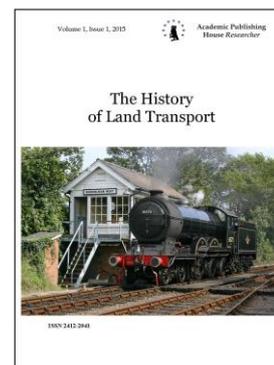


Copyright © 2018 by Academic Publishing House Researcher s.r.o.



Published in the Slovak Republic  
The History of Land Transport  
Has been issued since 2015.  
E-ISSN: 2413-760X  
2018, 4(1): 3-10

DOI: 10.13187/hlt.2018.1.3  
[www.ejournal38.com](http://www.ejournal38.com)



## Articles and Statements

### Optimization of the Working Process and Gas Exchange in Diesel Internal Combustion Engines

Nikita A. Ehlakov <sup>a, \*</sup>, Boris Ya. Bendersky <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov (Kalashnikov ISTU), Russian Federation

#### Abstract

Modeling complete of gas-dynamic processes proceeding in the intake manifold of a diesel engine, using COMSOL Multiphysics modeling software package, includes all of its stages: from creating geometry, determining gas properties and describing physical phenomena, to customizing the solution and the post-processing process. The mathematical model is a model of an ideal compressible gas, described by a system consisting of four equations: the equation of state of an ideal gas, continuity, momentum and energy conservation. The working substance in the intake process is air, in this case has been the ideal gas. At  $t = 0$  are set for the whole calculation area: temperature, pressure and velocity. As a result, were obtained graphs of changes in velocity and pressure on the surface of receivers of various geometries.

**Keywords:** receiver intake manifold, engine cylinder, filling process, COMSOL Multiphysics package.

#### 1. Введение

Известно, что около 80 % всей мировой энергии производится поршневыми двигателями внутреннего сгорания (ДВС). В зависимости от региона суммарная мощность поршневых ДВС превышает совокупную мощность тепловых электрических станций в 5-10 раз. Поэтому совершенствование рабочих процессов, отработка систем и элементов конструкций ДВС с целью повышения их технико-экономических показателей очень важна.

На данный момент двигателестроение достигло такого уровня развития, что улучшение любого показателя поршневого ДВС даже на несколько десятых процента является серьезным достижением для специалистов. Чтобы получить небольшой прирост технико-экономических показателей необходимо принять такую геометрию двигателя, которая бы в полной мере отвечала конкретному рабочему циклу, являясь оптимальной с точки зрения эксплуатационной надёжности для данного уровня механических и тепловых нагрузок. Параметры систем наддува и газообмена, организация индикаторного процесса также должны быть оптимальными в смысле обеспечения максимальной экономичности двигателя при тех же ограничениях по тепловой и механической напряжённости.

\* Corresponding author  
E-mail addresses: [orange18nik@gmail.com](mailto:orange18nik@gmail.com) (N.A. Ehlakov)

Одно из важнейших направлений в данной области, а также цель исследования – это оптимизация рабочего процесса, газообмена, путём определения рациональных геометрических параметров ресивера впускного коллектора и формы впускного канала, с помощью моделирования протекающих в них рабочих процессов.

## 2. Материалы и методы

Для впускных систем поршневых ДВС существует основная задача, от успешного решения которой зависит получение эффективного рабочего процесса: конструктивное исполнение впускной системы с заданными газодинамическими и теплообменными характеристиками (Кулешов, 2011).

Говоря о процессах в газо-воздушных трактах, очень важную роль играет движение воздуха во впускном коллекторе двигателя. Он влияет на наполнение цилиндров двигателя, а именно на то, чтобы рабочая смесь прямолинейно и равномерно делилась по цилиндрам. Повышение наполнения цилиндра путём модернизации впускного тракта приведет к увеличению давления конца впуска, улучшенному смесеобразованию, росту технико-экономических показателей работы двигателя и снижению токсичности отработавших газов (Круглов, 1988).

Основные требования, предъявляемые к впускному тракту, заключаются в обеспечении минимального сопротивления на впуске и равномерном распределении горючей смеси по цилиндрам двигателя.

