топливо – природный газ.

С целью определения стехиометрической смеси необходимо было рассчитать массы метана и воздуха, поступающих в цилиндр двигателя. Ранее была разработана модель в *FlowVision*, используя которую можно определить массовые доли компонентов. Определив их, можно рассчитать коэффициент избытка воздуха смеси. Регулирование массы газа, поступающего в цилиндр, осуществлялось изменением давления в форсунке. На рисунке 4 представлена визуализация процесса смешивания пропан-бутана и воздуха во впускном трубопроводе двигателя.

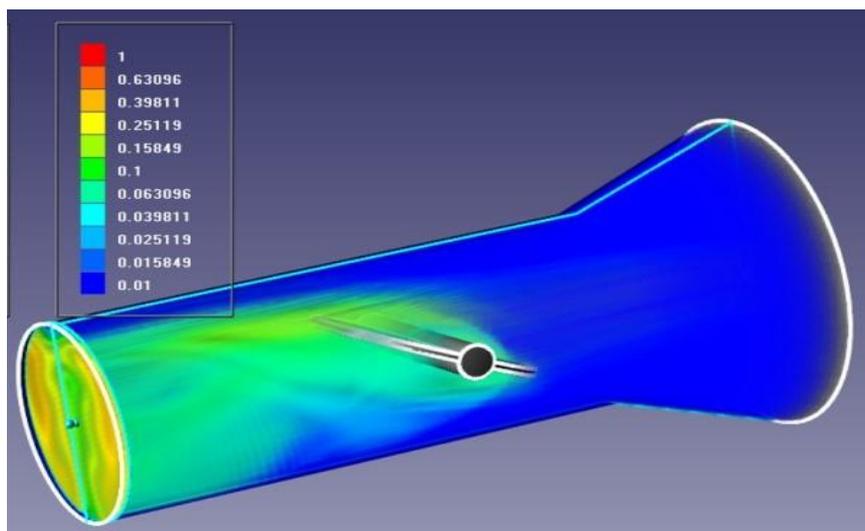


Рис. 4. Распределение массовой доли газа в объёме и выходном сечении после ДЗ = 75% ($d_{\text{отв. форсунки}} = 1 \text{ мм}$, $n = 6 \text{ шт}$, $p_{\text{впр}} = 0,3 \text{ бар}$) [7]

Несмотря на то, что на слайде представлен расчёт для пропан-бутановой смеси, такая же математическая модель была применена и для данного моделирования с природным газом.

Настройка модели

Большое внимание уделялось настройкам модели. Так, например, на стенках каналов, седлах клапанов и поверхности поршня был создан ряд адаптаций (рис. 5). Это необходимо для сходимости расчёта в районах с

большими градиентами параметров и в приповерхностных зонах. Однако адаптация увеличивает количество расчётных ячеек в геометрической прогрессии, что сказывается на общем времени счёта. В данном случае число расчётных ячеек варьировалось от 115 000 до 305 000 (ВМТ и НМТ соответственно).

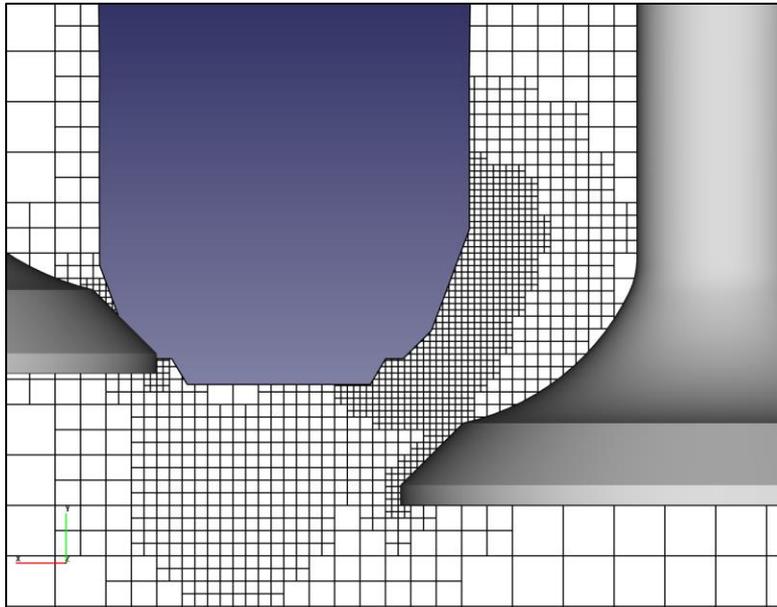


Рис. 5. Адаптация расчётной сетки в районе клапанного отверстия и свечи зажигания

