

УДК 004.65
Код ГРНТИ 55.42.03

doi 10.54708/19926502_2026_30311310

Совершенствование конструкции впускного коллектора на основе анализа его напряженно-деформированного состояния

К.В. Конева, А.А. Мамедов*, Д.В. Окунев

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа, Республика Башкортостан, Россия

Аннотация. Разработана методика расчета напряженно-деформированного состояния впускного коллектора (ВК) двигателя ЗМЗ 40620 в условиях воздействия рабочих нагрузок. Были выявлены основные факторы, влияющие на прочность и жесткость конструкции ВК. Проведен анализ напряжений и деформаций при действии температуры разницы атмосферного и внутреннего давлений модифицированной конструкции, обоснован выбор наиболее оптимальных вариантов конструктивного исполнения коллектора. Представлены рекомендации по изменению формы и размеров основных конструктивных элементов коллектора.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, впускной коллектор, напряженно-деформированное состояние, термические нагрузки, прочностной расчет.

*nvgaxbgscj@gmail.com

Введение

Современные двигатели внутреннего сгорания (ДВС) работают в условиях высоких механических и термических нагрузок, что предъявляет повышенные требования к надежности их конструктивных элементов, в том числе и впускной системы.

Впускной коллектор (ВК) – элемент ДВС, отвечающий за подачу воздуха в камеру сгорания. Количество воздуха, поступившее в камеру сгорания, характеризуется параметром – коэффициентом наполнения цилиндра воздухом (КНЦВ) η , который в современных ДВС равен 1,10.

При работе ДВС во впускном тракте происходят сложные газодинамические процессы. В результате изменения объема цилиндра и переменного сечения клапана во впускном тракте возникает волна разрежения, пик интенсивности которой формируется в момент максимальной скорости поршня. Данная волна начинает движение по трубопроводу в сторону его открытого конца со скоростью $u-c$ и отражается как волна сжатия. Наиболее полное отражение волны происходит, если в месте отражения площадь сечения канала $F \rightarrow \infty$. Чем выше интенсивность волны разрежения, тем выше будет интенсивность волны сжатия. Волна сжатия движется в сторону впускных клапанов со скоростью $u + c$. Если пик этой волны достигает клапана непосредственно перед его закрытием, происходит процесс дозарядки – дополнительное наполнение цилиндра воздухом в завершающей фазе такта впуска [1].

Если правильно согласовать закон открытия впускных клапанов, объем цилиндра и геометрию впускного тракта (диаметр и длина канала), удастся значительно усилить интенсивность волны разрежения и, как следствие, повысить эффективность волны сжатия. Это приводит к увеличению коэффициента наполнения цилиндра воздухом [2]. Примером служит работа инженеров компании NSU, которым удалось достичь значения коэффициента наполнения $\eta_v = 1,33$.

Совершенствование параметров двигателя связано с необходимостью конструктивных изменений, что влияет на прочностные характеристики ВК. Поэтому назначение параметров конструкции должно исходить из условий прочности и жесткости [3], что позволяет обеспечить ее надежность, долговечность и минимальную массу. Однако традиционные подходы к проектированию впускных коллекторов, ориентированные преимущественно

на достижение целевых газодинамических параметров, зачастую не учитывают в полной мере прочностные и жесткостные характеристики конструкции, что может приводить к снижению надежности при эксплуатации.

Существующие методики прочностного анализа впускных коллекторов, как правило, базируются на упрощенных схемах, учитывающих только газодинамическое воздействие [4–6], либо задаются усредненные температуры без привязки к реальному распределению по корпусу. Кроме того, в большинстве работ отсутствует сравнительный анализ различных материалов с учетом изменения толщины стенки и геометрической модификации конструкции, что не позволяет в полной мере оценить влияние этих факторов на напряженно-деформированное состояние (НДС).

В связи с этим в настоящей работе предложена и реализована методика моделирования НДС впускного коллектора, отличающаяся от существующих комплексным учетом совокупности критериев, влияющих на прочность и жесткость конструкции, а также разработаны рекомендации по подбору материала и геометрии конструкции.

