

Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение

УДК 621.43

DOI: 10.18698/0536-1044-2018-6-44-49

Расчетное совершенствование проточной части охладителя наддувочного воздуха двигателя гоночного автомобиля

И.В. Борисенко, Ю.А. Гришин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Improving the Flow-Through Section of the Intercooler of a Racing Car Using Numerical Simulation

I.V. Borisenko, Y.A. GrishinBMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

e-mail: iw-borisenko@yandex.ru, grishin@power.bmstu.ru



Для участия в международных соревнованиях спортивных автомобилей класса «Формула студент» в МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан гоночный болид с двигателем внутреннего сгорания Yamaha WR450F. В целях форсирования двигателя по мощности он снабжен турбокомпрессором с охладителем наддувочного воздуха. На базе программного комплекса ANSYS выполнено численное моделирование пространственного течения для нескольких вариантов проточной части охладителя. По результатам моделирования выбрана проточная часть, обеспечивающая снижение массы конструкции охладителя и значительное уменьшение сопротивления охлаждаемому потоку. Это позволяет увеличить мощность двигателя и, как следствие, улучшить все технические характеристики гоночного автомобиля. При этом для математического описания течения применена система уравнений вязкого газа в форме Навье–Стокса. Учет процессов турбулентного перемешивания выполнен с помощью $k-\varepsilon$ и $k-\zeta-f$ -моделей.

Ключевые слова: гоночный автомобиль, поршневой двигатель, охладитель наддувочного воздуха, численное моделирование



To participate in international motorsport competitions Formula SAE, BMSTU student design team developed a racing car with a Yamaha WR450F internal combustion engine. The engine was equipped with a turbocharger and an intercooler to increase the engine power. Numerical simulation of the spatial flow was performed using the ANSYS software for several variants of the flow-through section of the intercooler. Based on the simulation results, the flow-through section that provided a reduction in weight of the intercooler and a significant decrease in the resistance of the cooled air flow was chosen. Using this design, it is possible to increase the engine power and, as a result, improve all the technical characteristics of the racing car. For the mathematical description of the flow, a system of viscous gas equations in the Navier-Stokes form was applied. The processes of

turbulent mixing were taken into account through using both the $k-\varepsilon$ and the $k-\zeta-f$ models.

Keywords: racing car, piston engine, charge air cooler, numerical simulation

Специальные двигатели внутреннего сгорания (далее — двигатели), применяемые в автомобилях для скоростных спортивных соревнований, требуют тщательной доводки с целью максимального повышения мощности при одновременном улучшении массогабаритных параметров.

Поршневой одноцилиндровый двигатель Yamaha WR450F, установленный на гоночном болиде «Формула Студент» конструкции МГТУ им. Н.Э. Баумана, дополнительно снабжен турбокомпрессором и охладителем надувочного воздуха (ОНВ) типа «воздух–воздух», что позволяет значительно увеличить плотность заряда, поступающего в цилиндр, и, как следствие, обеспечить форсирование двигателя по мощности.

На рис. 1 приведена компоновка элементов двигателя Yamaha WR450F, где в верхней части виден узел ОНВ с каналами подвода и отвода сжатого воздуха. На рис. 2 показаны полученные с помощью численного газодинамического 3D-расчета линии высокоскоростного воздушного потока, омывающие болид и входящие во фронтальную плоскость ОНВ.

Основным элементом ОНВ является теплообменник с регулярной решеткой из плоских щелевых каналов для поступления охлаждаемого сжатого воздуха, между последними проходят высокоскоростные потоки холодного набегающего потока.

Цель работы — выбор конфигурации входного диффузорного и выходного конфузорного каналов ОНВ, через которые осуществляются подвод нагретого сжатого компрессором воздуха и отвод охлажденного воздуха.

Выходной канал должен обеспечивать равномерные условия по давлению на выходе из решетки ОНВ и работать в соответствии с принципом динамического наддува цилиндра. Поэтому его конфигурация включает в себя ресиверный объем, равный удвоенному рабочему объему цилиндра двигателя, и отрезок трубы постоянного проходного сечения, где реализуется волновая динамическая настройка.