Другим важным параметром являлся расчётный шаг, который задавался через число Куранта-Фридрихса-Леви. В процессе расчёта при открытии выпускного клапана он должен был уменьшаться, чтобы расчёт не «развалился». Это объясняется тем, что в данный момент создаётся большой градиент давлений ($\Delta p=50$ бар) между цилиндром и выпускным каналом. Поэтому расчётный шаг был задан через специальную функцию:

$$\text{If}(\text{Alpha}_2 \text{ in } [135; 270]; 0.05 / (6 * n) ; 1 / (6 * n)) \quad (2)$$

Что означало: если $135 < \text{текущий угол ПКВ} < 270$, то расчётный шаг соответствует времени поворота коленвала на 0,05 градуса; иначе, расчётный шаг соответствует времени поворота коленвала на 1 градус.

Моделирования процесса горения

Для решения задач горения программный комплекс FlowVision предлагает пять моделей горения: Зельдович; Магнуссен; Аррениус; Аррениус-Магнуссен; EDC (Eddy Dissipation Concept). В данном случае

наиболее подходящей является модель Аррениус-Магнуссен, которая используется для ламинарного и турбулентного смешивания горючего и окислителя и учитывает уровень пульсаций восстановленной массовой доли горючего. Для этого были заданы: минимальный и максимальный стехиометрический коэффициенты ($l_{o\ min} = 16,92$, $l_{o\ max} = 17,92$); коэффициенты избытка воздуха, при которых осуществляется сгорание ($\alpha_{min} = 0,5$, $\alpha_{max} = 2$); температура воспламенения газа ($T = 650^\circ\text{C}$) и другие параметры.

Поскольку данный двигатель не работает по газодизельному варианту, а газ имеет гораздо более высокую температуру воспламенения, чем ДТ и бензин (порядка 700°C), то необходимо было применить принудительное зажигание. В *FlowVision* это реализуется через специальный модификатор «Поджиг». Была задана сфера ($r = 4\text{ мм}$), внутри которой при заданном угле опережения зажигания ($\text{УОЗ} = 10^\circ$), резко увеличивается температура (2500°C), что вызывает реакцию воспламенения горючей смеси (рис. 6).

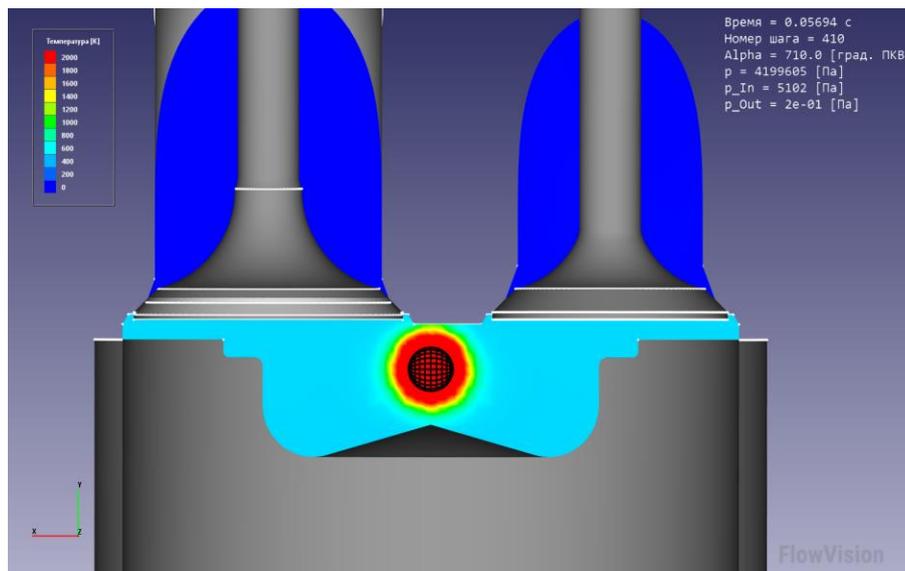


Рис. 6. Распределение температуры в камере сгорания в момент активизации модификатора «поджиг» (свечи зажигания)

Результаты моделирования

На рисунке 7, а, б представлены три варианта горения метана в цилиндре двигателя при различных коэффициентах избытка воздуха ($\alpha=0,9$; $\alpha=1$; $\alpha=1,4$) в различные моменты времени.

