

Научная статья
УДК 621.43.062

Повышение мощностных показателей бензинового двигателя за счёт оптимизации его выпускной системы

Эдуард Андреевич Савастенко¹, Александр Сергеевич Стряпунин²,
Роман Вадимович Скобелев³

^{1, 2, 3} Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹ e.d.u.a.r.d@inbox.ru

² alex.s.study@mail.ru

³ skobelev.rmn@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты газодинамического расчёта выпускной системы двигателя ВАЗ-21126 в программном комплексе (ПК) *FlowVision*. Рассмотрено влияние волновых процессов в выпускной системе на процесс очистки цилиндра от отработанных газов (ОГ). По эмпирическим зависимостям рассчитан и спроектирован модифицированный выпускной коллектор (4-2-1), в котором волновые процессы оказывают положительный эффект на коэффициент остаточных газов в цилиндре. По результатам проведённых исследований получено изменение давления после выпускного клапана, которое снизилось на 6,7%. Представлены результаты расчёта коэффициента наполнения (η_v) по внешней скоростной характеристике (от 1000 мин⁻¹ до 4000 мин⁻¹), который увеличился от 2,5 до 4%. Доказано, что увеличение мощности двигателя возможно за счёт изменения формы выпускного коллектора.

Ключевые слова: выпускной коллектор, двигатель ВАЗ-21126, *FlowVision*, мощность двигателя, волновой процесс

Для цитирования: Савастенко Э. А., Стряпунин А. С., Скобелев Р. В. Повышение мощностных показателей бензинового двигателя за счёт оптимизации его выпускной системы // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2026. № 2 (48).

Original article

Indicators Power Increase of Gasoline Engine by Optimizing Its Exhaust System

Eduard A. Savastenko¹ Alexander S. Stryapunin², Roman V. Skobelev³

^{1, 2, 3} Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

¹ e.d.u.a.r.d@inbox.ru

² alex.s.study@mail.ru

³ skobelev.rmn@mail.ru

© Савастенко Э.А., Стряпунин А.С., Скобелев Р.В., 2026

Abstract. This article presents the results of a VAZ-21126 engine exhaust system calculation using the FlowVision software. The influence of wave processes in the exhaust system on cylinder exhaust gas purification is examined. A modified exhaust manifold (4-2-1) was calculated and designed using empirical relationships. Wave processes have a positive effect on the residual gas coefficient in the cylinder. The study resulted in a 6,7% reduction in pressure after the exhaust valve. The results of the calculation of the filling coefficient (η_v) based on the external speed characteristic (from 1000 min^{-1} to 4000 min^{-1}) are presented; it increased from 2.5 to 4%. Thus, engine power can be increased by changing the shape of the exhaust manifold.

Keywords: exhaust manifold, VAZ-21126 engine, FlowVision, engine power, wave process

For citation: Savastenko E.A., Stryapunin A.S., Skobelev R.V. Indicators Power Increase of Gasoline Engine by Optimizing Its Exhaust System. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2026. No. 2 (48).

Введение

Основными задачами выпускной системы двигателя внутреннего сгорания являются отвод отработанных газов, их очистка от токсичных компонентов и глушение шума. С целью ускорения прогрева катализатора при холодных пусках, уменьшения веса и габаритов системы, а также снижения инертности системы управления в серийных автомобильных двигателях используется выпускной коллектор небольшой длины. Такая конструкция имеет существенный недостаток – влияние ударных волн, образующихся в выпускном коллекторе на свободный выпуск и продувку цилиндра [1, 3].

Цель статьи – представить методику расчёта выпускной системы автомобильного двигателя, спроектированной с учётом волновых процессов для увеличения коэффициента наполнения и мощности, а также продемонстрировать результаты этого расчёта. Особую ценность представляет тот факт, что моделирование проводится в отечественном программном комплексе *FlowVision*.

Выбор формы выпускного коллектора

В качестве объекта исследования выбран двигатель VAZ-21126, устанавливаемый на автомобили Лада Гранта, Приора и др. В серийном

исполнении используется цельный (литой) выпускной коллектор с короткими каналами, объединёнными в общую камеру с трёхкомпонентным каталитическим нейтрализатором (рисунок 1).