Моделирование напряженно-деформированного состояния ВК

Модель геометрии. Численное решение задачи выполнено методом конечных элементов [7, 8] в трехмерной постановке. На Рис. 1 представлены модели стандартного (а) и доработанного (б) ВК. Отличия модифицированного ВК от стандартного заключаются в изменении формы раструба и толщины стенки, создании новой формы конструкции, увеличении объема с 2,5 л до 4,2 л.



Рисунок 1. Стандартный и доработанный ВК:
(а) стандартный; (б) доработанный.

Модель материала. Стандартный ВК изготовлен из алюминиевого сплава АК12 (АЛ2), доработанный – из стального сплава Ст3. Масса стандартного ВК – 3 кг, доработанного – 4,2 кг. Изменение конструкции, толщины стенки и материала привело к увеличению массы, в связи с чем необходимо подобрать сплав с меньшей плотностью, например алюминиевый АК9ч или материал из семейства полиамидов нейлон-66 (РА-66). Механические характеристики материалов приведены в таблице 1 [9, 10].

Таблица 1. Механические характеристики материалов.

Материал	Плотность (кг/м ³)	Модуль Юнга (ГПа)	Коэффициент Пуассона	Предел текучести (МПа)	Коэффициент линейного расширения (°C ⁻¹)
АК12	2650	72,5	0,33	160	20×10^{-6}
Ст3	7850	200	0,3	230	$12,5 \times 10^{-6}$
АК9ч	2650	69	0,34	270	$21,7 \times 10^{-6}$
РА-66	1140	2	0,4	65	80×10^{-6}

Толщина стенки стального ВК – 1 мм, у ВК из АК9ч, – 2,5 мм, у полиамидного – 4,5 мм.

Для моделирования ВК была построена конечно-элементная сетка (Рис. 2). Несущая способность многих элементов конструкций обычно определяется их напряженным состоянием и условиями прочности в местах концентрации, где прежде всего наступает предельное состояние и разрушение [11]. Для получения адекватных результатов применено неравномерное разбиение на конечные элементы исследуемой области конструкции. Общий размер элемента сетки – 8 мм, в областях предполагаемых концентраций напряжений – 2 мм. Число элементов сетки составило 126 736 ячеек.

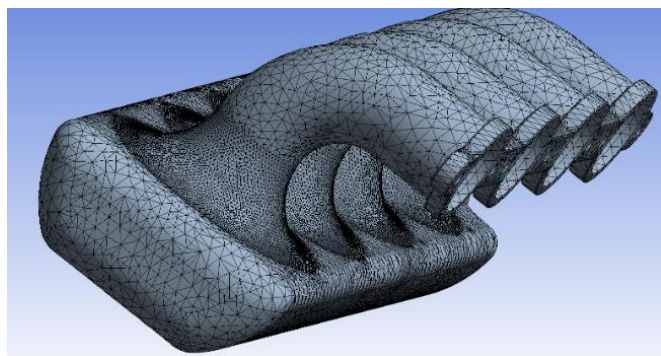


Рисунок 2. Конечно-элементная модель ВК.

Модель нагружения и граничные условия. Фланец крепления дроссельной заслонки (поз. 2, Рис. 2) закреплен в местах болтовых отверстий для ограничения перемещений в направлении дроссельной заслонки.

Фланец, прилегающий к головке блока цилиндров (ГБЦ) (поз. 1, Рис. 2), зафиксирован в осевом направлении через болтовые отверстия для ограничения перемещений ВК в направлении головки блока цилиндров.

ДВС является источником высоких температур, которые оказывают непосредственное влияние на теплофизические и физико-механические свойства конструкционных материалов. Благодаря работе системы охлаждения, на поверхности двигателя температура поддерживается в пределах 60–90 °С. Впускная система работает в данных режимах [12, 13].

Распределение температур по корпусу ВК было получено экспериментальным путем, прямыми измерениями с помощью пирометра на прогретом работающем ДВС. Самым теплонагруженным местом ВК является часть фланца, прилегающего к ГБЦ и крепящегося к клапанной крышке (поз. 1., Рис. 3). Фланец крепления дроссельной заслонки (поз. 2, Рис. 3) – холодная часть ВК. На основе экспериментальных данных был выполнен численный расчет температурных полей впускного коллектора [14]. Полученное распределение температур использовано в качестве тепловой нагрузки для последующего прочностного расчета.