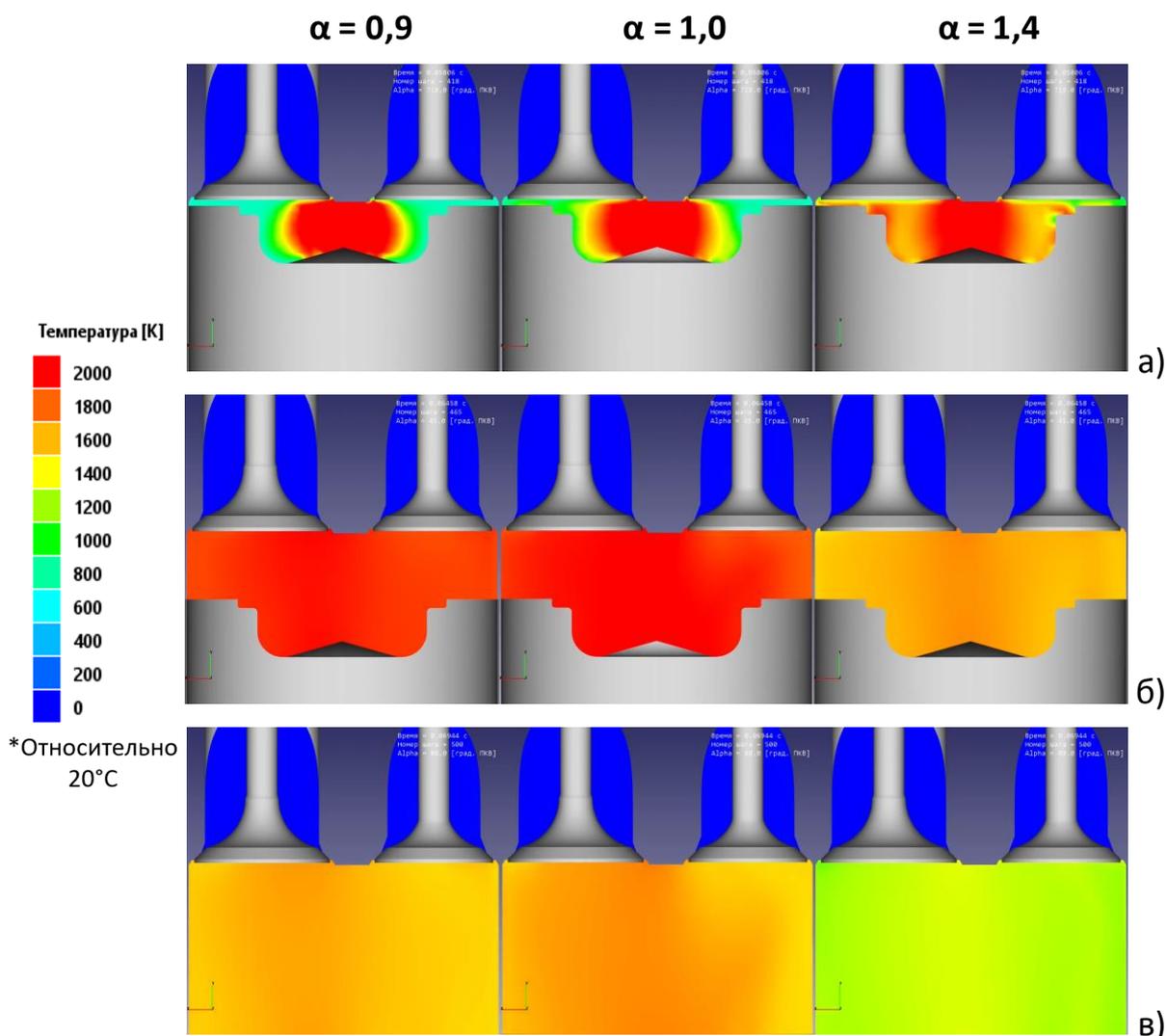


Рис. 7. Горение метана в камере сгорания двигателя при различных коэффициентах избытка воздуха: а) 2 град. ПКВ до ВМТ, б) 40 град. ПКВ после ВМТ, в) 80 град. ПКВ после ВМТ