Ресивер является одной из важнейших частей в системе впуска двигателя. Туда воздух поступает по впускному трубопроводу, и уже в ресивере поток разделяется по цилиндрам двигателя. Из этого следует, что ресивер играет важную роль в процессе наполнения.

В этой статье анализируется движение потока в ресивере впускного коллектора на примере дизельного двигателя при частоте вращения коленчатого вала  $n=2000$  мин<sup>-1</sup>.

Данная исследовательская задача решалась путем моделирования протекающих во впускном коллекторе дизельного двигателя газодинамических процессов, с использованием программного комплекса для моделирования COMSOL Multiphysics, включающая в себя все его этапы: от создания геометрии, определения свойств газа и описания физических явлений, до настройки решения и процесса постобработки.

Математическая модель – модель идеального сжимаемого газа, описывается системой, состоящей из четырех уравнений:

- Уравнение состояния идеального газа

$$p = \rho RT ;$$

- Уравнение неразрывности

$$\rho \nabla \cdot (\mathbf{v}) = 0$$

- Уравнение сохранения импульса

$$\nabla \cdot \left[ -p + \mu \left( \nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T \right) \right] = \mathbf{F}$$

- Уравнение энергии

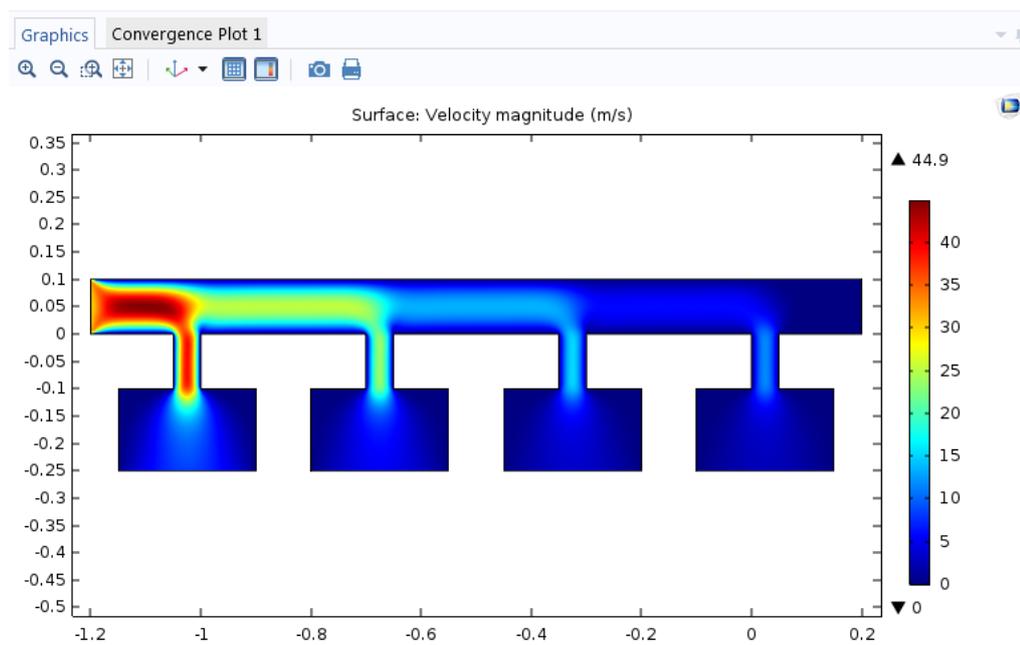
$$\rho \cdot \frac{\partial e}{\partial t} + (\nabla \mathbf{v}) e + p \nabla \cdot \mathbf{v} = \phi - \nabla \cdot \mathbf{q}$$

Где:  $e$  – плотность внутренней энергии,  $\mathbf{q}$  – ускорение свободного падения,  $p$  – давление,  $\rho$  – плотность,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – абсолютная температура,  $\mathbf{v}$  – вектор скорости,  $\nabla$  – оператор набла,  $p$  – импульс,  $\mathbf{F}$  – сила.

Рабочим веществом в процессе впуска является воздух, в данном случае рассматривается идеальный газ. При  $t = 0$  задаются для всей расчетной области: температура, давление и скорость.

