

И.А. ПОПОВ,
д-р техн. наук
(КНИТУ-КАИ, Казань),

Ю.В. ЖУКОВА,
канд. физ.-мат. наук
(Институт тепло-
и массообмена

им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,
Минск, Беларусь),

В.М. ГУРЕЕВ,
д-р техн. наук
(КНИТУ-КАИ, Казань),

А.Д. ЧОРНЫЙ,
канд. физ.-мат. наук
(Институт тепло-
и массообмена

им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,
Минск, Беларусь),

И.А. ПОПОВ,
студент
(Казанский ГАУ, Казань)
popov-igor-alex@yandex.ru

Численное моделирование системы впуска авиационных поршневых двигателей

Представлены результаты, являющиеся методической основой при создании цифрового двойника системы впуска поршневого двигателя. С использованием цифрового двойника системы впуска поршневого двигателя предложены и апробированы инженерные решения по повышению эффективности системы впуска. Критериями эффективности являются аэродинамическое сопротивление каналов системы впуска и равномерность распределения зарядов воздуха по цилиндрам двигателя. На основе проведенных расчетов выработаны рекомендации по повышению эффективности эксплуатации данных систем.

Система впуска, система газообмена, распределение заряда, потери давления, численное моделирование, цифровой двойник

Процессы наполнения свежим зарядом воздуха цилиндров поршневого двигателя, определяющиеся совершенством процессов в системе впуска двигателя и фазами газораспределения, геометрией и размерами цилиндров и клапанных каналов каждого цилиндра, относятся к процессам газообмена. Численное моделирование газодинамических процессов в системах впуска актуально при проектировании новых образцов авиационных поршневых двигателей. Бесперебойная, равномерная подача свежего воздуха к каждому цилиндру обеспечивает надежное функционирование двигателей [1].

В настоящее время производится множество оппозитных, рядных и V-образных поршневых двигателей – бензиновых и дизельных [2, 3]. В основном они применяются в малой авиации, беспилотных летательных аппаратах, вертолетах, гибридных турбомоторных и электрических авиационных двигателях.

Цель работы – разработка методической основы по созданию цифрового двойника системы впуска поршневого двигателя для последующей оценки значений гидравлических потерь в каналах системы впуска, визуализации характерной структуры течения в них и оценки равномерности распределения заряда по цилиндрам. Объект исследования – рядный шестицилиндровый 24-клапанный двигатель.

Система впуска воздуха двигателя включает входные патрубки, по которым воздух поступает в турбонагнетатель; турбонагнетатель; патрубок из турбонагнетателя к охладителю наддувочного воздуха; охладитель наддувочного воздуха; впускной коллектор; впускные клапаны в цилиндры. В настоящей работе рассматривается только впускной коллектор.

В разработанной 3D-модели впускной воздушный коллектор с впускными каналами встроен в головку блока цилиндров двигателя (рис. 1, а). Из воздушного патрубка поток воздуха поступает во впускной коллектор (рис. 1, б), где происходит распределение воздушного потока по цилиндрам № 1–6 (рис. 1, в) для обеспечения максимального сгорания топлива.

На первом этапе создания цифрового двойника формировалась CAD-модель системы впуска воздуха. В ходе подготовки расчетной области для передачи в генератор сеток геометрия была упрощена, из нее были исключены элементы крепежных деталей, а мелкие зазоры, скругления, сильно скошенные и искривленные поверхности, зазоры между поверхностями и другие компоненты, существенно не влияющие на структуру потока воздуха, были трансформированы, что позволило сделать расчетную область замкнутой.

