

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВПУСКНЫХ КАНАЛОВ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА OPENFOAM

С.Д. Сташевский

stashevskiysd@student.bmstu.ru  
SPIN-код: 1501–8584

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Проведено численное моделирование течения через спиральный впускной канал с тарельчатым клапаном с помощью открытой интегрируемой платформы для численного моделирования задач механики сплошных сред — OpenFOAM. Моделирование осуществлялось в стационарной несжимаемой постановке при различных положениях клапана. Разработана и выложена в общий доступ полуавтоматизированная методика обработки полученных данных, представляющая собой набор скриптов на языках *bash* и *MATLAB*. Построены графики зависимости вихревого числа в цилиндре и коэффициента расхода от подъема клапана. Для оценки динамики вихря в цилиндре вихревое число определяли как по всему его объему, так и по его частям. Поведение полученных графиков качественно согласуется с известными экспериментальными данными.

### Ключевые слова

CFD, OpenFOAM, поршневой двигатель, такт впуска, спиральный впускной канал, вихреобразование, коэффициент расхода, вихревое число

Поступила в редакцию 22.11.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

---

**Введение.** При проектировании впускных каналов двигателей внутреннего сгорания для обеспечения высокого качества газообмена и сгорания необходимо проводить серии расчетов при различных подъемах клапана как для определения их расходных характеристик, так и для оценки способности генерации вихря в цилиндре в период впуска. Два этих фактора существенно влияют на мощностные, экономические и экологические характеристики двигателя, именно поэтому вопросу моделирования течения через впускной клапан поршневого двигателя посвящено большое число работ как отечественных [1–4], так и зарубежных авторов [5–9]. При проведении расчетного исследования приходится изменять твердотельную модель канала для каждого подъема клапана, настраивать параметры генерации сетки на ее основе и проводить CFD-расчет. Это делает процедуру определения характеристик впускных каналов весьма трудоемкой.

Второй проблемой, с которой приходится сталкиваться при расчетной доводке каналов, является высокая стоимость специализированного программно-

го обучения, которая повышает общую стоимость проектирования, что особенно важно для небольших организаций.

Целью данной работы являлось создание методики определения характеристик впускных каналов поршневых двигателей с помощью открытой интегрируемой платформы OpenFOAM [10], применением которого удалось решить описанные выше проблемы. Являясь довольно гибким инструментом, он позволяет автоматизировать многие процессы. Данное качество было использовано — удалось решить проблему изменения твердотельной модели вручную для каждого подъема клапана.

**Параметризация геометрии.** Для тестирования разработанной методики было решено использовать спиральный впускной канал, для построения которого использованы пять сечений (рис. 1) для вытягивания внешней стенки канала (одно впускное и четыре остальных — пересекающие ось клапана). Внутренняя стенка формировалась вращением образующей. Размеры сечений были выбраны в соответствии с [11].

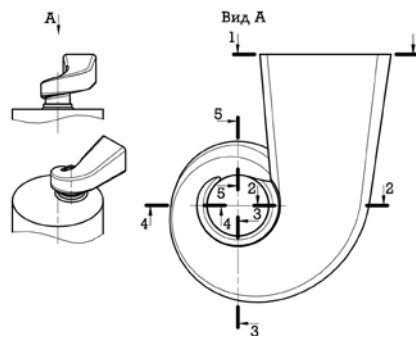
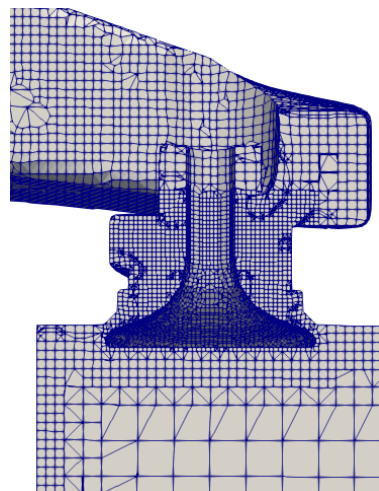