### 3. Результаты исследования и их обсуждение

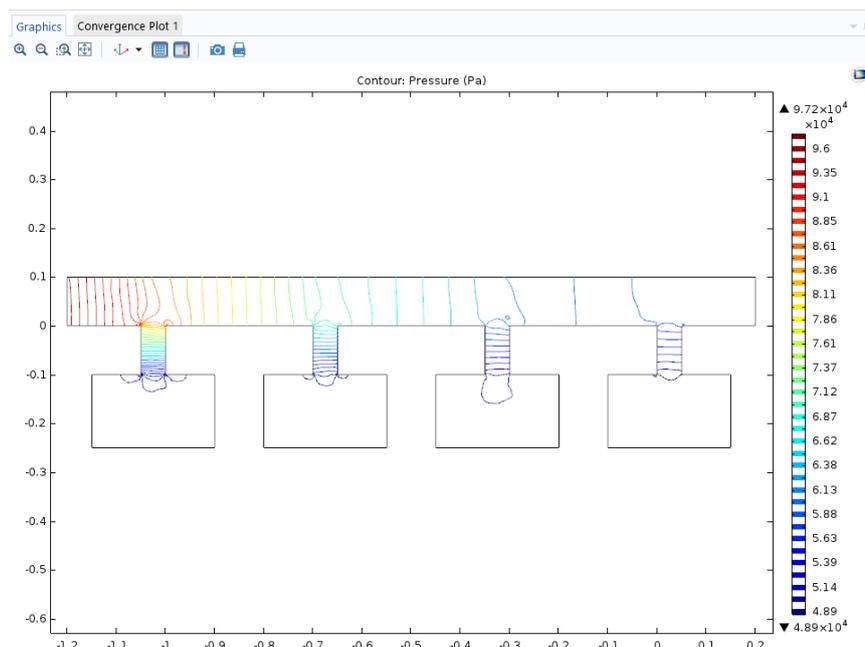
Конструкция обычного ресивера впускного коллектора имеет свои недостатки – в ближний цилиндр к дроссельной заслонке воздух поступает быстрее, и в больших количествах, а в остальные цилиндры по мере их удаления от дросселя (Шароглазов, 2010). Это чётко видно на [Рисунке 1](#). Если допустить, что открыты все впускные клапана и скорость на входе равна 30 м/с, то видно как перед попаданием в первый цилиндр, поток воздуха разделяется на две части. Первая часть двигается в узкий канал перед цилиндром с большой скоростью, вторая по инерции начинает двигаться по ресиверу в сторону остальных открытых цилиндров, но уже с более низкой интенсивностью. Доходя до четвертого цилиндра, скорость потока уже близка к нулю.



**Рис. 1.** Изменение скорости потока по поверхности ресивера, когда открыты все впускные клапана

На [Рисунке 2](#), показано изменение давления по поверхности ресивера. На входе давление близкое к атмосферному, если смотреть далее по поверхности ресивера, оно начинает равномерно падать, минимум достигает до 50000 Па. Также давление уменьшается, когда поток воздуха двигается по узким каналам, которые ведут к цилиндрам двигателя.

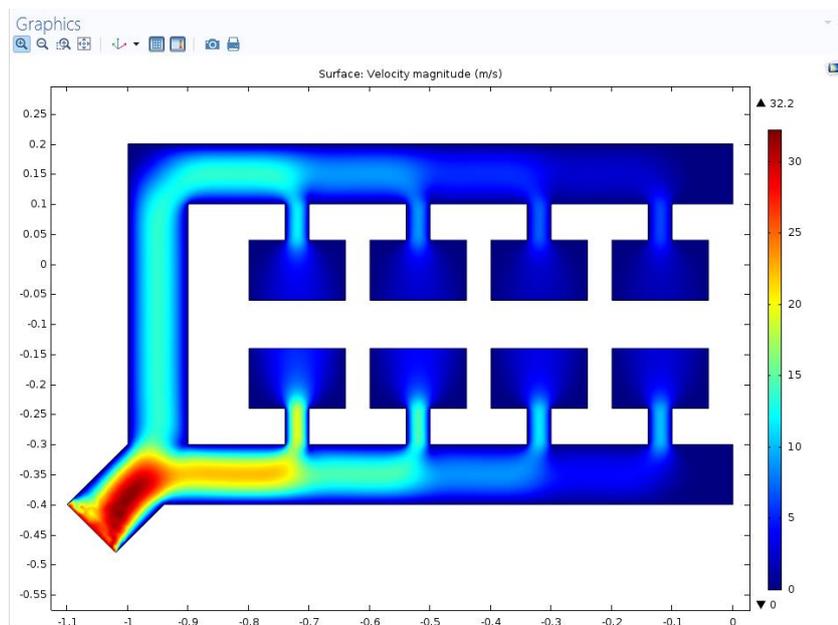
Когда закрыт впускной канал, давление во впускном коллекторе равно атмосферному. На такте впуска воздух поступает в цилиндр через ограниченное отверстие, поэтому во впускном коллекторе возникает разрежение, когда абсолютное давление ниже атмосферного. Впускной клапан закрывается, давление снова возрастает. Пульсации давления от разных цилиндров накладываются друг на друга, и во впускном коллекторе возникает среднее давление, которое ниже атмосферного. Для улучшения процесса газообмена стараются увеличить давление на входе и снизить сопротивление воздушному потоку на впуске (Плотников и др., 2015).