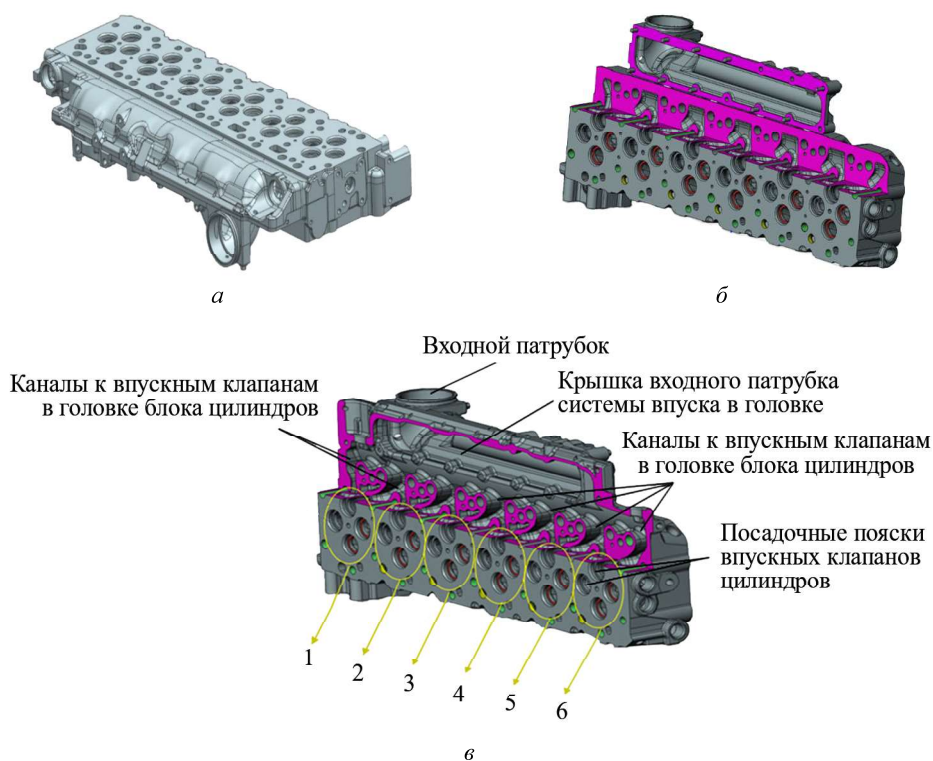


Рис. 1

CAD-модель расчетной области системы впуска (базовая конструкция) представлена на рис. 2.

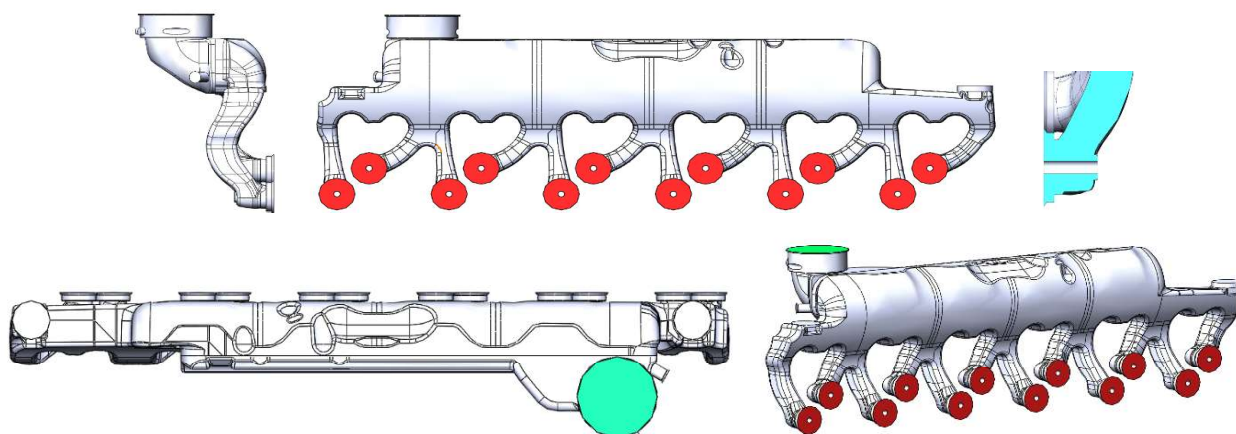


Рис. 2

На втором этапе была предложена физико-математическая модель с расчетной областью, дискретизированной конечно-объемными элементами, нестационарными уравнениями Навье – Стокса, для замыкания которых применялась $k-\omega$ -модель переноса сдвиговых напряжений Ментера, с уравнением неразрывности и уравнением энергии в формулировке для энтальпии, начальными и граничными условиями, а также теплофизическими свойствами воздуха в зависимости от температуры и давления. В настоящее время накоплен значительный опыт использования вычислительной гидрогазодинамики для моделирования процессов в системах впуска [4–6], впускном коллекторе [7–10] и выпускных каналах [11, 12]. Отметим, что исследование течения в разветвленных каналах – актуальная задача для многих практических приложений [13–15].

