

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПЫЛЕНИЯ ТОПЛИВА В БЕНЗИНОВЫХ ДВС С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ВПРЫСКОМ



¹Дмитрий Александрович Масленников, Ph.D.
Донецкий национальный технический университет
Донецк
E-mail: maslennikov_donntu@mail.ru



²Олег Георгиевич Гайдарь, к.т.н., доцент
Донецкий национальный технический университет
Донецк
E-mail: gog2000@mail.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы применимости CFD моделирования для исследования распыления топлива в системах бензиновых двигателей внутреннего сгорания с непосредственным впрыском топлива. Представлены результаты CFD моделирования и произведено сравнение с экспериментальными данными. Проверка результатов моделирования проводилась на основе экспериментальных исследований, проведенных на стенде, снабженном камерой для высокоскоростной съемки и цифрового анализа изображений. Процедура верификации принимает во внимание влияние давления в цилиндре двигателя на скорость распространения топлива.

Ключевые слова: впрыск топлива, CFD моделирование, оптические исследования, ДВС

Введение

Методы компьютерного моделирования процессов сгорания и смесеобразования в ДВС, являются важным инструментом, предопределяющим развитие этой отрасли техники. Их использование позволяет в значительной степени сократить и оптимизировать процесс исследования. Существуют множество программ компьютерного моделирования, которые возможно применить для исследования процессов распыления и сгорания топлива в ДВС [2, 3, 4, 5]. Остановимся на пакете

программного обеспечения CFD моделирования (Computational fluid dynamics), который позволяет моделировать химические и физические процессы в двигателях внутреннего сгорания [1].

Параметры струи топлива являются определяющими в аспекте процесса создания горючей смеси, особенно при использовании бензиновых пьезоэлектрических форсунок. Главным преимуществом таких горелок является возможность получения многократного впрыска топлива при относительно коротких временных промежутках между последующими впрысками [6, 7]. Были поставлены задачи определить сравнительные показатели и на их основании выполнить оценку процесса распыления топлива, выявить влияния параметров впрыска топлива (давление впрыска и время открытия форсунки) на выбранные параметры струи топлива, собрать экспериментальные данные для выявления функциональных зависимостей между этими параметрами и процессом распыления топлива. Моделирование процесса распыления позволяет наблюдать изменение элементов системы-модели, проводить эксперименты, изменяя отдельные параметры модели впрыска и распыления топлива.

Применим метода оптико-геометрических исследований и цифрового анализа получаемых изображений распыления топлива для верификации компьютерной модели процесса распыления топлива.

Основы компьютерной модели

Исследования распыления топлива охватывают многофазовые явления и требуют одновременного решения уравнений для жидкой и газовой фазы. Модель процесса распыления топлива основана на подмоделях, которые в значительной степени влияют на качество моделирования процесса впрыска топлива. Используемая модель состоит из следующих подмоделей:

- турбулентной модели распада капель топлива,
- модель испарения топлива,
- модель распада капель.

Из анализа литературы [8, 9] можно выделить следующие подмодели распыления топлива:

- турбулентная модель распада капель топлива - стохастическая модель,
- модель испарения топлива - модель Дуковича,
- модель распада капель – KHRT (модель поверхностных волн Кельвина-Гельмгольца (KH) и распределение Рэлея-Тейлора (RT)).

Таким образом, модель распыления топлива учитывает движение и распад капель топлива, влияние на этот процесс внешних сил. При

использовании модели KHRT, предполагается, что инжектор образует коническую струю.

Приведенные выше модели были использованы для моделирования распыления топлива в бензиновом ДВС с непосредственным впрыском в камеру сгорания. Результаты моделирования процесс распыления топлива после 0,7 мс от момента начала открытия форсунки при $P_{\text{впр}} = 20$ МПа – давление топлива, $P_{\text{цил}} = 1,5$ МПа – давление в цилиндре двигателя показаны на рис. 1.