Рис. 1. Стандартный выпускной коллектор с нейтрализатором двигателя ВАЗ-21126

Преимуществом такой конфигурации являются: относительно невысокая стоимость, более высокая технологичность в производстве и близкое расположение нейтрализатора к камере сгорания, что способствует удовлетворительной очистке от токсичных компонентов ОГ. С другой стороны, такой коллектор имеет существенный недостаток: низкая эффективность отвода ОГ и продувки камеры сгорания вследствие наличия коротких каналов, создающих сопротивление в виде ударных волн, а также подпор отработанным газам в других цилиндрах, в которых начинается процесс выпуска. Эти факторы влияют на очистку цилиндров и снижают коэффициент наполнения и как следствие мощность двигателя.

Одним из вариантов решения данной проблемы для атмосферных двигателей является использование волновых явлений в настроенных выпускных системах [2]. С помощью известных газодинамических формул [3] и эмпирических зависимостей расчёта выпускных систем [4] на кафедре «Теплотехника и автотракторные двигатели» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) был

рассчитан и спроектирован трубчатый выпускной коллектор, позволяющий использовать волновой процесс для увеличения мощности двигателя ВАЗ-21126 со схемой 4-2-1 (рисунок 2).



Рис. 2. Модернизированный выпускной коллектор

Порядок работы цилиндров проектируемого двигателя: 1-3-4-2. Трубопроводы в модернизированном выпускном коллекторе необходимо соединить следующим образом: четыре трубопровода от каждого цилиндра двигателя соединяются попарно (1 и 4, 2 и 3). Затем два трубопровода соединяются в один, т.е. получается схема (4-2-1). Такая конфигурация необходима для того, чтобы волна давления от ОГ из одного цилиндра отражалась от элементов глушения шума и возвращалась к выпускным клапанам следующего через один по порядку работы цилиндра, создавая волну разрежения.

Расчёт и формирование трёхмерной модели коллектора ВАЗ-21126

Расчёт геометрии модернизированного выпускного коллектора производится по методике [4], согласно которой необходимо знать рабочий объем двигателя и диапазон частот вращения, на которых планируется увеличить мощность двигателя.

Согласно рисунку 3 коллектор можно разделить на 3 участка:

1-й участок – 4 трубопровода с параметрами l_1 и D_1 от плоскости примыкания к головке блока цилиндров до попарного соединения

трубопроводов от 1-го и 4-го цилиндров – в первый, от 2-го и 3-го цилиндров – во второй;

2-й участок – два трубопровода с параметрами l_2 и D_2 ;

3-й участок – соединение двух трубопроводов в один с параметрами l_3 и D_3 .

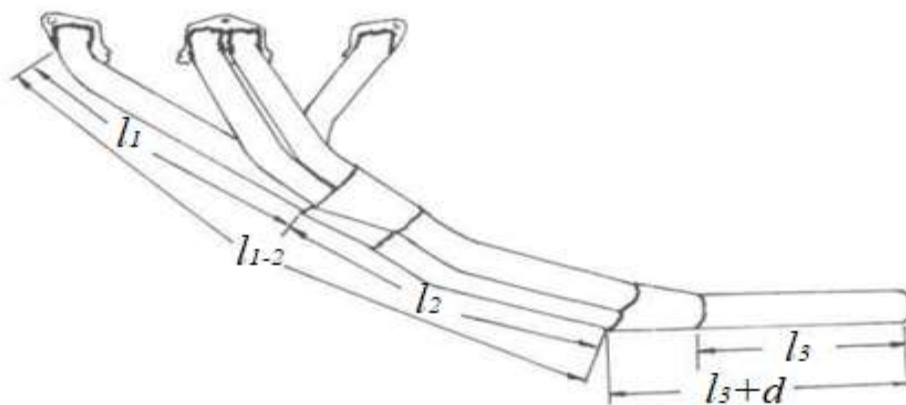


Рис. 3. Схема модернизированного выпускного коллектора

Формула для определения длины трубопровода до соединения в один:

$$l_{1-2} = \frac{850 \cdot (180 + \phi'_b)}{n} - 3, \quad (1)$$

где n – частота вращения двигателя, на которой планируется увеличить мощность двигателя, мин^{-1} .