Ввиду отсутствия сравнительных данных реального прототипа с горением газа и упрощённой модели (отсутствие учёта теплообмена в поршне, стенки цилиндра, ГБЦ, а также отсутствие деталей КШМ и т.д.) нельзя утверждать о корректности полученных результатов. Тем не менее значения температур и давлений с учётом данных допущений можно считать вполне корректными. Дальнейшее уточнение будет проводиться в последующих работах.

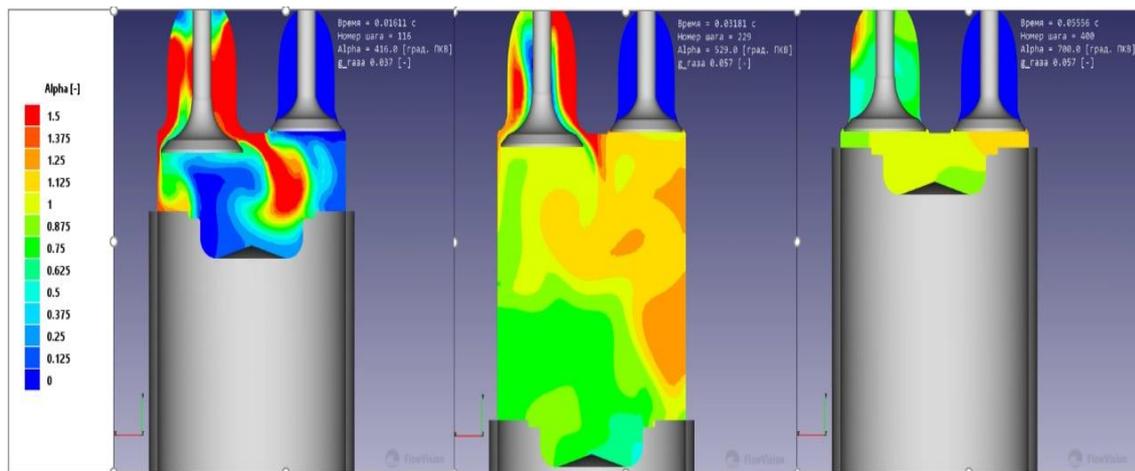


Рис. 8. Процесс смесеобразования в цилиндре

На рисунке 8 представлен процесс смесеобразования ТВС во впускном канале и в цилиндре двигателя. Переменной является коэффициент избытка воздуха. Данная визуализация позволяет оценить степень гомогенизации смеси в процессе впуска и сжатия.

Результаты расчёта представлены в виде индикаторных диаграмм (рис. 9).