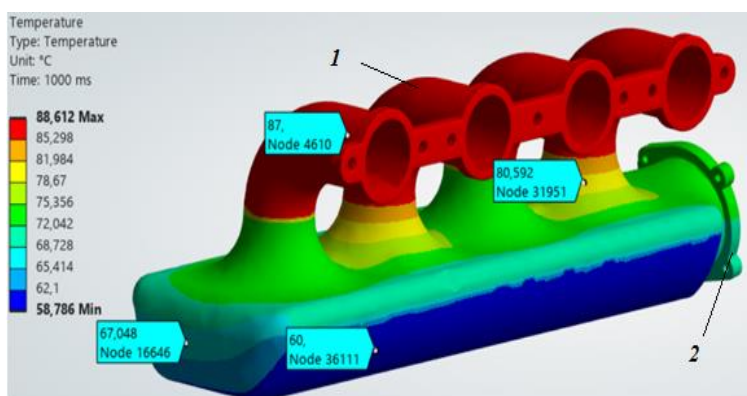


Рисунок 3. Распределение температур (°С) по корпусу ВК:

- 1 – фланец, прилегающий к головке блока цилиндров,
- 2 – фланец крепления дроссельной заслонки.

Основной нагрузкой, действующей на ВК, является давление (механическая нагрузка). В ходе газодинамических расчетов было получено значение внутреннего давления на стенку впускного коллектора $p_{\text{внутр}} = 10$ кПа. [5]. Снаружи на стенки ВК действует атмосферное давление $p_{\text{атм}} = 101$ кПа. Разница между этими значениями – давление, которое действует на стенки ВК.

$$p = p_{\text{атм}} - p_{\text{внутр}} = 101 - 10 = 91 \text{ кПа.} \quad (1)$$

На первом этапе на основе экспериментальных данных восстанавливается поле температур, а затем оно непосредственно передается в качестве тепловой нагрузки на прочностную модель [4].

В отличие от традиционных подходов, где температурное поле и НДС рассчитываются отдельно, в настоящей работе реализовано связанное термомеханическое моделирование, что позволяет корректно учесть вклад термических деформаций в суммарное НДС ВК. Такой подход обеспечивает более высокую достоверность результатов по сравнению с упрощенными методиками, игнорирующими совместное действие температуры и давления.

Результаты прочностных расчетов

Стальной коллектор. По результатам прочностных расчетов стального ВК наибольшие эквивалентные напряжения наблюдаются в местах болтового крепления и в галтельном переходе раструба ВК (Рис. 4). Наибольшие перемещения возникают также в галтельных переходах раструба и на его крышке. Наибольшие деформации в области центрального канала и мест подключения дополнительного оборудования и достигают 1 мм. На основе расчетов получен коэффициент запаса прочности, равный 1,7.