Формула для определения диаметра первичных трубопроводов:

$$D_1 = \sqrt{\frac{Vh}{(l+3) \cdot 25}} \cdot 2.1, \quad (2)$$

где Vh – рабочий объём двигателя, л.

Формула для определения диаметра вторичных трубопроводов:

$$D_2 = \sqrt{D_1^2 \cdot 2}, \quad (3)$$

Формула для определения диаметра конечного трубопровода до среза в атмосферу:

$$D_3 = \sqrt{\frac{Vh \cdot 2}{(l+3) \cdot 25}} \cdot 2 \quad (4)$$

В таблице 1 представлены параметры спроектированного выпускного коллектора для двигателя ВАЗ-21126.

Таблица 1

Длины и диаметры модернизированного выпускного коллектора

l_{1-2} , мм	961,8
l_1 , мм	381
l_2 , мм	580,8
l_3 , мм	1037
D_1 , мм	34,4
D_2 , мм	45,2
D_3 , мм	46,3

По расчётным данным разработана трёхмерная модель выпускного коллектора в программном комплексе *T-FLEX CAD* (рисунок 4).

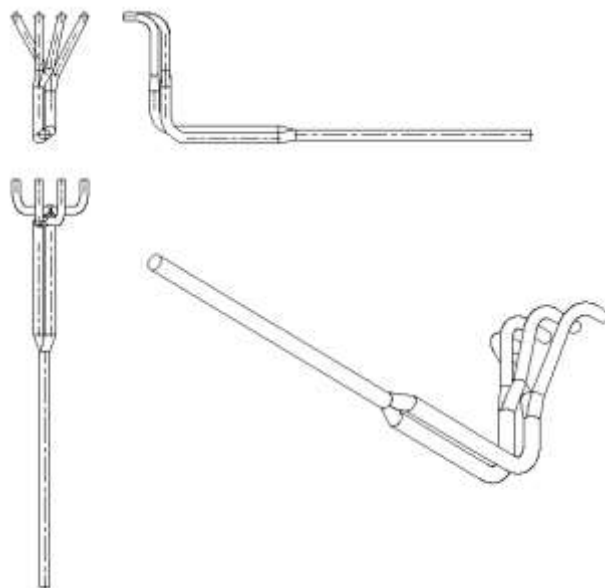


Рис. 4. Трёхмерная модель модернизированного выпускного коллектора

Моделирование движения ОГ в выпускном коллекторе

В современном проектировании систем впуска и выпуска ДВС широкое распространение получило *CFD*-моделирование, которое позволяет оценить результат не только численно, но и визуально, что позволяет оперативно и без лишних затрат вносить изменения в конструкцию [5-7]. В данной работе для

оценки корректности сформированной модели был использован ПК *FlowVision* – российский CAE-пакет для междисциплинарного моделирования устройств и физических процессов (№2504 в Реестре российского ПО)¹.

Для указания граничных условий на выпуске из каждого цилиндра использованы результаты расчёта рабочего процесса, выполненного в программном комплексе *AVL Cruise M*. Для воспроизведения волновых явлений структурная схема была представлена в виде каналов на основе метода конечных элементов в одномерной постановке (1D) (рисунок 5). Модель строится из блоков, содержащих в себе газодинамические модели различных типовых компонентов газового потока, в основе которых лежат экспериментально определённые коэффициенты сопротивления трения для характерных параметров канала [8].