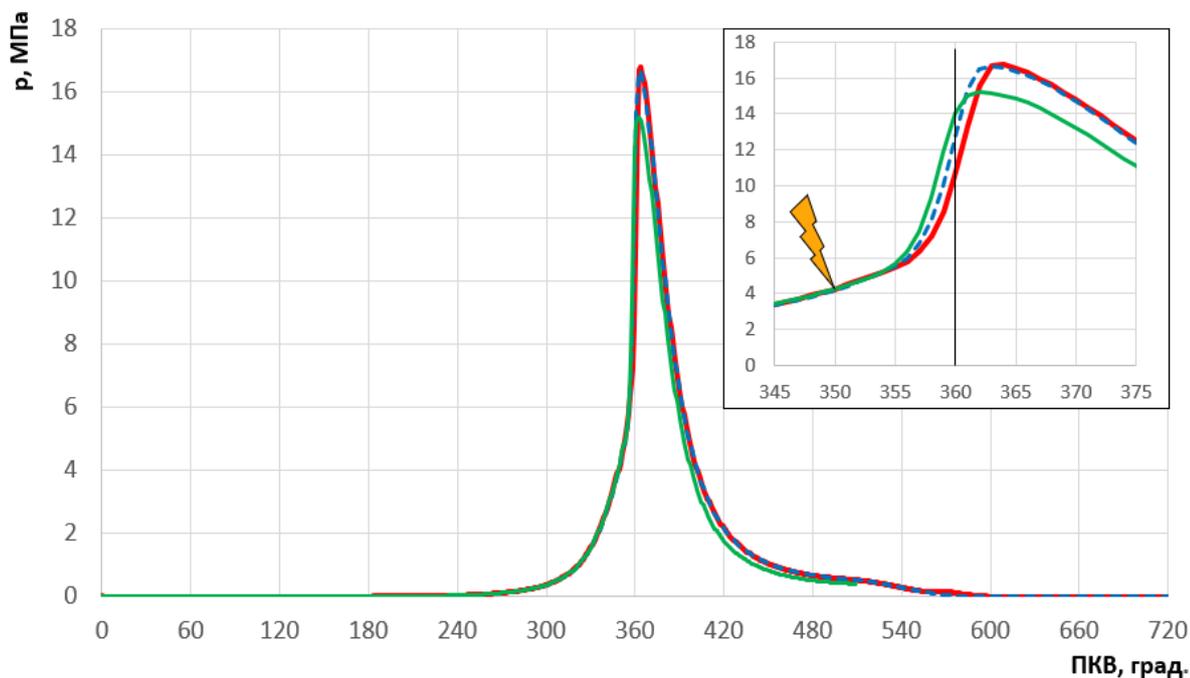


Рис. 9. Индикаторные диаграммы при различных коэффициентах избытка воздуха
(— $\alpha=0,9$; — $\alpha=1$; — $\alpha=1,4$)

Видно изменение давления в цилиндре при различных коэффициентах избытка воздуха ($\alpha = 0,9, 1, 1,4$) на одном режиме ($n=1200$ об/мин). Значения

максимальных давлений $p_z = 16,8$ МПа; $p_z = 16,7$ МПа; $p_z = 15,2$ МПа, соответственно. Как можно видеть из индикаторных диаграмм, результаты моделирования согласуются с теорией. Максимальное давление достигается при обогащённой смеси, а минимальное – при обеднённой. На диаграмме видно, что пик давлений достигается при разных углах ПКВ при одинаковом угле опережения зажигания. Очевидно, что для наилучшего сгорания и достижения пика сгорания вблизи ВМТ при обогащенной и стехиометрической смеси угол опережения зажигания должен быть увеличен.

Выводы

По результатам проведённого моделирования при конвертации двигателя Д-245 на природный газ можно сделать следующие выводы.

1. Сформирована методика моделирования рабочего процесса газодизеля с использованием программного комплекса *FlowVision*.
2. Рассчитаны параметры в цилиндре, в выпускных и впускных каналах: численные значения избыточного давления, плотности, скорости, температуры и др.
3. Получены визуализации различных параметров по сечениям цилиндра, впускного и выпускного каналов, а также во всём объёме исследуемой модели. Данные визуализации позволяют оценить протекание процессов смесеобразования, горения и рабочего процесса в целом. Также используя визуализации по скорости, температуре и давлению можно делать вывод об улучшении геометрии элементов двигателя.
4. Получена индикаторная диаграмма рабочего процесса двигателя при различных коэффициентах избытка воздуха. При постоянной частоте вращения и УОЗ были получены максимальные давления в камере сгорания: $\alpha = 0,9 - p_z = 16,8$ МПа; $\alpha = 1 - p_z = 16,7$ МПа; $\alpha = 1,4 - p_z = 15,2$ МПа.