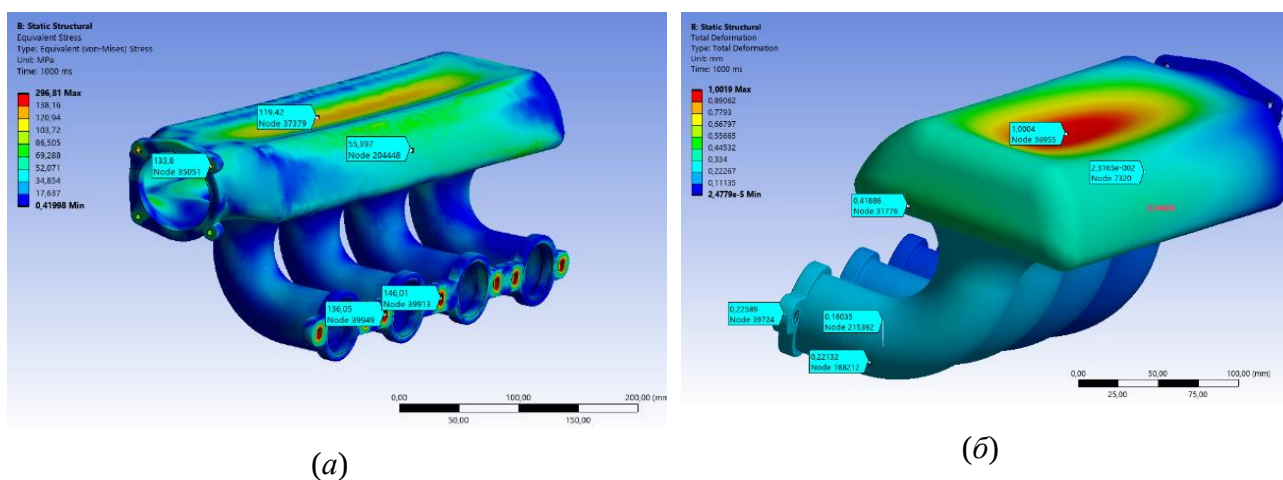


Рисунок 4. Распределение полных напряжений и перемещений в стальном ВК:
(а) напряжения, (б) перемещения.

Объем стенок стального коллектора – 525,9 см³ при массе $m = 4,1$ кг, объем деформируемых частей – 35 см³, что составляет 6,7% от общего объема.

Алюминиевый коллектор. Результаты расчета алюминиевого ВК показали, что опасная точка сохранила свое положение, при этом значение эквивалентных напряжений снизилось на 50% по сравнению со стальным ВК. Значения полных перемещений снизились на 20%. Получен коэффициент запаса прочности 3,5.

Ввиду различных значений толщины стенок, алюминиевый ВК имеет объем стенок 868,1 см³ при массе $m = 2,3$ кг. Объем деформируемой части равен 30 см³, что составляет 3,5% от общего объема, что в 2 раза меньше по сравнению со стальным ВК.

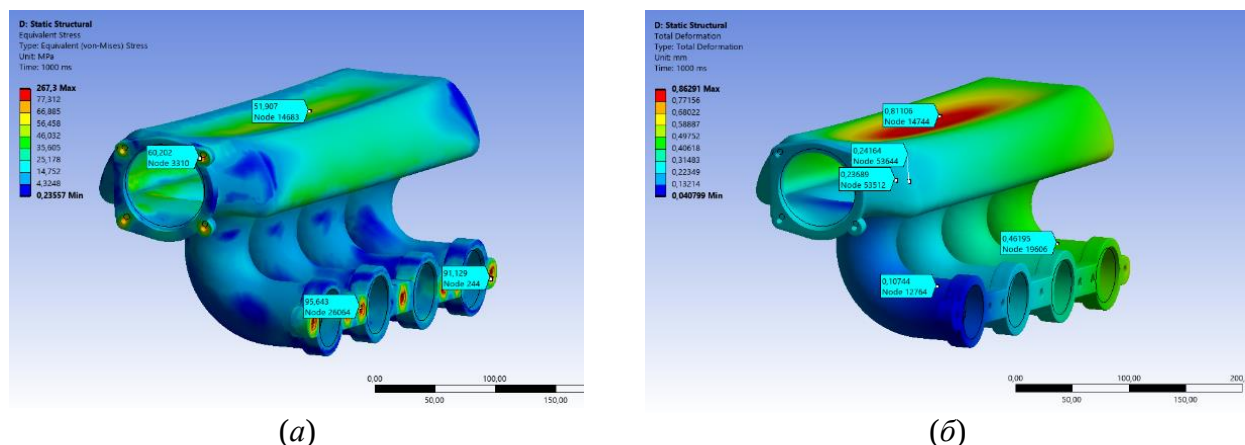


Рисунок 5. Распределение полных напряжений и перемещений в алюминиевом ВК:
(а) напряжения, (б) перемещения.

Полиамидный коллектор. В ВК, выполненном из полиамида, опасная точка изменила свое положение, переместившись в направлении торца ВК. Значение эквивалентных напряжений снизилось на 38% по сравнению со стальным ВК, однако значения полных перемещений увеличились в 2 раза. Получен коэффициент запаса прочности, равный 6,7.

Полиамидный ВК имеет объем стенок 1577 см³ при массе $m = 1,8$ кг. Объем деформируемой части равен 69 см³, что составляет 4% от общего объема.