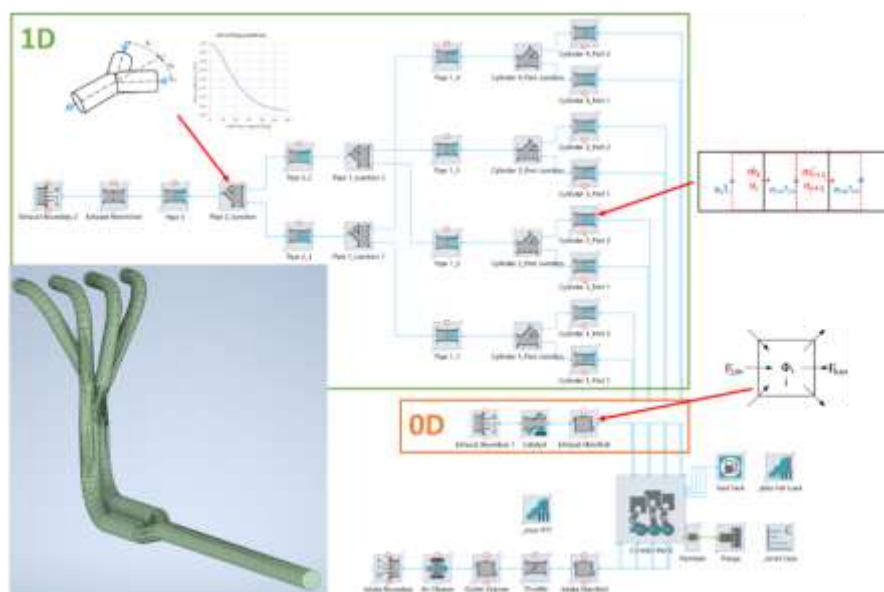


Рис. 5. Структурная схема выпускного коллектора по схеме 4-2-1 в 0D и 1D постановке

Валидация модели производилась на основе результатов стендовых испытаний, выполненных на кафедре «Теплотехника и автотракторные двигатели» МАДИ.

¹ FlowVision: официальный сайт. Москва. URL: <https://flowvision.ru/> (дата обращения: 28.04.2026)

Параметры давления за выпускным клапаном были заданы в виде таблицы на каждом градусе поворота коленчатого вала. На выходе из каждого цилиндра установлены датчики давлений, а сопротивление каталитического нейтрализатора задано модификатором сопротивления ($p_{\text{кат}} = 5$ кПа) после соединения всех трубопроводов (рисунок 6). Количество расчётных ячеек – 110 000 шт., расчётный шаг CFL = 1.