Расчетная область системы впуска покрывалась конечно-объемной сеткой, состоящей из тетрагексагональных и гибридных элементов. Общая мощность сетки составляла порядка 14 млн пространственных ячеек. Подготовленная сетка использовалась для дискретизации расчетной области (рис. 3).

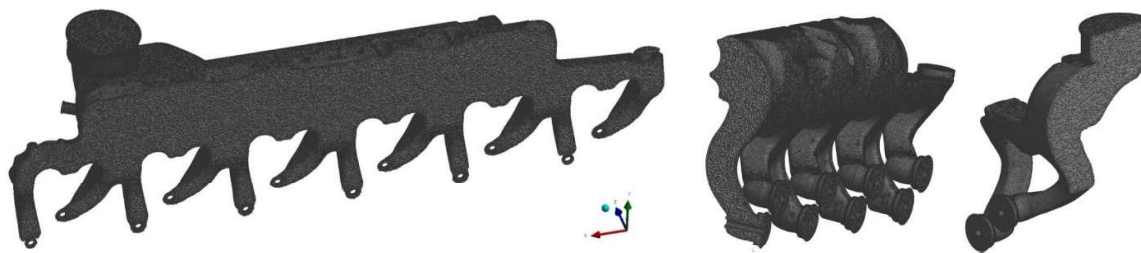


Рис. 3

В качестве начальных и граничных условий для численных исследований на входе в расчетную область использовались зависимости температуры и массового расхода на входе в расчетную область в зависимости от угла поворота коленчатого вала φ за полный цикл (720°) с шагом $0,5^\circ$ для трех режимов работы двигателя: $n = 1100 \text{ мин}^{-1}$ (режим максимальных оборотов при холостом ходе), $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ (режим максимального крутящего момента) и $n = 2300 \text{ мин}^{-1}$ (режим максимальной мощности). На выходе из расчетной области использовались зависимости статического давления и температуры на выходе из расчетной области для каждого из шести цилиндров в зависимости от угла поворота коленчатого вала за полный цикл (720°) с шагом $0,5^\circ$ для всех режимов работы двигателя. На стенках, контактирующих с теплоносителем, ставилось условие прилипания. Стенка предполагалась теплоизолированной, таким образом моделировалось «холодное течение» газа с учетом сжимаемости. Зависимость плотности от температуры и давления задавалась согласно закону идеального газа. Коэффициент динамической вязкости задавался согласно закону Сазерленда, удельная изобарная теплоемкость и удельная теплопроводность – в виде кусочно-линейных зависимостей от температуры.

Процессы в системе впуска быстропротекающие, поэтому определить полный объем исходных данных для моделирования на основе результатов испытаний двигателей на стендах достаточно сложно. Для восполнения недостающей информации по граничным условиям, необходимым для дальнейшей оценки работоспособности физико-математической модели двигателя, использованы результаты одномерного моделирования. Таким образом, на третьем этапе создания цифрового двойника для формирования обратной связи с изделием проводилась верификация расчетного алгоритма на основе сопоставления с результатами одномерного моделирования, а в качестве начальных и граничных условий были использованы полученные в одномерном моделировании в программе AVL BOOST [16] зависимости температуры и давления.

Входные параметры (давление на входе в головку блока цилиндров P_{in} и давление на входе в клапаны каждого цилиндра P_{out}), используемые в качестве граничных условий, в зависимости от угла поворота φ коленчатого вала для режима максимальной мощности (2300 мин^{-1}) представлены на рис. 4. Здесь: 1–6 – номера цилиндров; 7 – среднее значение за цикл. Среднее давление за цикл на входе в головку блока цилиндров $P_{\text{in}} = 271765 \text{ Па}$, среднее давление за цикл на входе в клапаны головки блока цилиндров (по всем клапанам) $P_{\text{out}} = 269001 \text{ Па}$, средняя за цикл температура воздуха на входе в головку блока цилиндров $T_{\text{in}} = 314,24 \text{ К}$, средний за цикл расход воздуха на входе в блок цилиндров $G_{\text{in}} = 319,66 \text{ г/с}$.