Рис. 1. Твердотельная модель впускного канала

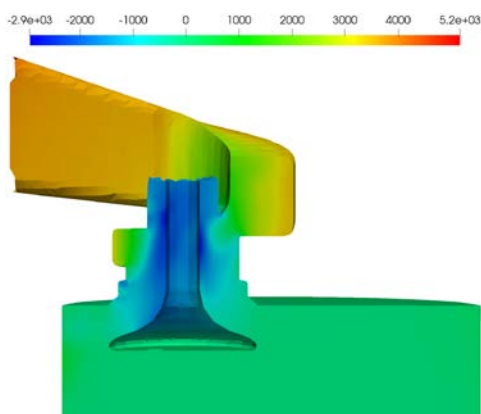
**Генерация сетки с помощью утилиты snappyHexMesh.** Генерация сетки осуществлялась с помощью утилиты snappyHexMesh, в которую передавались геометрические параметры канала и клапана в формате stl. При этом позиционирование клапана осуществлялось автоматически с помощью скрипта, описание которого будет представлено ниже.

Одним из важнейших условий нанесения сетки при моделировании процессов течения газа в CFD является ее измельчение в зонах с большими градиентами параметров. В данном случае это области не только на границах модели (у стенок), но и в зазоре между фаской клапана и его седлом (клапанной щели). Размеры щели зависят от хода клапана, следовательно, размер области для измельчения сетки также зависит от хода. Данная проблема была решена применением «измельчающего цилиндра», имеющего фиксированное положение верхнего основания, а положение нижнего основания определялось ходом клапана. Полученная область искусственно выполненного сгущения сетки вблизи клапанной щели для повышения пространственной дискретизации представлена на рис. 2.

**Моделирование течения.** Моделирование течения осуществлялось в стационарной несжимаемой постановке с помощью решателя simpleFOAM. Первоначально задавали массовый расход на впускном граничном условии, через который и рассчитывали задаваемую скорость на впускном граничном условии. Градиент давления принимали нулевым по всей плоскости впускного сечения. Само же давление рассчитывали через плотность и скорость потока на впуске решателем автоматически. На выпуске давление принимали равным атмосферному.



**Рис. 2.** Разбивка модели на контрольные объемы на подъеме клапана на 2 мм

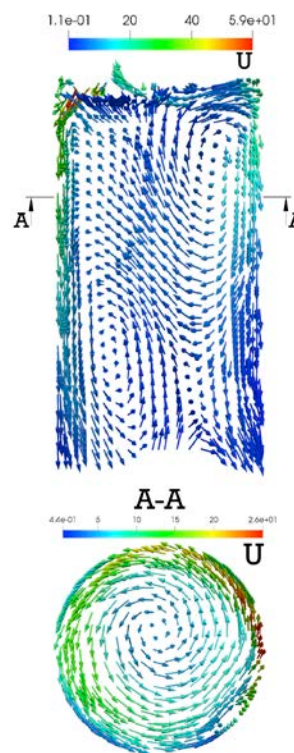


**Рис. 3.** Распределение давлений при ходе клапана 8 мм

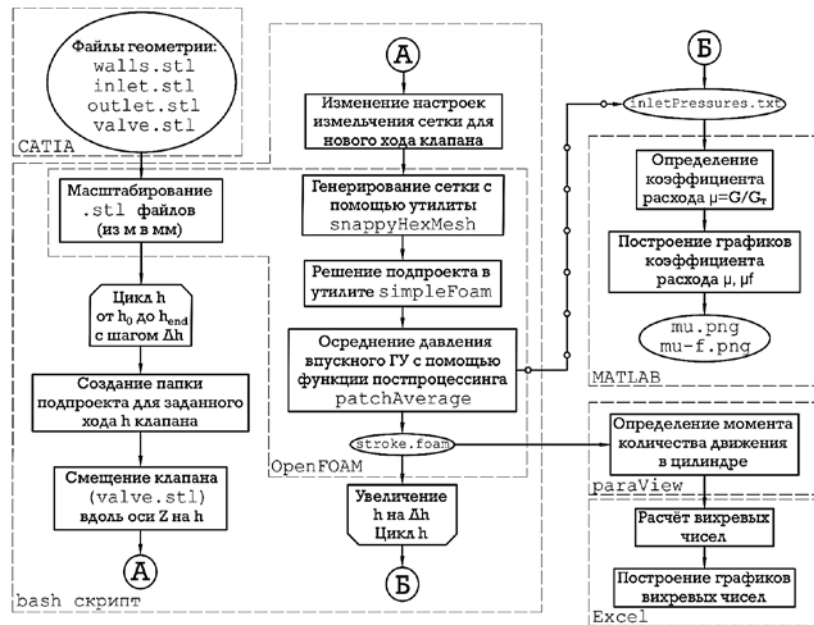
В результате расчета в решателе simpleFoam были получены поля скоростей и давлений. Пример результатов расчета при ходе клапана в 5 мм представлен на рис. 3, 4.