Основной проблемой является выбор конфигурации входного канала, от внутреннего профиля которого зависит основная часть по-

терь течения через ОНВ. Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, при заданном пространственном положении решетки ОНВ на входе в щелевые каналы всегда есть области отрывного течения. Во-вторых, перед решеткой вследствие диффузорности имеют место вихревые циркуляционные токи, на поддержание которых затрачивается вполне определенная энергия.

При совершенствовании конфигурации ОНВ использованы методы математического моделирования Computational Fluid Dynamics (CFD). Применение численных расчетов пространственного течения газа при моделировании сложных процессов в элементах газозвушного тракта позволяет решать широкий круг практических задач по улучшению важнейших характеристик поршневых двигателей [1–9].

На рис. 3 приведена объемная расчетная область — твердотельная модель, соответствующая проточной части варианта ОНВ № 5 с расчетной сеткой, которая по результатам последующего численного моделирования показала наименьший уровень потерь при снижении массы ОНВ по сравнению с исходным вариантом. Модель создана с помощью программного комплекса (ПК) SolidWorks, для построения и правки расчетной сетки использован ПК ICEM.

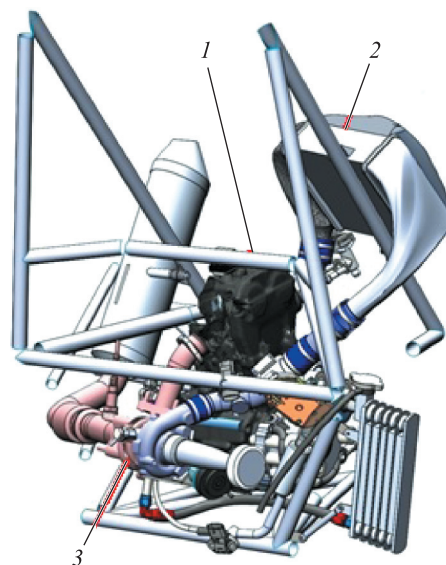


Рис. 1. Компоновка элементов двигателя Yamaha WR450F:

1 — двигатель; 2 — ОНВ; 3 — турбокомпрессор

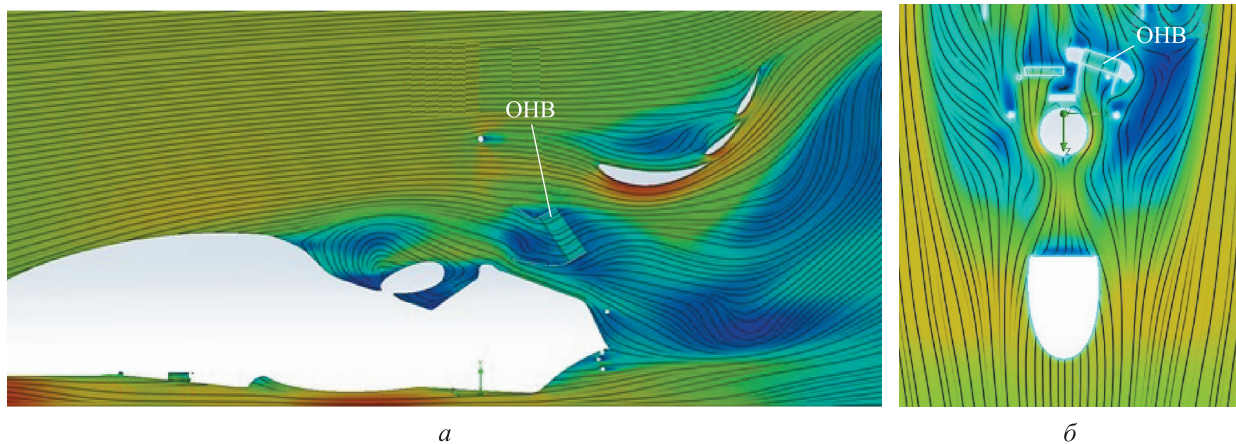


Рис. 2. Вид сбоку (а) и сверху (б) на поток, обтекающий автомобиль в сечении, проходящем через ОНВ