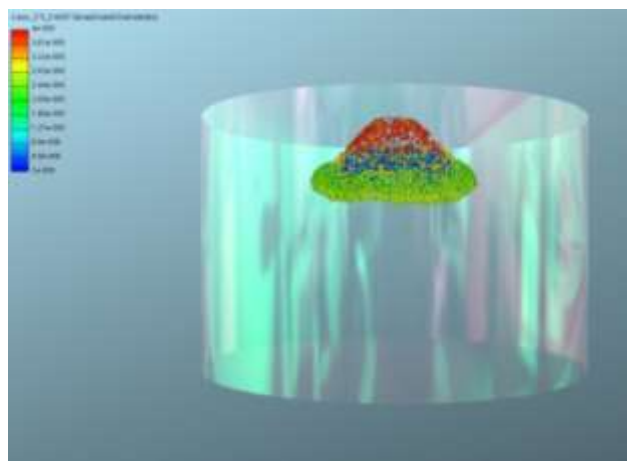


Рис. 1. Распыленное топливо после 0,7 мс от момента начала открытия форсунки (цвет показывает распределение диаметра капель)

Описать процесс распыления топлива можно при помощи трехмерной поверхности с постоянным коэффициентом избытка воздуха (рис. 2.).

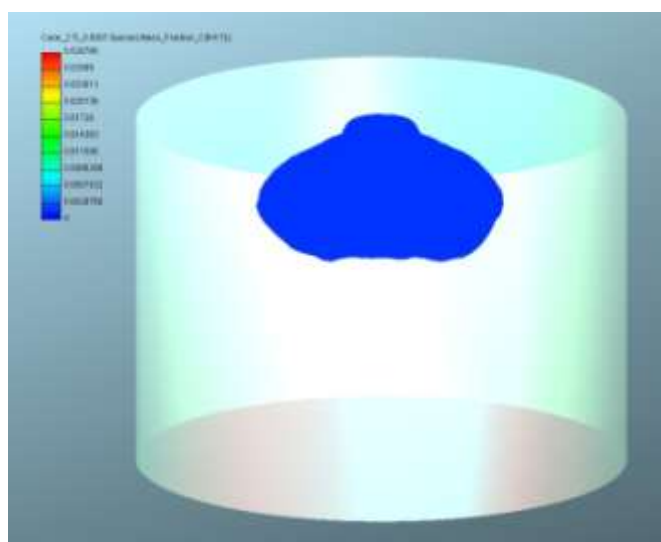


Рис. 2. Трехмерная поверхность с постоянным коэффициентом избытка воздуха ($P_{\text{впр}} = 20$ МПа, $P_{\text{цил}} = 1,5$ МПа)

После завершения впрыска, распределение топлива в камере сгорания не равномерное, это показано на рис 3. Можно выделить области с различным λ - коэффициентом избытка воздуха топливно-воздушной смеси.

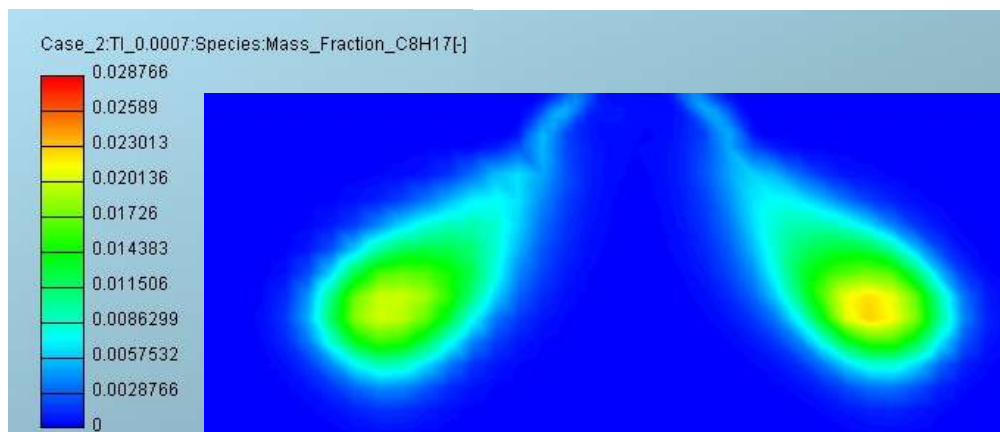


Рис. 3. Массовая доля топлива в цилиндре двигателя ($P_{\text{впр}} = 20$ МПа, $P_{\text{цил}} = 1,5$ МПа)