Список источников

1. Перспективы развития электромобилей в России / С.Н. Девянин, В.А. Марков, А.А. Савастенко, Э.А. Савастенко // 9-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса: сборник докладов Международной научно-технической конференции, Москва, 29 января 2021 года. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2021. – С. 114-121.
2. Возможности повышения экономичности режимов малых нагрузок двигателя VA3-2118 / Н.Н. Патрахальцев, И.А. Петруня, Р.О. Камышников, Э.А. Савастенко // Автомобильная промышленность. – 2014. – № 4. – С. 9-10.
3. Панов, Ю.В. Установка и эксплуатация газобаллонного оборудования автомобилей: учеб. пособие для образовательных учреждений нач. проф. образования / Ю. В. Панов. – 2-е изд., стер. – Москва: Академия, 2006. – ISBN 5-7695-2972-5.
4. Research of the influence of alternative fuels on diesel engine noise level / A.L. Iakovenko, A.Y. Dunin, P.V. Dushkin [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2019 International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control, DS ART 2019, Cholpon-Ata, 01 ноября 2019 года. Vol. 832. – BRISTOL: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012004. – DOI 10.1088/1757-899X/832/1/012004.
5. Балуюв, Д.Е. Расчетно-экспериментальные исследования нестационарных гидродинамических процессов на модели обратного клапана / Д.Е. Балуюв и др. // Проблемы применения и верификации CFD кодов в атомной энергетике: сборник докладов межотраслевой научно-технической конференции, Нижний Новгород, 2018, 9-10 октября. – АО «ОКБМ Африкантов». – С. 132-140.
6. Акимов, В.С. Моделирование распада струй, формируемых форсунками с использованием ПК FlowVision / В.С. Акимов, Г.Ю. Бартенев. – URL: https://flowvision.ru/images/2015/fv_es15_9.pdf
7. Control of the Fuel-Air Mixture of Propane-Butane with Throttle Regulation by Flow Simulation in the FlowVision Software Package / E. A. Savastenko, A. S. Stryapunin, A. A. Savastenko, L. N. Golubkov // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022 - Conference Proceedings, Moscow, 15–17 марта 2022 года. – Moscow, 2022. – DOI 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744265.

References

1. Devyanin S.N., Markov V.A., Savastenko A.A., Savastenko E.A. *9-ye Lukaninskiye chteniya. Problemy i perspektivy razvitiya avtotransportnogo kompleksa: sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii*, Moscow, MADI, 2021, pp. 114-121.
2. Patrakhaltsev N.N., Petrunya I.A., Kamyshnikov R.O., Savastenko E.A. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 2014, no. 4, pp. 9-10.

3. Panov Yu. V. *Ustanovka i ekspluatatsiya gazoballonogo oborudovaniya avtomobiley* (Installation and operation of gas-balloon equipment of cars), Moscow, Akademiya, 2006.
4. Iakovenko A.L., Dunin A.Y., Dushkin P.V., Savastenko E.A., Shatrov M.G. Research of the influence of alternative fuels on diesel engine noise level В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019 International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control, DS ART 2019. BRISTOL, 2020. С. 012004.
5. Baluev, D.E. et al. *Problemy primeneniya i verifikatsii CFD kodov v atomnoy energetike: sbornik dokladov mezhotraslevoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, Nizhny Novgorod, AO «OKBM Afrikantov», 2018, pp. 132-140.
6. V.S. Akimov, G.Yu Bartenev. URL: https://flowvision.ru/images/2015/fv_es15_9.pdf
7. Control of the Fuel-Air Mixture of Propane-Butane with Throttle Regulation by Flow Simulation in the FlowVision Software Package Savastenko, E.A., Stryapunin, A.S., Savastenko, A.A., Golubkov, L.N. 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022, Conference Proceedings, 2022.

Рецензент: В.В. Синявский, канд. техн. наук, доц., МАДИ

Информация об авторах

Савастенко Эдуард Андреевич, канд. техн. наук, доц., МАДИ.
Стряпунин Александр Сергеевич, магистрант, МАДИ.

Information about the authors

Savastenko Eduard A., Ph.D., associate professor, MADI.
Stryapunin Alexander S., undergraduate, MADI.

Статья опубликована по итогам международной научно-технической конференции «10-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса».

Статья поступила в редакцию 18.04.2023; одобрена после рецензирования 25.04.2023; принята к публикации 17.05.2023.

The article was submitted 18.04.2023; approved after reviewing 25.04.2023; accepted for publication 17.05.2023.