На рис. 4 представлен характерный вид получаемого вихря, на котором заметен обратный поток вдоль оси цилиндра, что является особенностью данного рода вихрей [12].

**Алгоритм определения характеристик каналов.** Для автоматизации проведения большого объема расчетов и возможности сравнения показателей разных спиральных каналов был создан набор скриптов на языках MATLAB, bash и Excel, выложенные в общий доступ [13] под лицензией GNU General Public License v3.0. Блок-схема разработанного алгоритма приведена на рис. 5.



**Рис. 4.** Поля скоростей в цилиндре при ходе клапана 5 мм

Рис. 5. Блок-схема скрипта `solveCurrentStroke.sh`

**Обработка полученных данных.** Для автоматизирования постобработки данных (в частности, для определения коэффициента расхода) использовали среду MATLAB.

Коэффициент расхода определяли по формуле

$$\mu = \frac{G}{G_T},$$

где  $G$  — действительный расход,

$$G = u\rho F_{\text{вп}}$$

( $u$  — скорость на впускном сечении (граничное условия для расчета);  $F_{\text{вп}}$  — площадь впускного сечения;  $\rho$  — плотность воздуха при принятой температуре);  $G_T$  — теоретический расход [12],

$$G_T = f_{\text{кл}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

( $\Delta p$  — разница давлений, Па;  $f_{\text{кл}}$  — эффективное проходное сечение клапана, рис. 6).

Полученное в `simpleFoam` избыточное давление отнесено к плотности, поэтому  $\Delta p' = \Delta p/\rho$ , таким образом теоретический расход принимает вид

$$G_T = f_{\text{кл}} \sqrt{2\Delta p'},$$

разность давлений с учетом давления торможения на впуске

$$\Delta p' = p'_{\text{вп}} + \frac{u^2}{2} - p'_{\text{вып}},$$

где  $p'_{\text{вп}}$  — среднее давление во впускном сечении (которое и определялось bash-скриптом, см. рис. 5).

Геометрическая площадь проходного сечения в седле определялась по методике [12] и задавалась равной площади поверхности усеченного конуса (см. рис. 6).

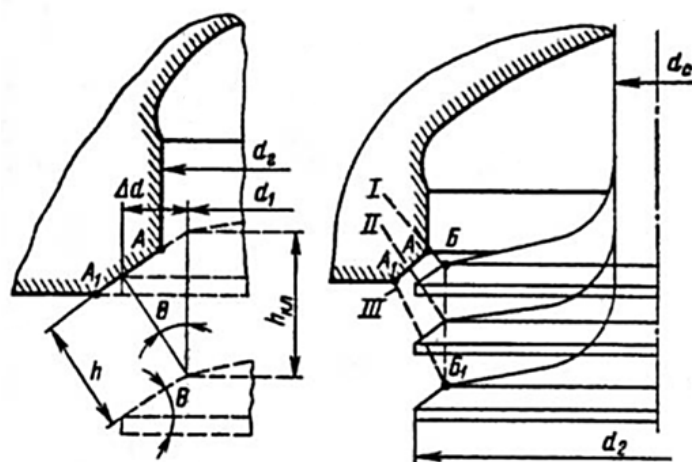


Рис. 6. Расчетная схема для определения проходных сечений в седле при различных перемещениях клапана [12]

Таким образом, при переходе минимального сечения в горло седла при больших подъемах клапана график площади эффективного проходного сечения переходит в прямую, параллельную оси абсцисс. Характерный вид полученного графика представлен на рис. 7.