Методология экспериментальных исследований

Для верификации компьютерной модели использовался стенд для исследования распыления топлива (рис. 4). В стенде использован топливный насос высокого давления (ТНВД), применяемый в системах непосредственного впрыска бензиновых двигателей с максимальным давлением до 25 МПа. Пьезоэлектрическая форсунка установлена в измерительной камере, в которой возможно изменять давление воздуха в пределах 0-4,0 МПа. Расположение инжектора позволяет наблюдать процесс распыления топлива.

В эксперименте [10] применена камера для высокоскоростной съемки (до 250 000 кадров/с). Скорость записи снижена до 10000 кадров в секунду (разрешение по времени 100 мсек). Высокоскоростная съемка проводилась в спектральном диапазоне 380-800 нм.

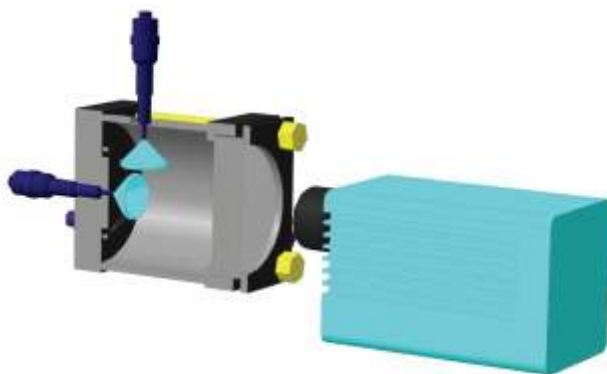


Рис. 4. Стенд для исследования распыления топлива

Экспериментальные исследования проводились для давления впрыска топлива: 20 и 5 МПа (табл. 1). Выбраны предельные значения, для современных систем непосредственного впрыска бензина. Тем не менее, они определяют следующий этап развития этих систем.

Таблица 1

Параметры исследования распыления топлива

№	Давление топлива $P_{впр}$ [МПа]	Противодавление в цилиндре $P_{цил}$ [МПа]	Код эксперимента
1	5	1,5	HPI-50-15
2	20	1,5	HPI -200-15



















Проверка достоверности компьютерной модели распыления топлива

Соответствие компьютерной модели распыления топлива экспериментальным исследованиям проведена с целью выявления расхождений между результатами экспериментальных исследований и моделирования.

Компьютерная модель позволяют прогнозировать процессы, происходящие в тестовой системе (реальной или проектируемой) при некоторых допущениях. Проведенные исследования позволили оценить соответствие компьютерной модели и реального процесса: Результаты для сравнительного анализа сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Сравнение результатов эксперимента и компьютерной модели

	Давление топлива $P_{впр} = 20$ МПа, противодавление $P_{цил} = 1,5$ МПа					
	Время [мс]					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Эксперимент						
Моделирование (капли топлива)						
Трехмерная поверхность						

Оценка достоверности компьютерной модели основана на сравнении соответствия (с точки зрения принятого критерия) конкретных характеристик, полученных на основании результатов экспериментальных

исследований и моделирования (в ходе экспериментов, проведенных с теми же параметрами) [11] и сведены на графике (рис. 5).