Верификация результатов расчета основывалась на сравнении результатов расчетного исследования по среднему за цикл значению абсолютного статического давления воздуха на входе в расчетную область с имеющимися локальными данными одномерного моделирования, базирующимися на среднеинтегральных экспериментальных данных, для всех трех режимов работы двигателя: для оборотов двигателя $n = 1100 \text{ мин}^{-1}$ максимальное расхождение данных – $0,59 \%$, для $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ расхождение $0,84 \%$, а для $n = 2300 \text{ мин}^{-1}$ расхождение $1,49 \%$.

На рис. 5 представлены результаты численных исследований при открытии отдельных клапанов цилиндров для режима работы двигателя $n = 2300 \text{ мин}^{-1}$: визуализация течения во впускном воздушном коллекторе (рис. 5, а, б), поля скоростей W во впускном воздушном коллекторе (рис. 5, в, г) и статического давления P во впускном воздушном коллекторе (рис. 5, г, д). Для примера приведены результаты при открытии клапанов цилиндра № 1 (рис. 5, а, в, г) и цилиндра № 6 (рис. 5, б, г, е).

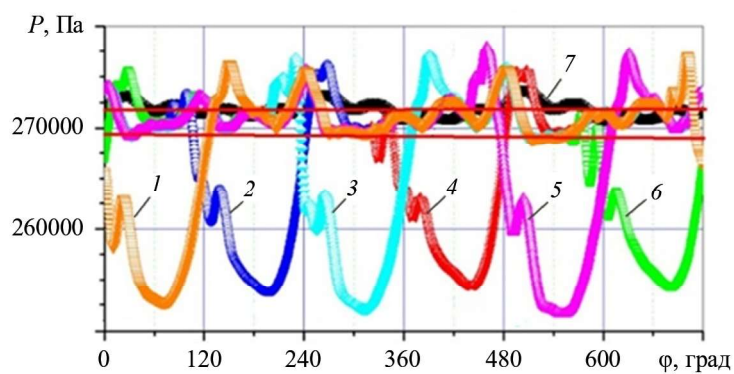


Рис. 4

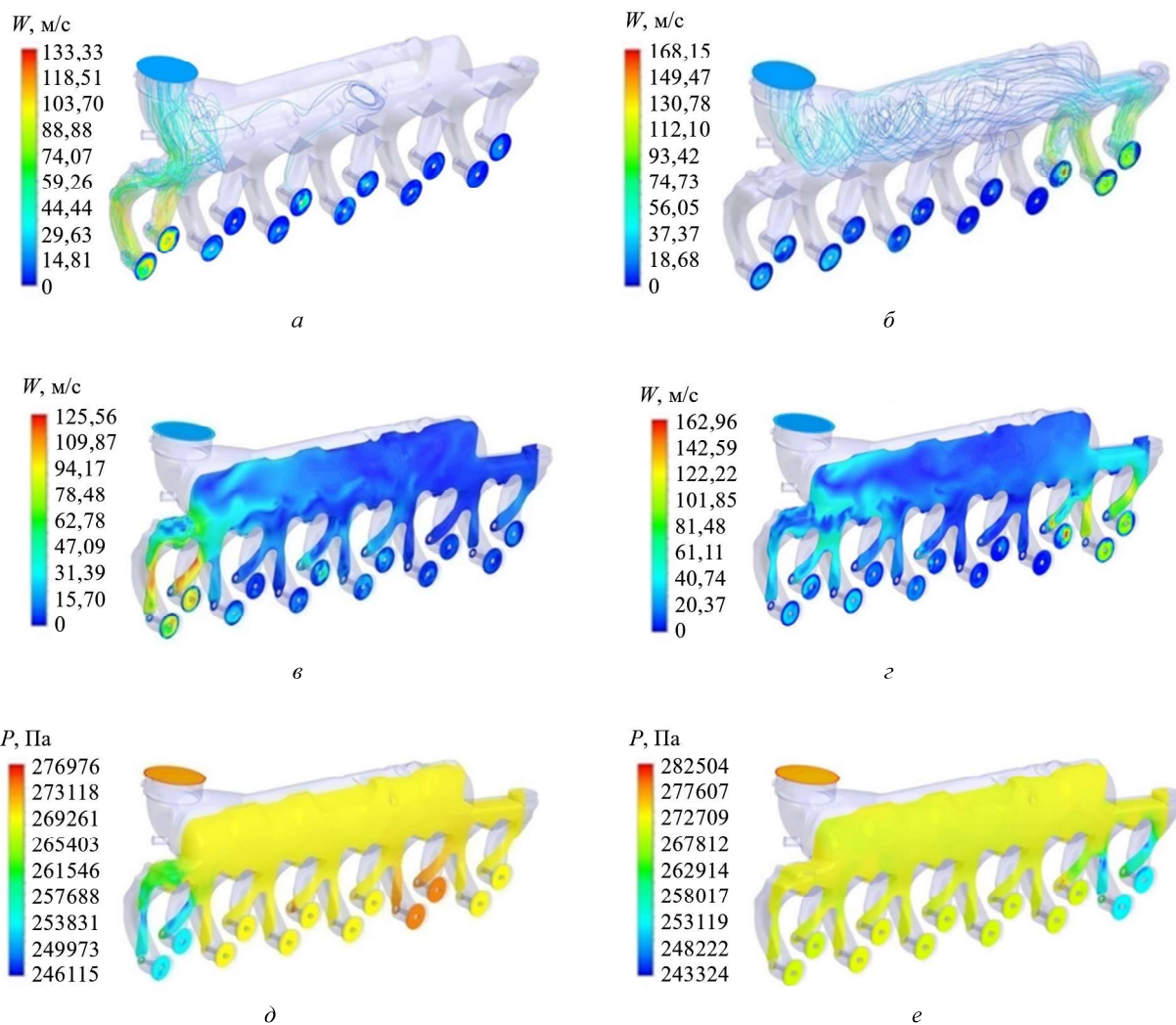


Рис. 5

Входящий в воздушный коллектор воздух поступает через входной патрубок практически тангенциально и ударяется в противоположную стенку коллектора. При тангенциальном входе в коллекторе развивается закрученное течение по всему объему. В зоне впускных каналов клапанов цилиндров № 1, 2 формируется стационарная вихревая структура, которая устойчиво снабжает воздухом именно эти цилиндры. Постоянные высокие значения скорости характерны для области клапанов цилиндров № 1, 2. К остальным цилиндрам поток устремляется только при открытии соответствующих клапанов, т. е. с некоторым запаздыванием по времени из-за преодоления расстояния от указанной зоны до клапанов цилиндров № 3–6.