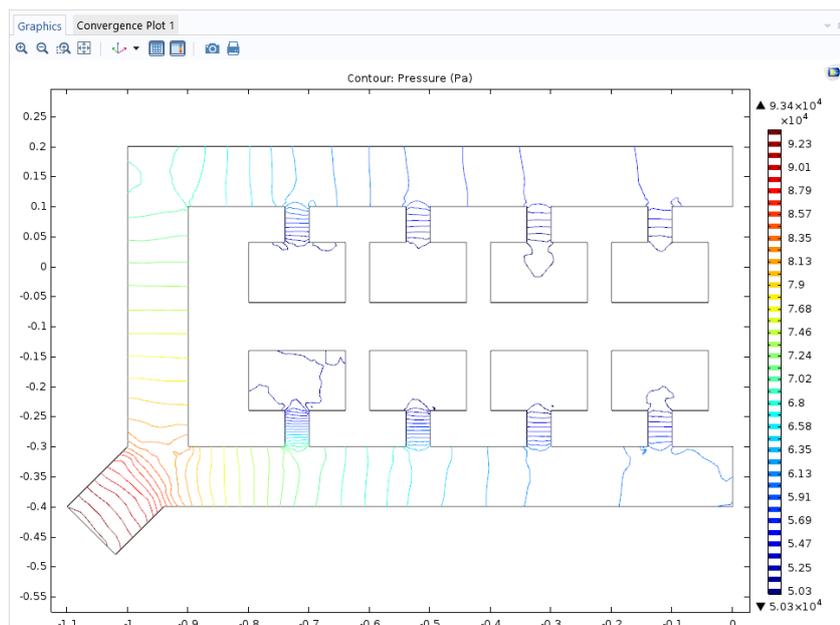
**Рис. 2.** Изменение давления по поверхности ресивера, когда открыты все клапана

Далее были сравнены ресиверы восьмицилиндровых V-образных двигателей с разным расположением впускного отверстия, при заданном поле скоростей от 0 до 30 м/с, и давление на выходе равным 50000 Па.

У первого ресивера, как и ожидалось, наполнение ближних к впускному отверстию цилиндров происходит с большей скоростью. Когда открыты все впускные клапана, то пятый цилиндр получит больше всех свежего заряда. Скорость на входе в цилиндр будет примерно 20 м/с. Давление по поверхности меняется от большего к меньшему. Так, например, у входного отверстие оно равно 98000 Па, а на дальних границах от входа, уже значительно меньше атмосферного, 55000 Па.