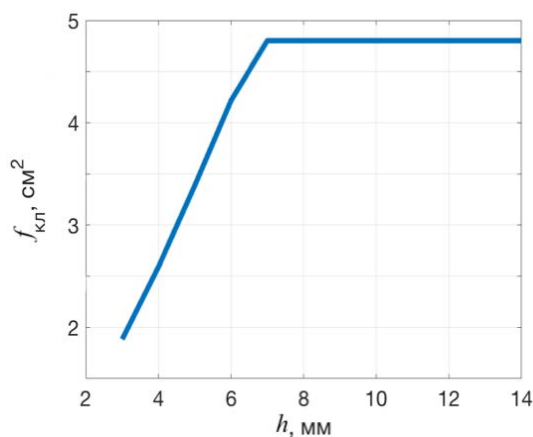


Рис. 7. Зависимость площади эффективного проходного сечения от хода клапана

Резльтирующий график коэффициента расхода для рассмотренного канала приведен на рисунке 8. Как можно видеть, полученные значения достаточно хорошо соответствуют известным из опыта диапазонам данной величины [12].

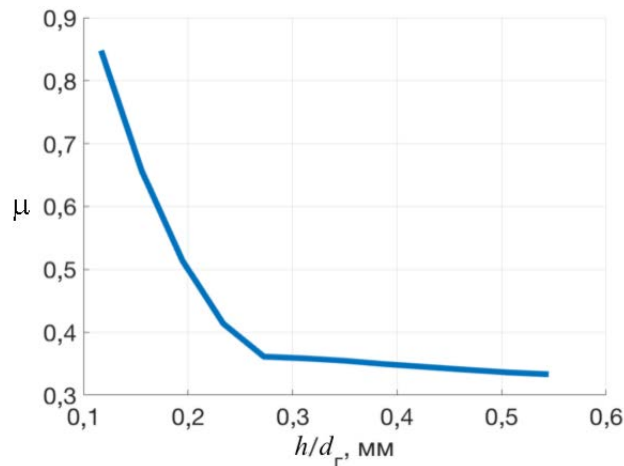


Рис. 8. Сравнение коэффициентов расхода в зависимости от относительного хода клапана

Для характеристики интенсивности вихря в цилиндре в теории поршневых двигателей используется понятие вихревого числа. Интегральную интенсивность горизонтального вихря применяют в виде вихревого отношения, введенного Рикардо [14]:

$$D_n = \frac{n_v}{n},$$

где  $n_v$  — частота вращения горизонтального воздушного вихря в цилиндре двигателя;  $n$  — частота вращения коленчатого вала двигателя.

В соответствии с методикой, изложенной в [14], это значение может быть выражено как

$$D_n = \frac{4S}{D} D_M,$$

где  $D$ ,  $S$  — диаметр цилиндра и ход поршня двигателя;  $D_M$  — интегральная интенсивность горизонтального вихря — безразмерный комплекс [14], определяемый как

$$D_M = \frac{MD\rho}{2G^2}.$$

Здесь  $D$  — диаметр цилиндра двигателя;  $\rho$ ,  $G$  — плотность и массовый расход продувочного воздуха соответственно;  $M$  — крутящий момент, определяемый через момент количества движения:

$$M = \frac{dL}{dt},$$

$L$  — момент количества движения, определяемый как

$$L = \int_0^V \mathbf{r} \times \mathbf{w} \rho dV,$$

где  $\mathbf{w}$ ,  $\mathbf{r}$  — окружная скорость и радиус вращения элементарного объема соответственно.

Момент времени  $dt$  определяется через массовый расход  $G$ :

$$dt = \frac{m}{G}.$$

В итоге крутящий момент при условии несжимаемости газа ( $\rho = \text{const}$ ) и того факта, что  $m/\rho = V$ , составит

$$M = \frac{G}{V} \int_0^V \mathbf{r} \times \mathbf{w} \rho dV,$$

где  $V$  — объем продуваемого цилиндра (или его части).

Пример полученного вихря представлен на рис. 4.

Помимо всего объема продуваемого цилиндра вихревые числа определялись и по его четвертям для оценки их изменения внутри цилиндра при увеличении расстояния от клапана. Схема разбиения представлена на рис. 9, характерный вид полученных результатов показан на рис. 10.