В общем случае течение в пространственной постановке описывается системой дифференциальных уравнений Навье–Стокса, выражающей законы сохранения массы, импульса, энергии и дополненной уравнением состояния [10–15]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho W_i) &= 0; \\ \rho \frac{DW_i}{D\tau} &= G_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial W_i}{\partial x_j} + \frac{\partial W_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial W_k}{\partial x_k} \right) \right], \\ & \quad i, j, k = 1, 2, 3; \\ \rho \frac{DH_i}{D\tau} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\tau_{ij} W_j) + \\ &+ G_j W_j + w_r Q_r + \nabla q_R; \end{aligned} \quad (1)$$

$$p = R\rho T,$$

где ρ — плотность; τ — время; x — координата; W — скорость течения; G — объемная сила, приложенная к единице объема; p — давление; μ — коэффициент динамической вязкости; δ —

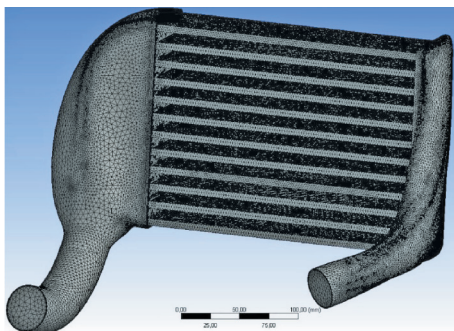


Рис. 3. Твёрдотельная модель расчетной области ОНВ варианта № 5 с расчетной сеткой

функция Кронекера; H — полная энтальпия, $H = h + W^2/2$ (h — статическая энтальпия); λ — коэффициент теплопроводности; T — температура; w_r — скорость горения, выраженная через массовую концентрацию исходных веществ и продуктов сгорания; Q_r — количество теплоты, выделяемое на единицу массы; ∇ — оператор Гамильтона (набла); q_R — радиационный тепловой поток от источника излучения; R — газовая постоянная.

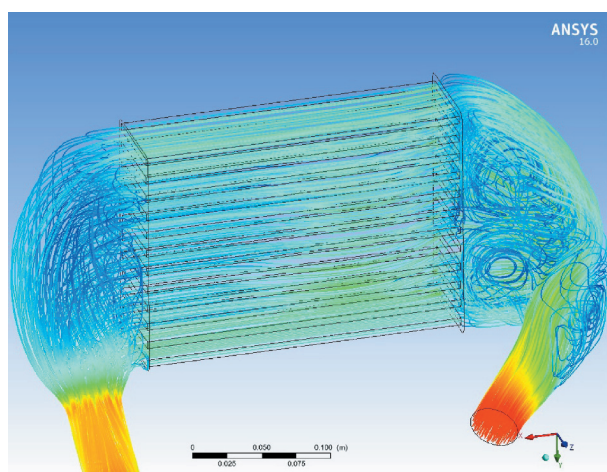
При оценке газодинамических потерь в ОНВ нет необходимости учитывать тепловые процессы, поэтому в первом приближении при численном моделировании соответствующие члены в уравнении энергии (1) опущены. Учет процессов турбулентного перемешивания в потоке на данном этапе выполнялся с помощью k - ϵ -модели турбулентности [10–15]. Преимуществами такой модели являются минимальные требования к количеству исходных данных и относительная простота, что обеспечивает быструю сходимость результатов при проведении итераций и, как следствие, высокую скорость счета.

Вычисления проводились в ПК ANSYS [16] с применением модулей Solid, Sketch и CFX/CFD. Твёрдотельное представление расчетной области импортировалось в ANSYS из ПК SolidWorks с помощью соответствующего модуля. Размер ячеек расчетной сетки выбирался в пределах 1 мм^3 с разбиением пристеночного пограничного слоя на более мелкие конечные элементы в одиннадцать шагов. Для корректировки проблемных элементов расчетной сетки, полученных в SolidWorks, выполнялась соответствующая правка с использованием ICEM CFD.