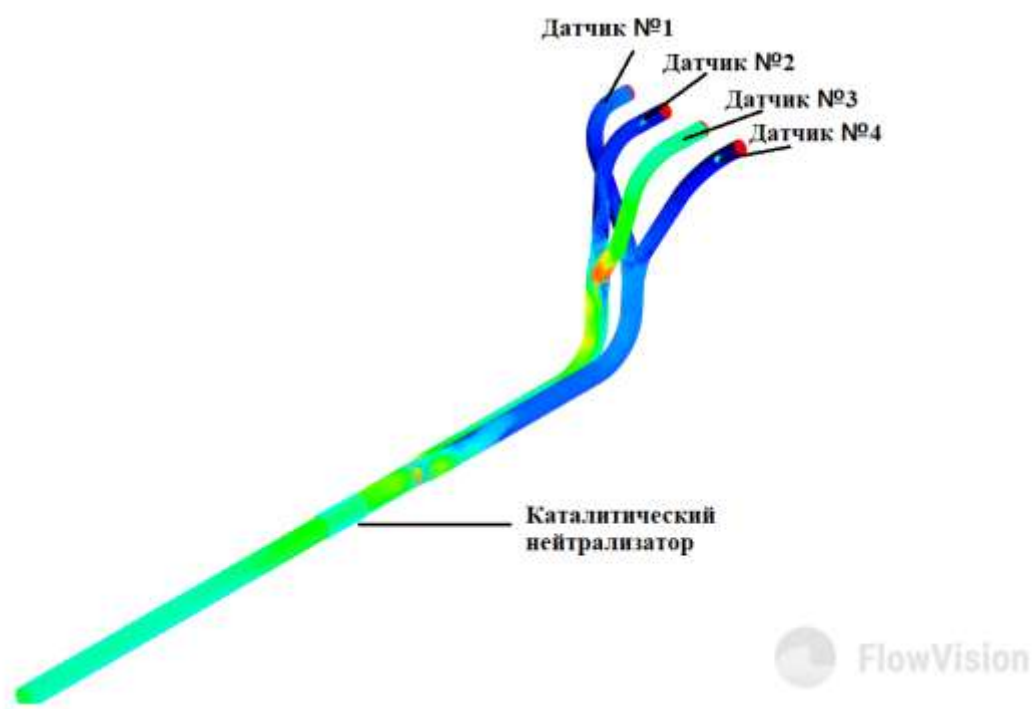


Рис. 6. Результаты моделирования модернизированного коллектора, выпуск из 2-го цилиндра

На рисунке 6 видно, что волна давления, выходящая из 3-го цилиндра, распространяется в сторону основного трубопровода и ко 2-му цилиндру. Таким образом не создаётся препятствий для выпуска следующего по порядку работы 1-го цилиндра. К моменту начала выпуска из 1-го цилиндра волна от 3-го цилиндра дойдёт до 1-го и отразится от его выпускного клапана, при этом волна разрежения создаст положительный эффект при выпуске ОГ из 1-го цилиндра. Такой эффект будет справедлив и для остальных цилиндров (рисунок 7).