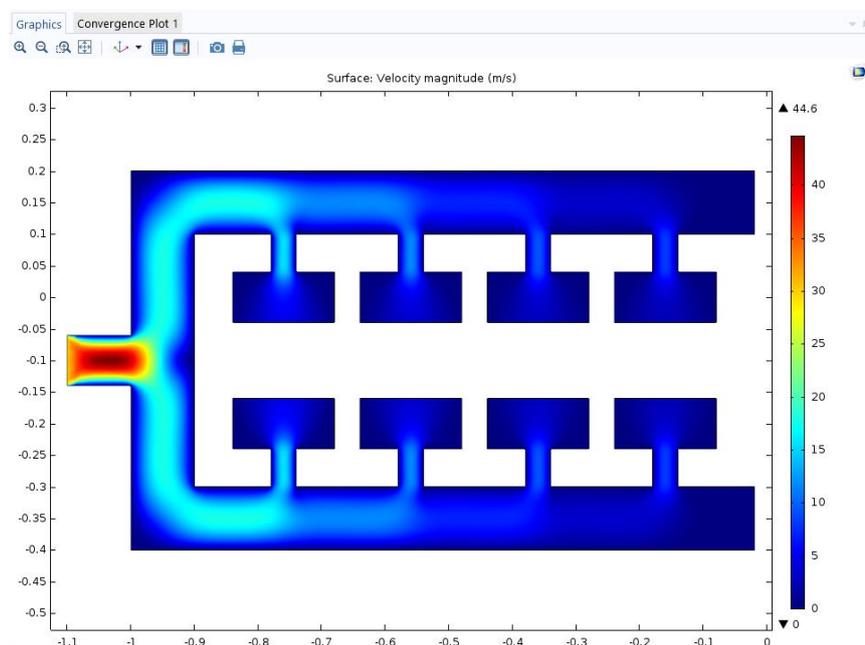


**Рис. 3.** Изменение скорости в ресивере восьмицилиндрового V-образного двигателя

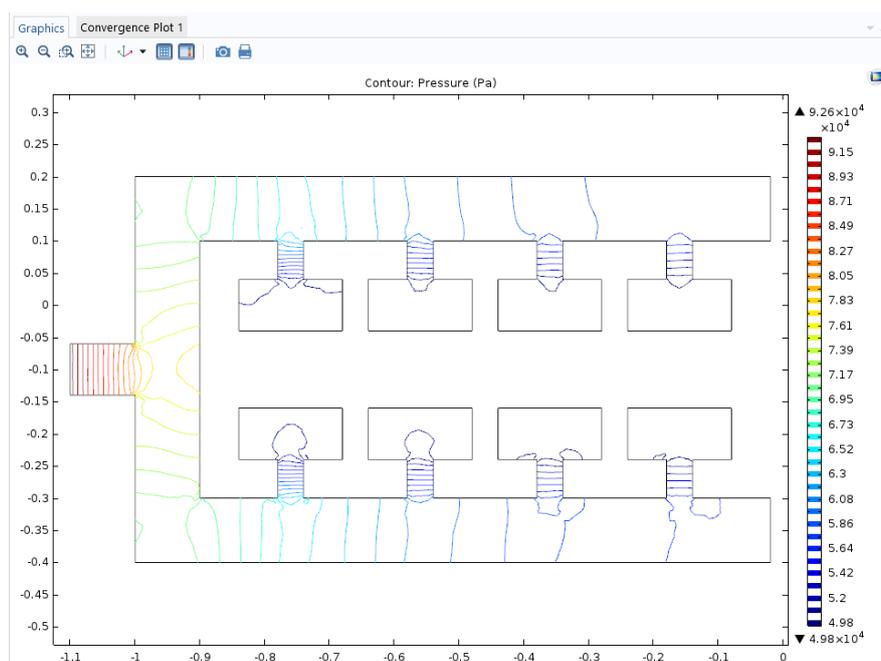


**Рис. 4.** Изменение давления в ресивере восьмицилиндрового V-образного двигателя

В ресивере с измененным расположением впускного отверстия наблюдается падение скорости при входе в цилиндр, так как потоку воздуха приходится делиться на две части, одна из которых начинает движение в сторону первого цилиндра, а другая к пятому. Скорость на входе к этим цилиндрам равна 15 м/с. Изменение давления происходит примерно также как и у первого ресивера. На входе оно примерно равно атмосферному, по впускному каналу, двигаясь к цилиндру, меняется равномерно от 80000 Па до 6500 Па.



**Рис. 5.** Изменение скорости в ресивере с симметричной компоновкой



**Рис. 6.** Изменение давления по поверхности ресивера с симметричной компоновкой

Симметричная компоновка коллектора и патрубков желательна, как для спортивных моторов, так и для уличного использования, поскольку она облегчает равномерное распределение воздуха между цилиндрами (Плотников и др., 2015).