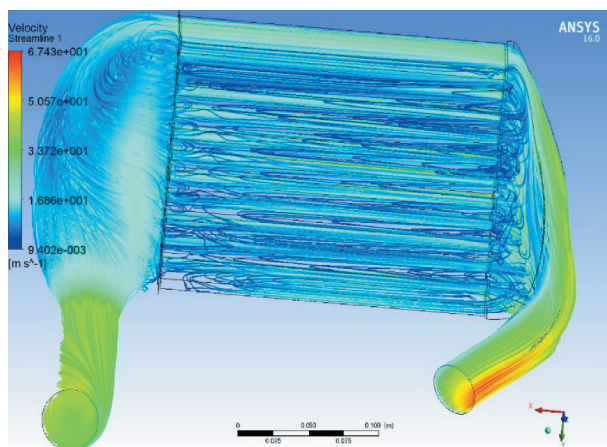
Расчеты в CFX проводились при следующих начальных условиях: абсолютное давление

воздуха на входе $2 \cdot 10^5$ Па; температура — 180 °С расход на выходном сечении — 73 г/с; термодинамическая модель газа — идеальный газ; точность вычислений — 1; стартовое количество шагов — 1 000. При расчете за 107 шагов обеспечивалась сходимость 10^3 , после чего вычисления останавливались. Для просмотра результатов исследования использована функция разности давления на входе и выходе, а также построение потоков Streamline из 500 линий.

На рис. 4, а приведены результаты 3D-расчета для исходной конфигурации ОНВ с представлением соответствующих линий тока. Здесь видно, что в диффузорной входной части ОНВ вследствие большого объема перед решеткой имеют место значительные вихревые токи, на поддержание которых от основного потока отбирается значительная энергия.



а



б

Рис. 4. Пространственная картина течения в исходной (а) и окончательной (б) конфигурациях ОНВ

Сравнение параметров исследованных конфигураций ОНВ

Параметр	Номер модели				
	1	2	3	4	5
Δp , Па	1127	978	894	916	738
m , г	4027,7	3184,2	4269,3	3647,9	3222,2

В процессе расчетного совершенствования входной части исследованы пять конфигураций с оценкой потерь по перепаду давлений при течении во всем объеме ОНВ. Потери удалось значительно снизить благодаря последовательному уменьшению объема входной части путем наклона внешней стенки. Это обеспечило практически равномерное распределение расхода по щелевым каналам ОНВ при практически полном отсутствии вихревых токов во входной части. На рис. 4, б показана пространственная картина течения в окончательной (пятой из исследованных) конфигурации ОНВ.

Следует отметить, что уменьшение входной части позволило также заметно снизить общую массу ОНВ, что подтверждено расчетами в ПК ANSYS всей конструкции. Соответствующие результаты приведены в таблице, где Δp — потери давления; m — масса ОНВ.

Завершающая часть расчетных исследований выполнена с использованием более совершенной $k-\epsilon-f$ -модели турбулентности [10] и с учетом соответствующих параметров в уравнении энергии (1). Это позволило оценить реальное охлаждение наддувочного воздуха в ОНВ. По итогам работы спроектирована новая конструкция ОНВ для гоночного автомобиля «Формула Студент» МГТУ им. Н.Э. Баумана с существенно улучшенными характеристиками.

Выводы

1. Применение усовершенствованной конфигурации ОНВ, обеспечивающей динамический наддув и охлаждение поступающего в цилиндр наддувочного воздуха с 200 до 45 °С, позволяет уменьшить по сравнению с исходным вариантом:

- потери давления более чем на 30 %;
- массу более чем на 20 %.

2. Это дает возможность улучшить показатели силовой установки автомобиля по массе, эффективности и таким важнейшим параметрам, как мощность, крутящий момент и расход топлива.