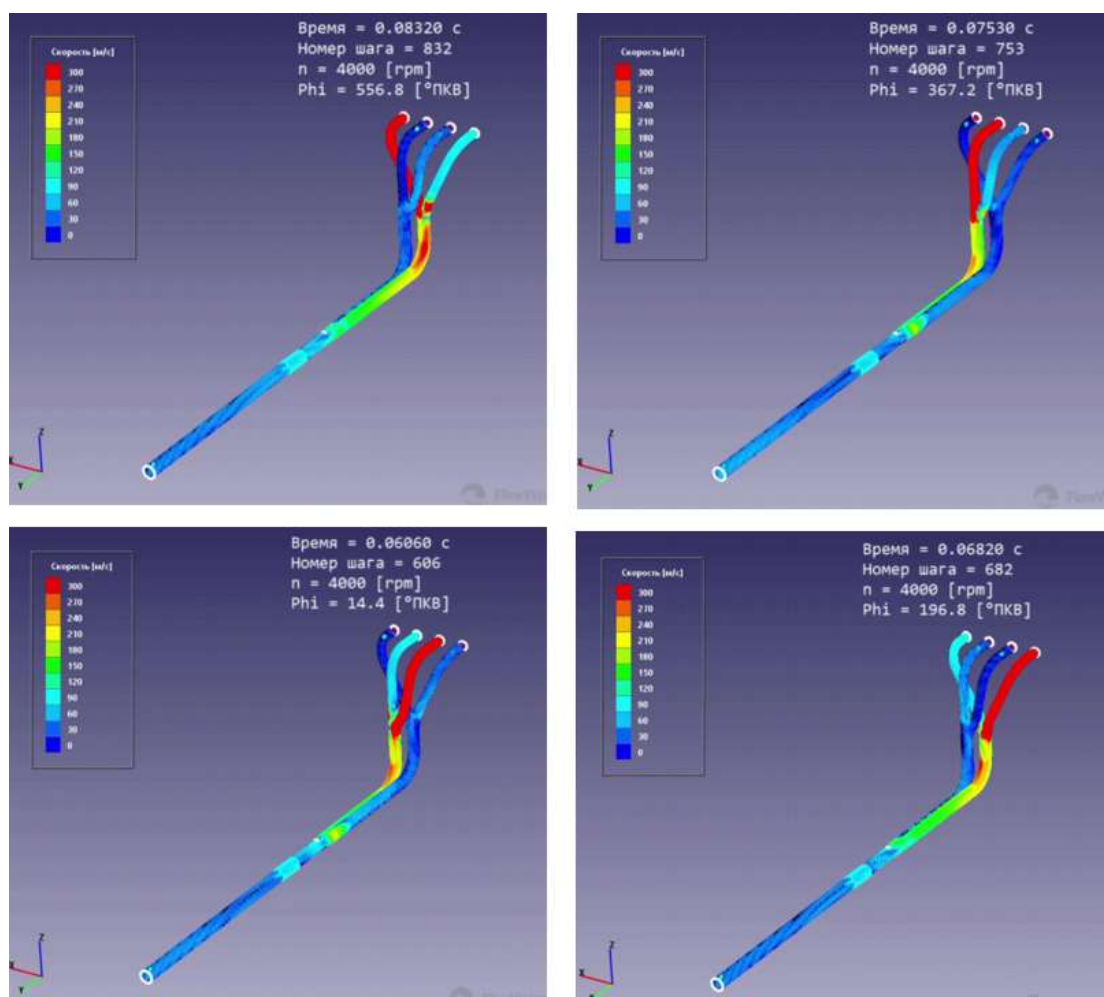


Рис. 7. Результаты моделирования модернизированного коллектора, $n=4000 \text{ мин}^{-1}$

Также был проведён расчёт стандартного коллектора. На рисунке 8 продемонстрировано, как отработанные газы создают сопротивление для всех цилиндров из-за короткой длины выпускных трубопроводов и соединения их в общий объем нейтрализатора с заданным противодействием, равным 5 кПа, что соответствует стандартному сопротивлению для данных типов катализаторов.

После проведения расчёта со стандартным и модернизированным коллектором были сопоставлены результаты давлений на выходе из цилиндров (рисунок 9).