### Иновации в этой области

В настоящее время становятся популярными системы изменения геометрии впускного коллектора. Они являются одними из самых востребованных технологий повышения мощности двигателя, экономии топлива, снижения токсичности отработавших газов (Swapmotor).

Впускной коллектор переменной длины применяется в атмосферных бензиновых и дизельных двигателях для обеспечения лучшего наполнения камеры сгорания воздухом на всем диапазоне оборотов двигателя. На низких оборотах двигателя требуется достижение максимального крутящего момента как можно быстрее, для чего используется длинный впускной коллектор. Высокие обороты выводят двигатель на максимальную мощность при коротком впускном коллекторе. Импульсные движения во впускном коллекторе, безусловно, помогают его работе, но процесс запускается только в диапазоне определенных частот колебаний. Длина импульса пропорциональна длине трубы коллектора. Регулирование длины впускного коллектора (переключение с одной длины на другую) производится с помощью клапана, входящего в состав системы управления двигателем. Электронный блок управления двигателем контролирует число оборотов и подает сигнал на клапан для включения «малого» либо «большого» круга подачи смеси.

Впускной коллектор переменного сечения применяется как на бензиновых, так и на дизельных двигателях, в т.ч. оборудованных наддувом. При уменьшении поперечного сечения каналов впускного коллектора достигается увеличение скорости воздушного потока, лучшее смесеобразование и соответственно обеспечивается полное сгорание топливно-воздушной смеси, снижение токсичности отработавших газов. В системе впускной канал к каждому цилиндру разделен на два канала (отдельный канал на каждый впускной клапан), один из которых перекрыт заслонкой. Привод заслонки осуществляет вакуумный регулятор или электродвигатель, являющийся исполнительным устройством системы управления двигателем. При частичной нагрузке заслонки закрыты, топливно-воздушная смесь (двигатели с распределенным впрыском) или воздух (двигатели с непосредственным впрыском) поступает в камеру сгорания каждого из цилиндров по одному каналу. Создаются завихрения, которые обеспечивают лучшее смесеобразование. При полной нагрузке

заслонки впускного коллектора открываются, увеличивается подача воздуха (топливно-воздушной смеси) в камеры сгорания и соответственно повышается мощность двигателя ([Znaniavto](#)).

#### 4. Заключение

Поток воздуха или рабочей смеси в коллекторе неравномерен в силу его формы. Если коллектор несимметричный, то наибольшее количество воздуха или топливно-воздушной смеси будет попадать в первый цилиндр, а в каждый следующий все меньше. У симметричного также есть недостаток: там наибольшее количество воздуха попадает в средние цилиндры. В обоих случаях цилиндры работают неравномерно на смеси различного качества. Как следствие – падает мощность двигателя. Также на процесс наполнения цилиндра двигателя свежим зарядом оказывают влияние, как конструктивные особенности впускной системы, так и параметры определяющие характер движения заряда. Следовательно, этот анализ дает следующие направления по совершенствованию газообмена в ДВС:

- для увеличения наполнения свежим зарядом необходимо изменить диаметр клапанов;
- изменить геометрию впускного канала и ресивера впускного коллектора, а также подобрать оптимальную длину трубопровода.

#### Литература

[Круглов, 1988](#) – *Круглов М.Г., Меднов А.А.* Газовая динамика комбинированных двигателей внутреннего сгорания. Учеб. пособие для студентов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания». М.: Машиностроение, 1988. 360 с.: ил.

[Кулешов, 2011](#) – *Кулешов А.С.* Развитие методов расчета и оптимизации рабочих процессов ДВС. Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2011. 235 с.

[Плотников и др., 2015](#) – *Плотников Л.В., Жилкин Б.П., Бродов Ю.М.* Моделирование и экспериментальные исследования процессов газообмена в поршневых двигателях внутреннего сгорания // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики.* 2015. № 5/6. С. 75–83.

[Плотников, Жилкин, 2009](#) – *Плотников Л.В., Жилкин Б.П.* Динамические характеристики газодинамики и теплоотдачи во впускном тракте поршневого ДВС // *Двигателестроение.* 2009. № 2. С. 55–56.