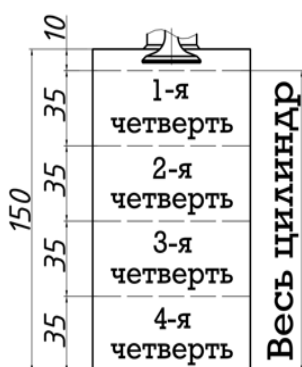


Рис. 9. Интегрируемые объемы цилиндра

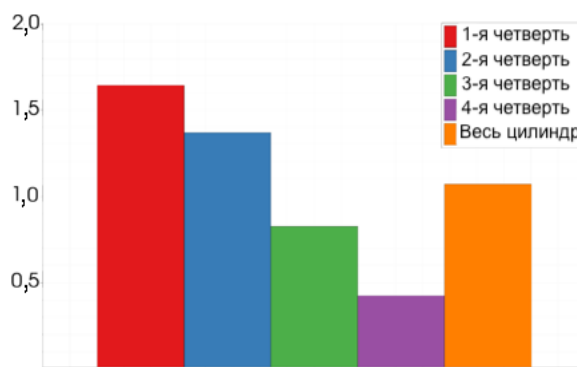


Рис. 10. Диаграмма зависимости вихревого числа  $D_n$  от интегрируемого объема цилиндра (горизонтальная линия — вихревое число при интегрировании по всему объему) для подъема клапана 8 мм

В итоге были получены вихревые числа в зависимости от хода клапана и интегрируемого объема, которые представлены на рис. 11.

На рис. 10, 11 видно, что с увеличением расстояния от канала вихревое число уменьшается, что говорит о постепенном затухании вихря. Данное явление

обусловлено как вязкостью (внутренним трением) газа, так и его трением о стенки цилиндра.

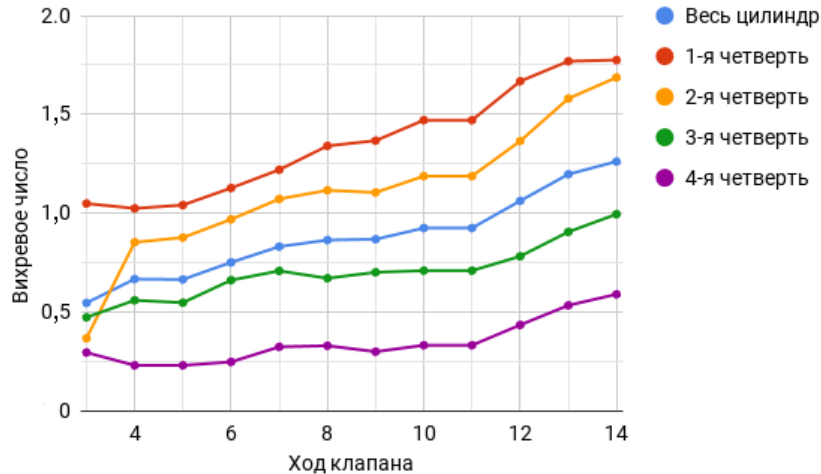


Рис. 11. Вихревые числа в зависимости от хода клапана

**Выводы.** В ходе данной работы было проведено расчетное исследование вихревого впускного канала двигателя с точки зрения его расходной характеристики и способности к генерации вихря в цилиндре. Разработана методика на базе ПК OpenFOAM, позволяющая проводить полуавтоматизированное тестирование каналов (в частности, при различных положениях клапанов), которая может применяться при доводке двигателей. Характерный вид получаемого вихря представлен на рис. 4, на котором заметен обратный поток вдоль оси цилиндра, что является особенностью данного рода вихрей (рис. 13 [12]).

Поведение коэффициента расхода (см. рис. 8) и вихревого числа (см. рис. 11) качественно согласуются с известными экспериментальными данными (например, рис. 26 в [14]), что подтверждает корректность расчетов.