Основным критерием эффективности системы впуска двигателя является равномерность распределения заряда свежего воздуха по цилиндрам двигателя. Данный критерий влияет на один из основных параметров двигателя – коэффициент наполнения каждого цилиндра двигателя, а определяется потерями давления во входном патрубке и клапанных каналах двигателя. Равномерность распределения заряда определяли по значениям среднемассового расхода через отдельные клапаны и пары клапанов для каждого цилиндра за время открытия клапанов согласно закону открытия клапанов цилиндров № 1–5–3–6–2–4 и углов открытия клапанов. Значения времени открытия клапанов для всех цилиндров одинаково, поэтому сами значения углов открытия и хода клапанов не влияют на качественные результаты анализа распределения зарядов. Значение заряда определялось как средний массовый расход воздуха через клапан или пару впускных клапанов суммированием всех значений массовых расходов воздуха перед впускными клапанами за углы (время) открытия клапанов и делением значения на количество расчетных точек. Кроме этого, оценивалась масса заряда с учетом времени открытия клапанов, как произведение среднемассового расхода на время открытия клапанов.

В табл. 1 для базового варианта впускного коллектора системы впуска воздуха двигателя показаны потери давления ΔP во впускном коллекторе и оценка распределения зарядов воздуха по цилиндрам для режима работы двигателя с оборотами $n = 2300 \text{ мин}^{-1}$. Показано распределение потока воздушной массы M_i в каждый цилиндр и среднее значение распределения воздушной массы $M_{\text{ср}}$, неравномерность распределения заряда $\Delta\delta_{M_i}$ и среднее значение неравномерности распределения заряда $\delta_{M_{\text{max}}}$, сопротивление впускной системы ΔP и соотношение ΔP от входного давления P во впускном коллекторе – $\delta_{\Delta P}$.