[Шароглазов, 2010](#) – *Шароглазов Б.А., Клементьев В.В., Фарафонов М.Ф.* Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов. Учебник по курсу «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания / под ред. Засл. Деят. Науки РФ Б. А. Шароглазова. Челябинск: ЮУрГУ, 2010. 382 с.

[Swapmotor](#) – Swapmotor [Электронный ресурс]. URL: <https://swapmotor.ru> (дата обращения: 30.11.2018).

[Znaniavto](#) – Znaniavto [Электронный ресурс]. URL: <http://znaniavto.ru> (дата обращения: 30.11.2018).

#### References

[Kruglov, 1988](#) – *Kruglov, M.G., Mednov, A.A.* (1988). *Gazovaya dinamika kombinirovannykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya*. [Gas dynamics of combined internal combustion engines]. Ucheb. posobie dlya studentov, obuchayushchikhsya po spetsial'nosti «Dvigateli vnutrennego sgoraniya». M.: Mashinostroenie, 360 p.: il. [in Russian]

[Kuleshov, 2011](#) – *Kuleshov, A.S.* (2011). *Razvitie metodov rascheta i optimizatsii rabochikh protsessov DVS* [Development of methods for calculating and optimizing workflows of the internal combustion engine]. *Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. N.E. Baumana*, 235 p. [in Russian]

[Plotnikov i dr., 2015](#) – *Plotnikov, L.V., Zhilkin, B.P., Brodov, Yu.M.* (2015). *Modelirovanie i eksperimental'nye issledovaniya protsessov gazoobmena v porshnevnykh dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya* [Modeling and experimental studies of gas exchange processes in piston internal

combustion engines]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. № 5/6. pp. 75–83. [in Russian]

[Plotnikov, Zhilkin, 2009](#) – Plotnikov, L.V., Zhilkin, B.P. (2009). Dinamicheskie kharakteristiki gazodinamiki i teplotdachi vo vpusknom trakte porshneвого DVS [Dynamic characteristics of gas dynamics and heat transfer in the intake tract of a piston engine]. *Dvigatelistroenie*. № 2. pp. 55–56. [in Russian]

[Sharoglazov, 2010](#) – Sharoglazov, B.A., Klement'ev, V.V., Farafontov, M.F. (2010). Dvigateli vnutrennego sgoraniya: teoriya, modelirovanie i raschet protsessov [Internal combustion engines: theory, modeling and calculation processes]. Uchebnik po kursu «Teoriya rabochikh protsessov i modelirovanie protsessov v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya / pod red. Zasl. Deyat. Nauki RF B. A. Sharoglazova. Chelyabinsk: YuUrGU, 382 p. [in Russian]

[Swapmotor](#) – Swapmotor [Elektronnyi resurs]. URL: <https://swapmotor.ru> (data obrashcheniya: 30.11.2018).

[Znanieavto](#) – Znanieavto [Elektronnyi resurs]. URL: <http://znanieavto.ru> (data obrashcheniya: 30.11.2018).

### **Оптимизация рабочего процесса и газообмена в дизельных двигателях внутреннего сгорания**

Никита Александрович Ехлаков <sup>a,\*</sup>, Борис Яковлевич Бендерский <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», Российская Федерация

**Аннотация.** Выполнено моделирование газодинамических процессов протекающих во впускном коллекторе дизельного двигателя, с использованием программного комплекса для моделирования COMSOL Multiphysics, включающая в себя все его этапы: от создания геометрии, определения свойств газа и описания физических явлений, до настройки решения и процесса постобработки. Математическая модель – модель идеального сжимаемого газа, описывается системой, состоящей из четырех уравнений: уравнение состояния идеального газа, неразрывности, сохранения импульса и энергии. Рабочим веществом в процессе впуска является воздух, в данном случае рассматривался идеальный газ. При  $t=0$  задаются для всей расчетной области: температура, давление и скорость. В результате получены графики изменения скорости и давления по поверхности ресиверов с разной геометрией.

**Ключевые слова:** ресивер впускного коллектора, цилиндр двигателя, процесс наполнения, пакет COMSOL Multiphysics.

\* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: [orange18nik@gmail.com](mailto:orange18nik@gmail.com) (Н.А. Ехлаков)