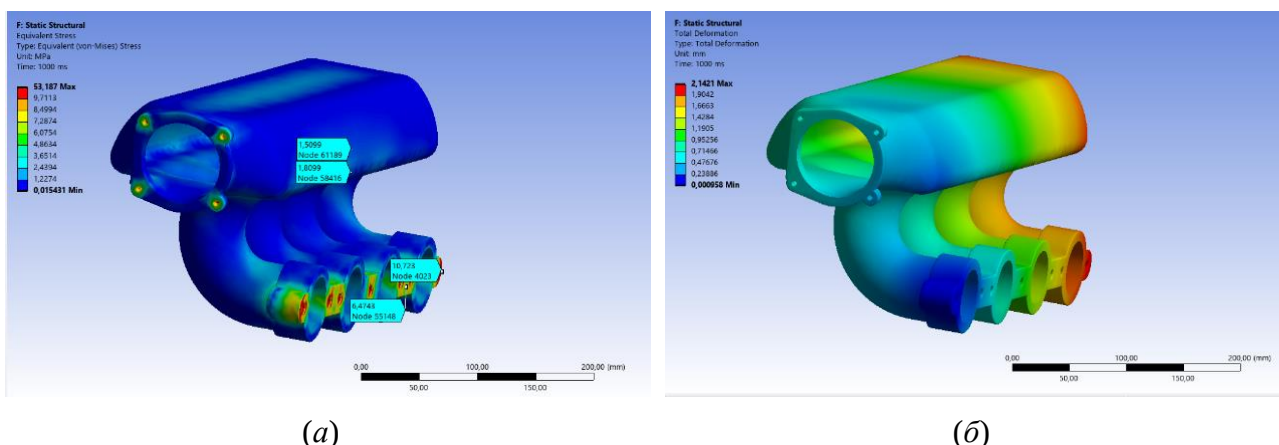


Рисунок 6. Распределение полных напряжений и перемещений в полиамидном ВК:
(а) напряжения, (б) перемещения.

Проведенный анализ показал, что полиамидная конструкция не обладает достаточной эффективностью ввиду ряда конструктивных ограничений и особенностей материала. Попытка повышения жесткости путем увеличения толщины стенки не дала необходимого результата. В связи с этим целесообразно подобрать оптимальную толщину стенки для достижения баланса между жесткостью и массой, а также добавить ребра жесткости [15, 16] на наружную поверхность вакуумной камеры – это должно дать существенный прирост жесткости без значительного утяжеления конструкции.

Заключение

Установлены ключевые факторы, влияющие на прочность и жесткость конструкции. Разработана методика расчета НДС ВК под действием рабочих нагрузок. Предложенная методика позволяет подбирать материал и геометрию детали на основе анализа НДС конструкции. Отличительной особенностью предложенной методики является использование экспериментальных данных для решения задачи о распределении полей температур и напряжений.

Результаты расчета для впускного ВК с модифицированной геометрией показали, что коэффициент запаса прочности составил 1,7. Замена материала на алюминиевый сплав АК9ч позволила снизить максимальные эквивалентные напряжения на 50% и повысить коэффициент запаса прочности до 3,5.

Применение полиамида РА-66, несмотря на наибольший коэффициент запаса прочности (6,7), привело к снижению жесткости конструкции: максимальные деформации возросли в два раза по сравнению со стальным вариантом. Для полиамидного ВК требуются дополнительные конструктивные изменения, включая оптимизацию толщины стенки и введение ребер жесткости.

Были выявлены зоны концентрации напряжений конструкций – область галтельного перехода вакуумной камеры в раструб и крышка ВК.

На основе сравнительного анализа сделан вывод, что ВК из алюминиевого сплава АК9ч является наиболее рациональным. Дальнейшие исследования рекомендуется направить на повышение жесткости полиамидного ВК путем изменения его геометрии.