Таблица 1

Параметр	Цилиндр					
	1	2	3	4	5	6
M_i , кг	0,00281	0,00285	0,00266	0,00209	0,00209	0,00216
$M_{\text{ср}}$, кг	0,00244					
$\Delta\delta_{M_i}$, %	15,16	16,80	9,02	–14,34	–14,34	–11,47
$\delta_{M_{\text{max}}}$, %	–1,40	0	–6,67	–26,67	–26,67	–24,21
ΔP , Па	6828					
$\delta_{\Delta P}$, %	2,47					

На основе исследования газодинамики цифрового двойника базового варианта системы впуска выявлен ее недостаток – невозможность обеспечения равномерного распределения заряда по цилиндрам. Установлено, что неравномерность распределения заряда растет с увеличением оборотов двигателя.

Проанализировав работу цифрового двойника системы впуска, можно сделать вывод о необходимости оптимизации конструкции системы для обеспечения выравнивания распределения заряда воздуха по цилиндрам. Снижение уровня газодинамического сопротивления системы впуска и выравнивание заряда по цилиндрам может быть достигнуто за счет сглаживания переходов между входным патрубком и крышкой блока цилиндров, увеличения объема входной воздушной камеры для улучшения доступа воздуха к цилиндрам № 5, 6, удлинения расширенной части входного коллектора и крышки для улучшения доступа воздуха к цилиндрам № 4–6, наклона входного патрубка для перераспределения потока в коллекторе, обеспечения центрального подвода воздуха в систему впуска.

В соответствии с выявленными недостатками базовой конструкции были предложены конструктивные изменения, которые были внесены в геометрию созданного цифрового двойника, далее проводилось численное исследование параметров потока. Методика построения расчетной сетки, а также начальные и граничные условия задавались аналогично использованному для расчетов базового варианта системы впуска.

Рассмотрено четыре варианта реконструкции системы впуска: 1) изменение конструкции всего коллектора за счет увеличения его объема из-за расширения проходов к дальним цилиндрам (рис. 6, а); 2) изменение угла наклона входного патрубка крышки впускного коллектора для исключения застойных

зон и закрутки потока (уменьшения вихреобразования) (рис. 6, б); 3) переход от бокового входа в коллектор к центральному (рис. 6, в); 4) изменение геометрии входного патрубка и каналов, подводящих воздух к клапанам (рис. 6, г).

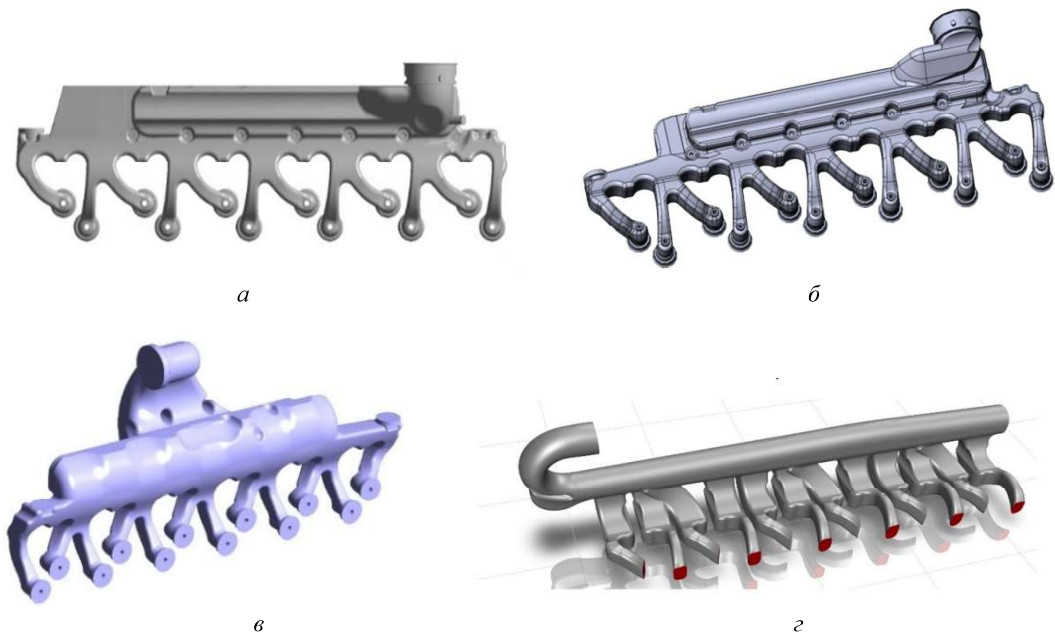


Рис. 6

В табл. 2 для каждого варианта модернизации впускного коллектора системы впуска воздуха двигателя показаны потери давления во впускном коллекторе и оценка распределения зарядов свежего воздуха по цилиндрам для режима работы двигателя с оборотами $n = 2300 \text{ мин}^{-1}$.