Вихревое число определялось как по всему продуваемому цилиндру, так и по его частям (см. рис. 9, 10). В итоге было определено, что с увеличением расстояния от канала вихревое число уменьшается, что говорит о постепенном затухании вихря. Данное явление обусловлено как вязкостью (внутренним трением) газа, так и его трением о стенки цилиндра. Значительное затухание вихря по мере его развития в цилиндре говорит о необходимости применения строго описанной однозначной методики при определении вихревого числа, если необходимо сравнение этой величины с результатами, полученными другими исследователями.

## Литература

- [1] Онищенко Д.О., Буданов Р.Е., Руман С.Ю. Моделирование турбулентного течения воздуха через клапанные каналы поршневого двигателя. *Труды НАМИ*, 2017, №4, с. 25–31.



- [2] Зенкин В.А., Кулешов А.С. Профилирование впускных каналов дизеля для условий высокого наддува и больших перепадов давления между коллектором и цилиндром. *Наука и образование: научное издание*, 2013, № 10. URL: <http://engineering-science.ru/doc/617277.html>
- [3] Гришин Ю.А., Дорожинский Р.К., Зенкин В.А. Расчетное улучшение характеристик впускной клапанной системы поршневого двигателя. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2012, № 6, с. 52–58.
- [4] Хандримайлов А.А., Солодов В.Г. Численное моделирование сжимаемых вязких турбулентных течений во впускных каналах и цилиндрах поршневых двигателей. *Аэрогидродинамика: проблемы и перспективы*. Вып. 2. Харьков, ХАИ, 2006, с. 212–233.
- [5] Гришин Ю.А., Дорожинский Р.К., Зенкин В.А. Численное моделирование турбулентного течения через клапаны поршневых двигателей. *Вестник машиностроения*, 2016, № 1, с. 24–28.
- [6] Montorfano A., Piscaglia F., Onorati A. An extension of the dynamic mesh handling with topological changes for LES of ICE in OpenFOAM®. *SAE Tech. Pap.*, 2015, no. 2015-01-0384. DOI: 10.4271/2015-01-0384 URL: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2015-01-0384/>
- [7] Lucchini T., Della Torre A., D'Errico G., et al. Automatic mesh generation for CFD simulations of direct-injection engines. *SAE Tech. Pap.*, 2015, no. 2015-01-0376. DOI: 10.4271/2015-01-0376 URL: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2015-01-0376/>
- [8] Adomeit P., Lang O., Schmidt A., et al. CAE-based port development for modern SI engines. *MTZ worldw.*, 2006, vol. 67, no. 1, pp. 21–23. DOI: 10.1007/BF03227818 URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03227818>
- [9] Qi Y., Ge X., Dong L. Numerical simulation and experimental verification of gasoline intake port design. *SAE Tech. Pap.*, 2015, no. 2015-01-0379. DOI: 10.4271/2015-01-0379 URL: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2015-01-0379/>
- [10] OpenFOAM. URL: <https://openfoam.com/> (дата обращения: 27.09.2018)
- [11] Драганов Б.Х., Круглов М.Г., Обухова В.С. Конструирование впускных и выпускных каналов двигателей внутреннего сгорания. К., Вища школа, 1987.
- [12] Вихерт М.М., Грудский Ю.Г. Конструирование впускных систем быстроходных дизелей. М., Машиностроение, 1982.
- [13] StasF1/intakePipe. *GitHub*: веб-сайт. URL: <https://github.com/StasF1/intakePipe> (дата обращения: 21.09.2018)
- [14] Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.

**Сташевский Станислав Дмитриевич** — студент кафедры «Поршневые двигатели», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Зенкин Владимир Александрович, кандидат технических наук, заместитель заведующего кафедрой по учебной и методической работе «Поршневые двигатели», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

---

**INTAKE CHARACTERISTICS OF PISTON ENGINES CHANNELS  
DETERMINATION USING OPENFOAM PROGRAMMING COMPLEX**

S.D. Stashevskiy

stashevskiysd@student.bmstu.ru

SPIN-code: 1501–8584

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation****Abstract**

*A numerical simulation of the flow through a spiral inlet channel with a disc valve was carried out using an open integrable platform for the numerical simulation of continuum mechanics problems — OpenFOAM. Simulation was carried out in a stationary incompressible setting at different valve positions. A semi-automated method for processing the data has been developed and shared, which is a set of scripts in bash and MATLAB. The graphs of the vortex number in the cylinder and the coefficient of flow depending on the valve lift are plotted. To estimate the vortex dynamics in the cylinder, the vortex number was determined both over its entire volume and over its parts. The behavior of the obtained graphs is in qualitative agreement with the known experimental data.*