Литература:

1. Атанов С.Н., Еникеев Р.Д. Экспериментальное исследование метода повышения коэффициента наполнения четырехтактного двигателя внутреннего сгорания интенсификацией дозарядки // Вестник УГАТУ. 2017. Т. 21. № 1(75). С. 38–44. [Atanov S.N., Enikeev R.D. Experimental study of a new method of improving charging efficiency 4-stroke internal combustion engine by an intensification of additional charging // Vestnik UGATU. 2017. V. 21. No. 1(75). P. 38–44 (in Russian)].
2. Еникеев Р.Д., Черноусов А.А. Система моделирования силовых установок наземного и воздушного транспорта. В сб.: Транспорт. Взгляд в будущее – TFV-24: Сборник научных статей международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 07–08 ноября 2024 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 2024. С. 17–19. [Enikeev R.D., Chernousov A.A. System for modeling power plants of ground and air transport. In: Transport. A look into the future – TFV-24: Collection of scientific articles from the international scientific and practical conference, St. Petersburg, November 7–8, 2024. St. Petersburg: St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, 2024. P. 17–19 (in Russian)].
3. Биргер И.А. Прочность и надежность машиностроительных конструкций. В сб.: Избранные труды. Уфа, 1998. 350 с. [Birger I.A. Strength and reliability of mechanical engineering structures. In: Selected works. Ufa, 1998. 350 p. (in Russian)].
4. Карнаухова И.В. Определение оптимальной температуры воздуха во впускном коллекторе двигателя // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2014. № 3(37). С. 7–11. [Karnaukhova I.V. Determination of the optimal air temperature in the engine intake manifold // Vestnik Sibirskoy Gosudarstvennoy Avtomobil'no-Dorozhnoy Akademii. 2014. No. 3(37). P. 7–11 (in Russian)].
5. Кузнецов В.Н., Беляев В.И., Мельников Ф.П. Расчет давления во впускном коллекторе многоцилиндрового двигателя // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2015. № 3(125). С. 122–126. [Kuznetsov V.N., Belyaev V.I., Melnikov F.P. Calculation of pressure in the intake manifold of a multi-cylinder engine // Vestnik Altayskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta. 2015. No. 3(125). P. 122–126 (in Russian)].
6. Монахов Е.И., Козлов А.А. Имитационная модель терморегулирования свежего заряда воздуха в газоздушном тракте дизельного двигателя типа В-2 // Альманах Пермского военного института войск национальной гвардии. 2026. № 2(22). С. 28–32. [Monakhov E.I., Kozlov A.A. Simulation model of thermal regulation of a fresh air charge in the gas-air tract of a V-2 diesel engine // Al'manakh Permskogo Voyennogo Instituta Voysk Natsional'noy Gvardii. 2026. No. 2(22). P. 28–32 (in Russian)].