Таблица 2

Параметр	Цилиндр					
	1	2	3	4	5	6
Вариант 1						
M_i , кг	0,00284	0,00280	0,00252	0,00220	0,00214	0,00214
$M_{ср}$, кг	0,00244					
δ_{M_i} , %	16,39	14,75	3,28	−9,84	−12,29	−12,29
$\delta_{M_{max}}$, %	0	−1,41	−11,27	−22,53	−24,65	−24,65
ΔP , Па	6795,7					
$\delta_{\Delta P}$, %	2,46					
Вариант 2						
M_i , кг	0,00266	0,00268	0,00266	0,00227	0,00200	0,00229
$M_{ср}$, кг	0,00242					
δ_{M_i} , %	10,14	10,97	10,14	−6,00	−20,08	−5,18
$\delta_{M_{max}}$, %	−0,75	0	-0,75	-15,30	-25,37	-14,55
ΔP , Па	8640,1					
$\delta_{\Delta P}$, %	3,11					
Вариант 3						
M_i , кг	0,002571	0,002452	0,002512	0,002662	0,002555	0,002519
$M_{ср}$, кг	0,002545					
δ_{M_i} , %	−1,02	3,67	1,30	−4,58	−0,39	1,02
$\delta_{M_{max}}$, %	3,41	7,89	5,62	0	4,00	5,36
ΔP , Па	2469					
$\delta_{\Delta P}$, %	0,9					

Параметр	Цилиндр					
	1	2	3	4	5	6
Вариант 4						
M_i , кг	0,00231	0,00219	0,00222	0,00240	0,00226	0,00240
$M_{ср}$, кг	0,0023					
δ_{M_i} , %	–0,66	4,46	3,51	–4,49	1,63	–4,43
$\delta_{M_{max}}$, %	3,65	8,56	7,64	0	5,84	0,05
ΔP , Па	427					
$\delta_{\Delta P}$, %	0,16					

Таким образом, за счет реконструкции впускного коллектора при варианте 3 его конструкции существенно выравнивается распределение зарядов и уменьшаются потери давления.

Установлено, что для варианта 4 газодинамическое сопротивление системы впуска в головке блока цилиндров незначительное – $\Delta P = 427$ Па, что составляет $\delta_{\Delta P} = 0,16$ % от давления во входном расчетном сечении во впускном патрубке впускного коллектора в головке блока цилиндров. Неравномерность максимального и минимального значения составляет всего $\delta_{M_i} = 8,56$ %, при этом отклонение от среднего значения по всем цилиндрам не превышает $\delta_{M_{max}} = 4,5$ %. Отметим, что при использовании впускного патрубка с боковым подводом воздуха также можно обеспечить равномерную подачу заряда в цилиндры при правильном профилировании канала патрубка.

Таким образом, предложена технология создания цифрового двойника впускного патрубка головки блока цилиндров системы впуска поршневого двигателя с использованием пакета прикладных программ ANSYS.

На основе анализа газодинамических параметров и визуализации растекания воздуха в цифровом двойнике впускного коллектора двигателя выявлено несовершенство базовой конструкции системы впуска – неравномерность распределения заряда воздуха по цилиндрам двигателя.

С помощью созданного цифрового двойника численно исследуется влияние новых конструктивных решений во впускном коллекторе на газодинамические параметры системы впуска и получено рациональное конструктивное решение. Благодаря этому увеличена эффективность работы системы впуска: снижено сопротивление впускного патрубка и выровнены заряды свежего воздуха по цилиндрам двигателя.