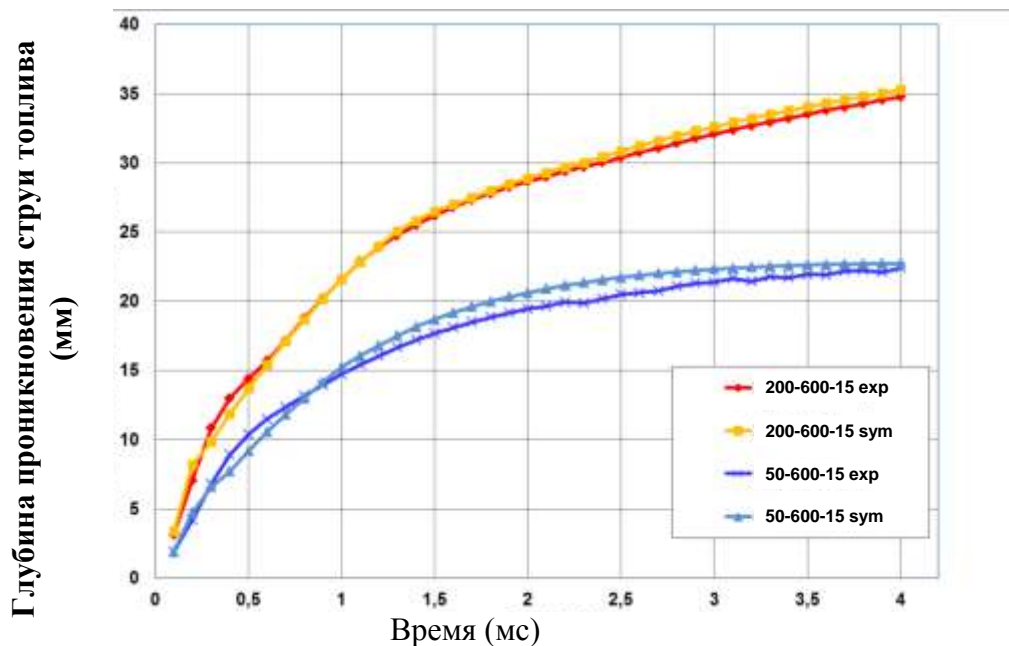


Рис. 5. Оценка достоверности компьютерной модели

На основе параметров, определенных в ходе эксперимента и моделирования, было установлено, что глубина проникновения струи топлива, полученная в ходе моделирования больше по сравнению с экспериментальными результатами. Это связано со сложностью наблюдения оптическими методами (эксперимент) каплей малого диаметра. Максимальная разница данных полученных в ходе исследования менее 5% для давления впрыска 5 МПа и противодавления в цилиндре двигателя 1,5 МПа и времени после начала впрыска 2 мс. Повышение давления впрыска уменьшает разницу между результатами моделирования и экспериментальными исследованиями. При давлении впрыска 5 МПа и после 0,8 мс от начала впрыска существует четкое увеличение разницы между результатами моделирования и экспериментальных исследований глубины проникновения струи топлива.

Расчетное значение скорости проникновения струи топлива показано на рис. 6. Очевидно, что увеличение противодавления в цилиндре двигателя в значительной степени влияет на снижение скорости струи распыленного топлива. Через 0,2 мс существует четкое снижение скорости струи топлива. После завершения впрыска изменения скорости проникновения топлива в цилиндре двигателя незначительны [11].