Литература

- [1] Гришин Ю.А., Бакулин В.Н. Новые расчетные схемы на базе метода крупных частиц для моделирования газодинамических задач. *Доклады академии наук*, 2015, т. 465, № 5, с. 545–548.
- [2] Гришин Ю.А., Бакулин В.Н. Численное исследование течения в центробежном компрессоре. *Инженерно-физический журнал*, 2015, т. 88, № 5, с. 1232–1236.
- [3] Grishin Yu.A., Zenkin V.A., Khmelev R.N. Boundary conditions for numerical calculation of gas exchange in piston engines. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2017, vol. 90, is. 4, pp. 965–970, doi 10.1007/s10891-017-1644-4.
- [4] Гришин Ю.А., Дорожинский Р.К., Зенкин В.А. Численное моделирование турбулентного течения через клапаны поршневых двигателей. *Вестник машиностроения*, 2016, № 1, с. 24–28.
- [5] Гришин Ю.А., Бакулин В.Н., Зенкин В.А. Численное моделирование продувки впускных окон двухтактных двигателей. *Вестник МАИ*, 2013, т. 20, № 1, с. 79–87.
- [6] Гришин Ю.А. Численное решение практических задач газовой динамики в поршневых двигателях. *Известия ТулГУ, Сер. Автомобильный транспорт*, 2005, вып. 9, с. 173–179.
- [7] Гришин Ю.А. Метод характеристик с плавающей сеткой и моделирование волновых процессов в поршневых двигателях. *Математическое моделирование*, 2009, т. 21, № 5, с. 94–104.
- [8] Grishin Y. Unsteady flow pulses interaction with a turbine. *Meeting the Future of Combustion Engines. 28th CIMAC World Congress*, Helsinki, 6–10 June 2016, Helsinki, no. 308, pp. 1–11.
- [9] Kuleshov A.S. Use of Multi-Zone DI Diesel Spray Combustion Model for Simulation and optimization of Performance and Emissions of Engines with Multiple Injection. *SAE Technical Papers*, 2006, no. 2006-01-1385, pp. 1–17.
- [10] Кавтарадзе Р.З. *Локальный теплообмен в поршневых двигателях*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 515 с.
- [11] Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. *Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений*. Санкт-Петербург, Изд-во Политех. ун-та, 2012. 88 с.
- [12] Зализняк В.Е. *Основы вычислительной физики. Ч. 1. Введение в конечно-разностные методы*. Москва, Техносфера, 2008. 224 с.
- [13] Патанкар С.В. *Численные решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах*. Москва, Изд-во МЭИ, 2003. 312 с.
- [14] Fletcher C.A.J. *Computational Techniques for Fluid Dynamics 2: Specific Techniques for Different Flow Categories*. Springer-Verlag, 1998. 496 p.
- [15] Чесноков С.А., Дунаев В.А. *Тепломассообмен и горение в автомобильных двигателях*. Тула, Изд-во ТулГУ, 2012. 400 с.
- [16] ANSYS Fluent v.14.5. Release. 7.3.4. Compressible liquid density method. Available at: <http://www.ansys.com> (accessed 15 January 2018).

References

- [1] Grishin Y.A., Bakulin V.N. New calculation schemes based on the large-particle method for modeling gas-dynamic problems. *Doklady Physics*, 2015, vol. 60, no. 12, pp. 555–558.
- [2] Grishin Y.A., Bakulin V.N. Numerical Investigation of Flow in a Centrifugal Compressor. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2015, vol. 88, no. 5, pp. 1274–1279.
- [3] Grishin Yu.A., Zenkin V.A., Khmelev R.N. Boundary conditions for numerical calculation of gas exchange in piston engines. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2017, vol. 90, is. 4, pp. 965–970, doi 10.1007/s10891-017-1644-4.
- [4] Grishin Iu.A., Dorozhinskii R.K., Zenkin V.A. Chislennoe modelirovanie turbulentnogo techeniia cherez klapani porshnevykh dvigatelei [Numerical modeling of turbulent flow through valves of piston engines]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 2016, no. 1, pp. 24–28.
- [5] Grishin Yu.A., Bakulin V.N., Zenkin V.A. Chislennoe modelirovanie produvki vpusknykh okon dvihtaknykh dvigateley [Numerical modeling of inlet ports testing of two-strokes engines]. *Vestnik MAI* [Bulletin of the MAI]. 2013, vol. 20, no. 1, pp. 79–87.