Создание и применение цифрового двойника впускного коллектора головки блока цилиндров системы впуска поршневого двигателя актуально при реверс-инжиниринге, а также при совершенствовании или оптимизации конструкции поршневого двигателя.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках соглашения о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг № 075-03-2024-067 от 17.01.2024 (шифр FZSU-2023-0004) и в рамках соглашения о консорциуме между КНИТУ-КАИ и Институтом тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вырубов Д.Н. и др. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей. М.: Машиностроение, 1983. 372 с.
2. Костюченков А.Н., Финкельберг Л.А., Барышников С.И. Повышение эффективности перспективных авиационных поршневых двигателей [Электронный ресурс]. URL: https://aviatp.ru/files/enginew/recengines/1_AN_Kostuchenkov_TSIAM_im_PI_Baranova.pdf (дата обращения: 28.02.2024).
3. Гордин М.В., Палкин В.А. Концепции авиационных двигателей для перспективных пассажирских самолетов // Авиационные двигатели. 2019. № 3 (4). С. 7–16.
4. Плотиных Л.В. и др. Стационарная газодинамика и теплообмен турбулентных потоков в подающих системах разных конфигураций с клапанным механизмом // Изв. вузов. Физика. 2023. № 11. С. 137–143.
5. Еникеев Р.Д., Черноусов А.А. Модель нестационарного течения с закруткой для расчета газообмена поршневого ДВС // Изв. вузов. Авиационная техника. 2009. № 3. С. 33–35.
6. Гришин Ю.А., Семенчукова В.С., Бакулин В.Н. Численное моделирование волновых процессов в поршневом двигателе с помощью нестационарных газодинамических функций // Изв. вузов. Авиационная техника. 2021. № 2. С. 120–128.

7. Anilkumar D.B., Anoop K. E. Computational Analysis of Intake Manifold Design of a Four Cylinder Diesel Engine // International Journal of Current Engineering and Scientific Research. 2018. Vol. 5. № 4. P. 61–69.
8. Xu J. Flow Analysis of Engine Intake Manifold Based on Computational Fluid Dynamics // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 916. Article № 012043.
9. Kareem Emara, Ahmed Emara, Elsayed Abdel Razek. An Intake System Optimization of a Heavy Duty DI Diesel Engine Using CFD Analysis // Proc. of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Nov. 13–19, 2015, Houston, USA. Paper № 2015-53612.
10. Jemni M.A., Kantchev G., Abid M.S. Influence of Intake Manifold Design on In-Cylinder Flow and Engine Performances in a Bus Diesel Engine Converted to LPG Gas Fuelled, Using CFD Analyses and Experimental Investigations // Energy. 2011. Vol. 36. Iss. 5. P. 2701–2715.
11. Fan Y., Liu D., Wang L. 3D Numerical Simulation on the Variable Swirl Intake Process of Diesel Engine // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 273. P. 143–147.
12. Giannakopoulos G.K. et al. LES of the Gas-Exchange Process Inside an Internal Combustion Engine Using a High-Order Method // Flow, Turbulence and Combustion. 2020. Vol. 104. Iss. 2-3. P. 673–692.
13. Igarashi M. et al. Experimental Study on Fluid Mixing for Evaluation of Thermal Striping in T-Pipe Junction // Proc. of the 10th International Conference on Nuclear Engineering, April 14–18, 2002, Arlington, USA. Paper № 10-22255.
14. Запунов Д.И., Михеев Н.И., Душин Н.С. Метод моделирования течения жидкости в разветвленных каналах // Изв. вузов. Авиационная техника. 2013. № 1. С. 23–27.
15. Baranova T.A. et al. Non-Isothermal Vortex Flow in the T-Junction Channel // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2088. Article № 012034.
16. Финкельберг Л.А., Костюченко А.Н., Зеленцов А.А. Расчетно-экспериментальный анализ рабочего процесса поршневого двигателя, адаптированного к авиационному применению // Авиационные двигатели. 2020. № 1 (6). С. 15–22.

Поступила в редакцию 29.03.24

После доработки 1.04.24

Принята к публикации 1.04.24

Numerical Simulation of Air Intake of Aviation Piston Engines

I.A. POPOV¹, YU.V. ZHUKOVA², V.M. GUREEV¹, A.D. CHORNYI², AND I.A. POPOV³

¹ Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan

² A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus, Minsk, Belarus

³ Kazan State Agrarian University, Kazan

The present paper contains the results that were used in designing a digital twin instance of an air intake system of a piston engine. Using the digital twin instance of the air intake system of the piston engine, we proposed and approved the engineering solutions, how to improve the intake system efficiency. Efficiency criteria are represented by the aerodynamic drag of intake system channels and the uniformity of the air charge distribution over engine cylinders. Based on the calculations conducted, the recommendations have been made on improving the operating efficiency of given systems.

Air intake system, gas exchange system, air charge distribution, pressure loss, numerical simulation, digital twin instance