7. Зенкевич О.С. Метод конечных элементов. М.: Мир, 1975. 544 с. [Zenkevich O.S. Finite element method. Moscow: Mir, 1975. 544 p. (transl. from English)].
8. Жернаков В.С., Соловьев П.В., Никитин С.Н. Моделирование ступенчатого нахлесточного клеевого соединения стержня из ПКМ методом КЭ. В сб.: Межотраслевой семинар памяти профессора Т.Д. Каримбаева «Применение композиционных материалов в двигателестроении», Москва, 12–14 сентября 2023 года. М.: Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, 2023. С. 67–70. [Zhernakov V.S., Soloviev P.V., Nikitin S.N. Modeling of a stepped overlap adhesive joint of a PCM rod using the finite element method. In: Interdisciplinary seminar in memory of Professor T.D. Karimbaev “Application of composite materials in engine building”, Moscow, September 12–14, 2023. Moscow: P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motors, 2023. P. 67–70 (in Russian)].
9. Зубченко А.С., Колосков М.М., Каширский Ю.В. Марочник сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 2003. 783 с. [Zubchenko A.S., Koloskov M.M., Kashirsky Yu.V. Reference book of steels and alloys. Moscow: Mashinostroyeniye, 2003. 783 p. (in Russian)].
10. Карташова Е. Д., Муйземнек А. Ю. Сопоставление результатов расчета инженерных констант полимерно-металлических композитов, полученных различными методами // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 2(50). С. 80–88. [Kartashova E. D., Muizemnek A. Yu. Comparison of the results of calculating the engineering constants of polymer-metal composites obtained by different methods // Reliability and quality of complex systems. 2025. No. 2(50). P. 80–88 (in Russian)].
11. Мавлютов Р.Р. Концентрация напряжений в элементах конструкций. М.: Наука, 1996. 240 с. [Mavlyutov R.R. Stress concentration in structural elements. Moscow: Nauka, 1996. 240 p. (in Russian)].
12. Окунев Д.В., Мамедов А.А., Балышева Э.Г., Семашко М.А. Модернизация впускного тракта для повышения мощности двигателя ЗМЗ 40620 с использованием САПР SolidWorks и Ansys. В сб.: Материалы конференции «Системы автоматизированного проектирования в науке, образовании и производстве». Уфа, УГНТУ, 2025. С. 123–135. [Okunev D.V., Mamedov A.A., Balysheva E.G., Semashko M.A. Modernization of the intake tract to increase the power of the ZMZ 40620 engine using CAD SolidWorks and Ansys. In: Proceedings of the conference “Computer-aided design systems in science, education and production”. Ufa, Ufa State Petroleum Technological University, 2025. P. 123–135 (in Russian)].
13. Бирюк В.В., Горшкалев А.А., Каюков С.С., Сайгаков Е.А. Расчет на прочность элементов ДВС с помощью ANSYS с учетом тепловых процессов в камере сгорания // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. 2015. Т. 14. № 2. С. 35–43. [Biryuk V.V., Gorshkalev A.A., Kayukov S.S., Saygakov E.A. Strength calculation of internal combustion engine elements using ANSYS taking into account thermal processes in the combustion chamber // Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Aerokosmicheskogo Universiteta im. Akademika S.P. Korolova. 2015. V. 14. No. 2. P. 35–43 (in Russian)].
14. Плотников Л.В., Бродов Ю.М., Жилкин Б.П., и др. Физическое и численное моделирование тепломеханических характеристик стационарных потоков в газоздушных трактах поршневых двигателей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 5. С. 22–28. [Plotnikov L.V., Brodov Yu.M., Zhilkin B.P., et al. Physical and numerical modeling of thermomechanical characteristics of stationary flows in gas-air tracts of piston engines // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Problemy Energetiki. 2019. V. 21. No. 5. P. 22–28 (in Russian)].
15. Притыкин А.И., Кириллов И.Е. Влияние расположения и параметров ребра жесткости на устойчивость квадратной пластины при сдвиге // Вестник МГСУ. 2014. № 12. С. 77–87. [Pritykin A.I., Kirillov I.E. Influence of the location and parameters of the stiffener on the stability of a square plate under shear // Vestnik MGSU. 2014. No. 12. P. 77–87 (in Russian)].

16. Соколов С.А., Грачев А.А. Устойчивость пластины с продольным ребром // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 4. С. 119–129. [Sokolov S.A., Grachev A.A. Stability of a plate with a longitudinal rib // Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Series: Mechanical Engineering. 2015. No. 4. P. 119–129 (in Russian)].

Об авторах:

КОНЕВА Ксения Владимировна, ассистент кафедры СМ, Уфимский университет науки и технологий, Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32, ksyu.koneva.95@mail.ru.

МАМЕДОВ Анар Аганович, бакалавр 3-го курса, Уфимский университет науки и технологий, Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32, nvgaixbgscj@gmail.com.

ОКУНЕВ Денис Владиславович, бакалавр 3-го курса, Уфимский университет науки и технологий, Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32, ufimsky.d@yandex.ru.

Metadata:

Title: Improvement of the intake manifold design based on analysis of its stress-strain state.

Author 1: Ksenia Vladimirovna Koneva, Assistant of the Department of Strength of Materials, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, ksyu.koneva.95@mail.ru.

Author 2: Anar Aganovich Mamedov, 3rd year bachelor's student, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, nvgaixbgscj@gmail.com.

Author 3: Denis Vladislavovich Okunev, 3rd-year bachelor's student, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, ufimsky.d@yandex.ru.

Abstract: The stress-strain state of the intake manifold (IM) of the ZMZ 40620 engine under operational loads has been investigated. The main factors affecting the strength and rigidity of the IM structure were identified. An analysis of deformations under the influence of temperature and the differential between atmospheric and internal pressure in the modified design was carried out, justifying the selection of the most optimal design options for the manifold. Recommendations for changing the shape and dimensions of the main structural elements of the manifold are presented.

Keywords: internal combustion engine, intake manifold, stress-strain state, thermal loads, strength calculation.