**Keywords**

*CFD, OpenFOAM, piston engine, intake stroke, spiral inlet channel, vortex formation, flow coefficient, vortex number*

Received 22.11.2018

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

**References**

- [1] Onishchenko D.O., Budanov R.E., Ruman S.Yu. The simulation of turbulent air flow through the piston engine valve port. *Trudy NAMI*, 2017, no.4, pp. 25–31. (in Russ.)
- [2] Zenkin V.A., Kuleshov A.S. Shaping of inlet ports of a diesel for conditions of high pressure charging and high pressure differentials between a collector and a cylinder. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2013, no. 10. URL: <http://engineering-science.ru/doc/617277.html> (in Russ.)
- [3] Grishin Yu.A., Dorozhinskiy R.K., Zenkin V.A. Calculation improvement of piston engine intake valve system characteristics. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2012, no. 6, pp. 52–58. (in Russ.)
- [4] Khandrimaylov A.A., Solodov V.G. Chislennoe modelirovanie szhimaemykh vyzakikh turbulentnykh techeniy vo vpusknykh kanalakh i tsilindrakh porshnevykh dvigateley [Numerical modelling of viscous turbulent flow on base of intake ports and piston engine cylinders]. *Aerogidrodinamika: problemy i perspektivy. Vyp. 2* [Aerohydrodynamics: problems and prospects]. Khar'kov, KhAI Publ., 2006, pp. 212–233. (in Russ.)
- [5] Grishin Yu.A., Dorozhinskiy R.K., Zenkin V.A. Numerical modeling of turbulent flow through valves of piston engines. *Vestnik mashinostroeniya*, 2016, no. 1, pp. 24–28. (in Russ.)
- [6] Montorfano A., Piscaglia F., Onorati A. An extension of the dynamic mesh handling with topological changes for LES of ICE in OpenFOAM®. *SAE Tech. Pap.*, 2015, no. 2015–01–0384. DOI: 10.4271/2015-01-0384 URL: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2015-01-0384/>

- [7] Lucchini T., Della Torre A., D'Errico G., et al. Automatic mesh generation for CFD simulations of direct-injection engines. *SAE Tech. Pap.*, 2015, no. 2015-01-0376. DOI: 10.4271/2015-01-0376 URL: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2015-01-0376/>
- [8] Adomeit P., Lang O., Schmidt A., et al. CAE-based port development for modern SI engines. *MTZ worldw.*, 2006, vol. 67, no. 1, pp. 21–23. DOI: 10.1007/BF03227818 URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03227818>
- [9] Qi Y., Ge X., Dong L. Numerical simulation and experimental verification of gasoline intake port design. *SAE Tech. Pap.*, 2015, no. 2015-01-0379. DOI: 10.4271/2015-01-0379 URL: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2015-01-0379/>
- [10] OpenFOAM. URL: <https://openfoam.com/> (accessed: 27.09.2018)
- [11] Draganov B.Kh., Kruglov M.G., Obukhova V.S. Konstruirovaniye vpusknykh i vypusknykh kanalov dvigateley vnutrennego sgoraniya [Designing intake and outlet ports of combustion engine]. Kiev, Vishcha shkola Publ., 1987. (in Russ.)
- [12] Vikhert M.M., Grudskiy Yu.G. Konstruirovaniye vpusknykh sistem bystrokhodnykh dizeley [Designing intake systems of high-speed diesel]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. (in Russ.)
- [13] StasF1/intakePipe. *GitHub*: website. URL: <https://github.com/StasF1/intakePipe> (accessed: 21.09.2018)
- [14] Kavtaradze R.Z. Teoriya porshnevnykh dvigateley. Spetsial'nye glavy [Theory of piston engines. Special chapters]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008. (in Russ.)

**Stashevskiy S.D.** — Master's Degree Student, Department of Piston Engines, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — V.A. Zenkin, Ph.D., Deputy Director for Educational-Methodical Work, Department of Piston Engines, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.