- [6] Grishin Yu.A. Chislennoe reshenie prakticheskikh zadach gazovoy dinamiki v porshnevnykh dvigatelyakh [The numerical solution of practical problems of gas dynamics in reciprocating engines]. *Izvestiya TulGU, Ser. Avtomobil'nyy transport* [Proceedings of the TSU. Ser. Automobile Transport]. 2005, is. 9, pp. 173–179.
- [7] Grishin Yu.A. Metod karakteristik s plavayushchey setkoy i modelirovanie volnovykh protsessov v porshnevnykh dvigatelyakh [Method of characteristics with fluent grid and wave processes simulation in piston engines]. *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical Models and Computer Simulations]. 2009, vol. 21, no. 5, pp. 94–104.
- [8] Grishin Y. Unsteady flow pulses interaction with a turbine. *Meeting the Future of Combustion Engines. 28th CIMAC World Congress*, Helsinki, 6–10 June 2016, no. 308, pp. 1–11.
- [9] Kuleshov A.S. Use of Multi-Zone DI Diesel Spray Combustion Model for Simulation and optimization of Performance and Emissions of Engines with Multiple Injection. *SAE Technical Papers*, 2006, no. 2006-01-1385, pp. 1–17.
- [10] Kavtaradze R.Z. *Lokal'nyi teploobmen v porshnevnykh dvigateliakh* [Local heat exchange in piston engines]. Moscow, Bauman Press, 2016. 515 p.
- [11] Garbaruk A.V., Strelets M.H., Shur M.L. *Modelirovanie turbulentnosti v raschetah slozhnykh techeniy* [Modeling of turbulence in calculation of complex flows]. Sankt-Petersburg, Politekh. un-t publ., 2012. 88 p.
- [12] Zaluzniak V.E. *Osnovy vychislitel'noi fiziki. Ch. 1. Vvedenie v konechno-raznostnye metody* [Fundamentals of computational physics. Pt 1. Introduction to finite difference methods]. Moscow, Tekhnosfera publ., 2008. 224 p.
- [13] Patankar S.V. *Chislennyye reshenie zadach teploprovodnosti i konvektivnogo teploobmena pri techenii v kanalakh* [Numerical solution of problems of thermal conductivity and convective heat transfer in the flow channels]. Moscow, MEI publ., 2003. 312 p.
- [14] Fletcher C.A.J. *Computational Techniques for Fluid Dynamics 2: Specific Techniques for Different Flow Categories*. Springer-Verlag, 1998. 496 p.
- [15] Chesnokov S.A., Dunaev V.A. *Teplomassoobmen i gorenje v avtomobil'nykh dvigateliakh* [Heat and mass transfer and combustion in automobile engines]. Tula, TulGU publ., 2012. 400 p.
- [16] ANSYS *Fluent v.14.5. Release. 7.3.4. Compressible liquid density method*. Available at: <http://www.ansys.com> (accessed 15 January 2018).

Статья поступила в редакцию 22.02.2018

Информация об авторах

БОРИСЕНКО Иван Владимирович (Москва) — инженер кафедры «Поршневые двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: iw-borisenko@yandex.ru).

ГРИШИН Юрий Аркадьевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Поршневые двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: grishin@power.bmstu.ru).

Information about the authors

BORISENKO Ivan Vladimirovich (Moscow) — Engineer, Piston Engines Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman'skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: iw-borisenko@yandex.ru).

GRISHIN Yuriy Arkadievich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Piston Engines Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: grishin@power.bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Борисенко И.В., Гришин Ю.А. Расчетное совершенствование проточной части охладителя наддувочного воздуха двигателя гоночного автомобиля. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 6, с. 44–49, doi: 10.18698/0536-1044-2018-6-44-49.

Please cite this article in English as:

Borisenko I.V., Grishin Y.A. Improving the Flow-Through Section of the Intercooler of a Racing Car Using Numerical Simulation. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 6, pp. 44–49, doi: 10.18698/0536-1044-2018-6-44-49.