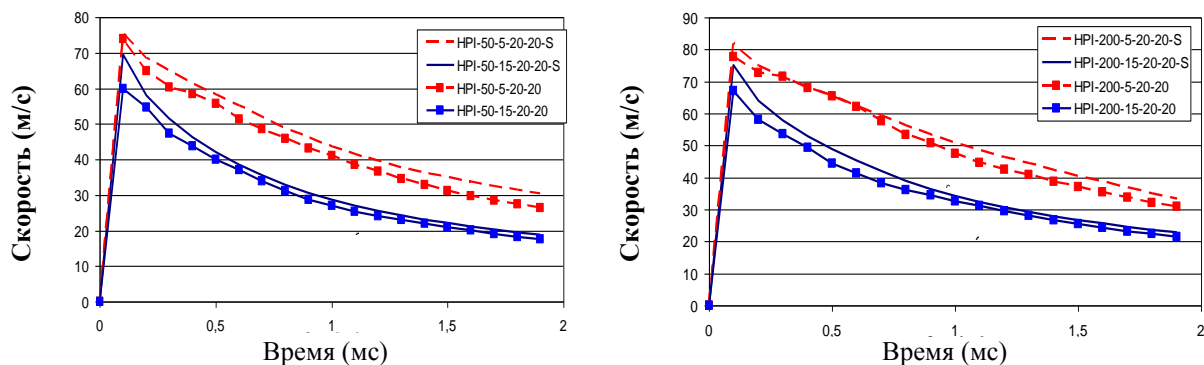


Рис. 6. Сравнение результатов моделирования и экспериментальных исследований влияния противодавления и давления впрыска на скорость распространения струи топлива ($P_{впр} = 5; 20 \text{ МПа}$; $t_{впр} = 0.5 \text{ мс}$; $P_{цил} = 0,5; 1,5 \text{ МПа}$)

Сравнительный анализ показал полную адекватность компьютерной модели процесса распыления топлива в бензиновых ДВС и не критичность принятых допущений при моделировании.

Выводы

На основе экспериментальных исследований и моделирования распыления топлива, было установлено, что:

1. Моделирование процесса распыления топлива позволяет определить параметры струи распылённого топлива при условии, что должным образом отражены входные параметры и геометрия распылителя форсунки двигателя.

2. Глубина проникновения струи топлива, полученная в процессе моделирования больше. Это связано со сложностью регистрации оптическими методами капель малого диаметра.

3. Во время первой фазы распыления топлива (до 0,7 мс от начала впрыска) не выявили существенных различий полученных результатов двумя методами.

4. Противодавление в цилиндре двигателя гораздо сильнее влияет на глубину проникновения струи топлива, чем давление впрыска топлива.

5. Максимальное значение скорости фронта распылённого топлива определены в начальной фазе впрыска около 80 м/с. При увеличении противодавления на 1 МПа максимальное значение скорости уменьшилась приблизительно на 15%. Более высокое давление впрыска увеличивает максимальную скорости струи топлива на 6%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. AVL FIRE ver. 2009, ICE Physics&Chemistry. AVL Graz 2009.
2. Гаврилов А.А., Гоц А.Н. Модифицированная математическая модель цикла поршневого двигателя // Современное машиностроение: наука и образование. Материалы 4-й Международной научно-практической конференции. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 1308 с.
3. Хижняк А.В. Визуализация процесса горения в замкнутом пространстве // Современное машиностроение: наука и образование. Материалы 3-й Международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 1205 с.
4. Iyer S.O., Han Z., Yi J.: CFD Modeling of a Vortex Induced Stratification Combustion (VISC) System, SAE Technical Paper 2004-01-0550.
5. Kim S.-J., Kim Y.-N., Lee J.-H.: Analysis of the In-Cylinder Flow, Mixture Formation and Combustion Processes in a Spray-Guided GDI Engine, SAE Technical Paper 2008-01-0142.
6. Lohfink C., Baecker H., Tichy M.: Experimental Investigation on Catalyst-Heating Strategies and Potential of GDI Combustion Systems, SAE Technical Paper 2008-01-2517.
7. Schwarz Ch., Schünemann E., Durst B., Fischer J., Witt A.: Potentials of the Spray-Guided BMW DI Combustion System, SAE Technical Paper 2008-01-1265.
8. Rawski F., Szpica D.: Symulacyjne metody badań układów dolotowych tłokowych silników spalinowych. PM 2005 zeszyt 2/2005.
9. AVL FIRE руководство пользователя, <https://www.avl.com/-/avl-fire-1>
10. Wisłocki K., Pielecha I., Czajka J., Maslennikov D., Kaźmierowski J.: The assessment of the usefulness of a Rapid Compression Machine in optical research on the injection and combustion processes of liquid fuels. Combustion Engines, 2010-SS4-401, 2010.
11. D. Maslennikov: Badawcza identyfikacja właściwości systemu spalania z bezpośrednim wtryskiem paliwa i zapłonem iskrowym. 149 s. : il. ; 30 cm + 2 recenzje. Rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska, 2012 DrOIN 1457
12. Wisłocki K., Pielecha I., Czajka J., Maslennikov D.: Symulacyjna metoda analizy rozpylenia paliwa ciekłego z wykorzystaniem wtryskiwaczy piezoelektrycznych. TRANSCOMP – XIV International Conference Computer Systems Aided Science, Industry and Transport, Zakopane, 2010.

D. A. Maslennikov, O. G. Gaidar

THE COMPUTER SIMULATION OF FUEL ATOMIZATION IN THE GASOLINE INTERNAL COMBUSTION ENGINE WITH DIRECT INJECTION

all: Donetsk National Technical University

Abstract

The paper presents an attempt to apply a simulation method in the investigations into liquid fuel atomization generated from piezoelectric gasoline injectors used in modern high-pressure injection systems. Individual stages of the simulation research have been discussed and an experimental verification of the method has been carried out. The results of the simulation and experimental research of the injection of liquid fuel have been presented in the form of influence of air backpressure on the fuel spray atomization and fuel propagation.

Key words: fuel injection, simulation method, optical research.

REFERENCES

- [1] AVL FIRE ver. 2009, ICE Physics&Chemistry. AVL Graz 2009.
- [2] Gavrilov A.A., Gots A.N.: The modified mathematical model cycle piston engine // Modern machinery: Science and Education: Materials of the 4th International Scientific-practical conference - SPb .: Publishing house of the Polytechnic. University Press, 2014. - 1308 p.
- [3] Khiznyak A.V.: Visualization of process of combustion in selfcontained space. // Modern machinery: Science and Education: Materials of the 3th International Scientific-practical conference - SPb: Publishing house of the Polytechnic. University Press, 2013-1205 p.
- [4] Iyer C.O., Han Z., Yi J.: CFD Modeling of a Vortex Induced Stratification Combustion (VISC) System, SAE Technical Paper 2004-01-0550.
- [5] Kim S.-J., Kim Y.-N., Lee J.-H.: Analysis of the In-Cylinder Flow, Mixture Formation and Combustion Processes in a Spray-Guided GDI Engine, SAE Technical Paper 2008-01-0142.
- [6] Lohfink C., Baecker H., Tichy M.: Experimental Investigation on Catalyst-Heating Strategies and Potential of GDI Combustion Systems, SAE Technical Paper 2008-01-2517.
- [7] Schwarz Ch., Schünemann E., Durst B., Fischer J., Witt A.: Potentials of the Spray-Guided BMW DI Combustion System, SAE Technical Paper 2008-01-1265.
- [8] Rawski F., Szpica D.: Symulacyjne metody badań układów dolotowych tłokowych silników spalinowych. PM 2005 zeszyt 2/2005.
- [9] AVL FIRE – руководство пользователя, <https://www.avl.com/-/avl-fire-1>
- [10] Wisłocki K., Pielecha I., Czajka J., Maslennikov D., Kaźmierowski J.: The assessment of the usefulness of a Rapid Compression Machine in optical research on the injection and combustion processes of liquid fuels. Combustion Engines, 2010-SS4-401, 2010.
- [11] D. Maslennikov: Badawcza identyfikacja właściwości systemu spalania z bezpośrednim wtryskiem paliwa i zapłonem iskrowym. 149 p. 30 cm + 2 recenzje. Rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska, 2012 DrOIN 1457
- [12] Wisłocki K., Pielecha I., Czajka J., Maslennikov D.: Symulacyjna metoda analizy rozpylenia paliwa ciekłego z wykorzystaniem wtryskiwaczy piezoelektrycznych. TRANSCOMP – XIV International Conference Computer Systems Aided Science, Industry and Transport, Zakopane, 2010.