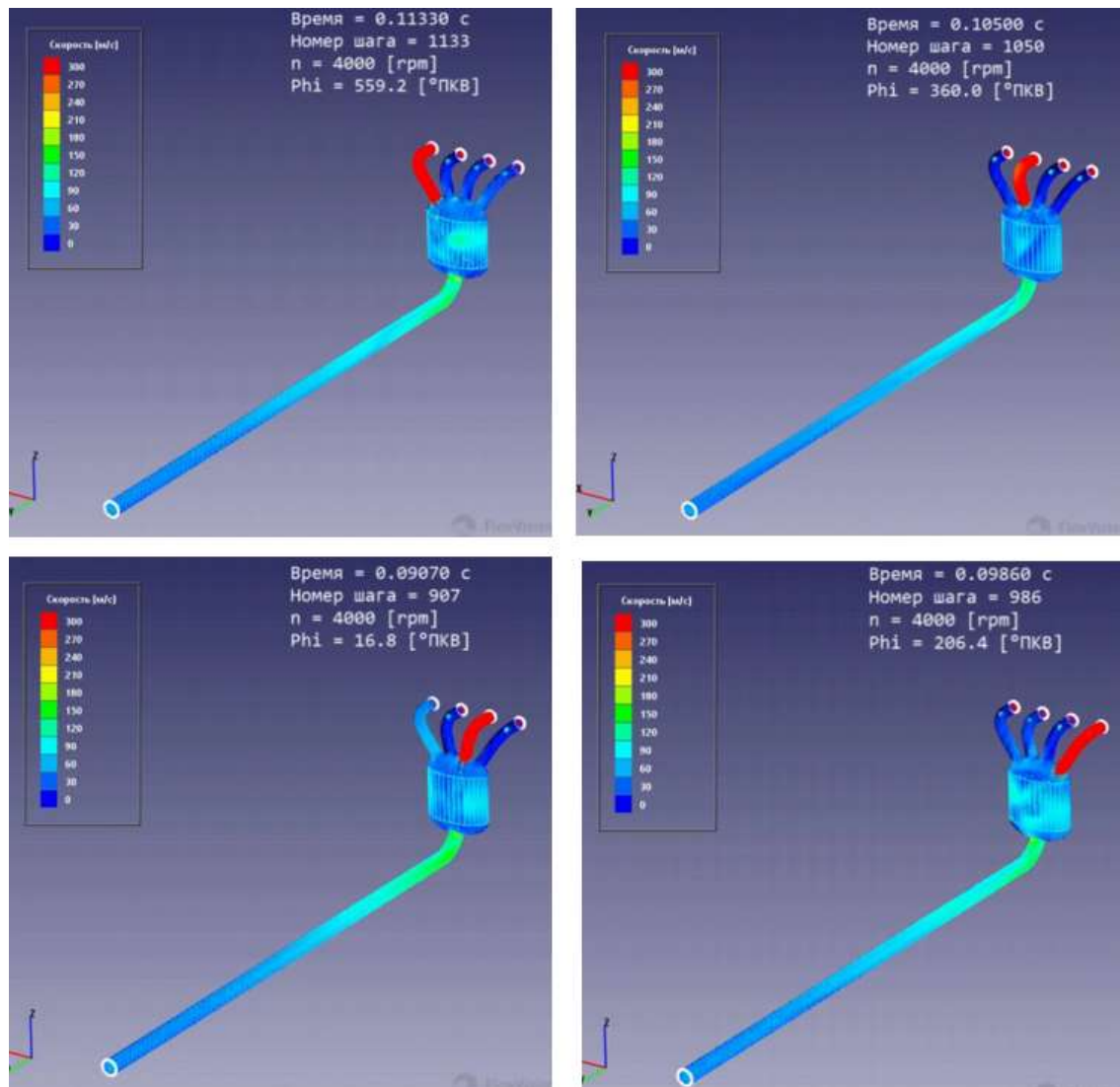


Рис. 8. Результаты моделирования стандартного коллектора, $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$

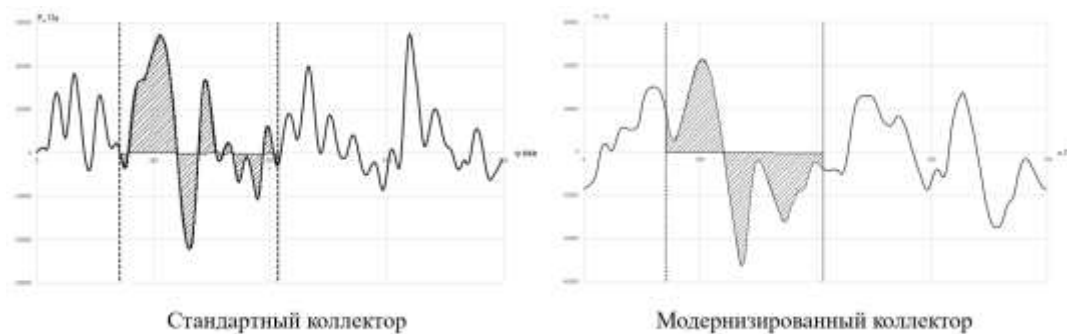


Рис. 9. Диаграммы давлений на выпуске из 1-го цилиндра, $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$

На рисунке 9 пунктирными линиями обозначены фазы начала и окончания процесса выпуска ОГ из 1-го цилиндра ($n = 4000 \text{ мин}^{-1}$). В начале выпуска создаётся волна давления в первом и втором варианте коллектора, что обусловлено высоким давлением в цилиндре. При этом в стандартном коллекторе в момент выпуска приходит волна давления от 2-го цилиндра с затухающими колебаниями. Среднее избыточное давление на выходе составило: $p_{r \text{ изб}}^{\text{станд}} = 3,9 \text{ кПа}$, а абсолютное: $p_r^{\text{станд}} = 105,2 \text{ кПа}$. В модернизированном коллекторе, наоборот, создаётся разрежение, которое дает дополнительный перепад между цилиндром и выпускным трубопроводом. Среднее давление на выходе из 1-го цилиндра модернизированного коллектора составило: $p_{r \text{ изб}}^{\text{мод}} = -3,1 \text{ кПа}$, а абсолютное: $p_r^{\text{мод}} = 98,2 \text{ кПа}$. При этом перепад составил $\Delta p = 7 \text{ кПа}$.

Результаты моделирования по давлению и температуре ОГ

Моделирование газодинамического потока проводилось в диапазоне частот вращения от $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ до $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$. Сравнение полученных результатов процесса выпуска ОГ в стандартном и модернизированном выпускных коллекторах представлены на рисунках 10, 11.

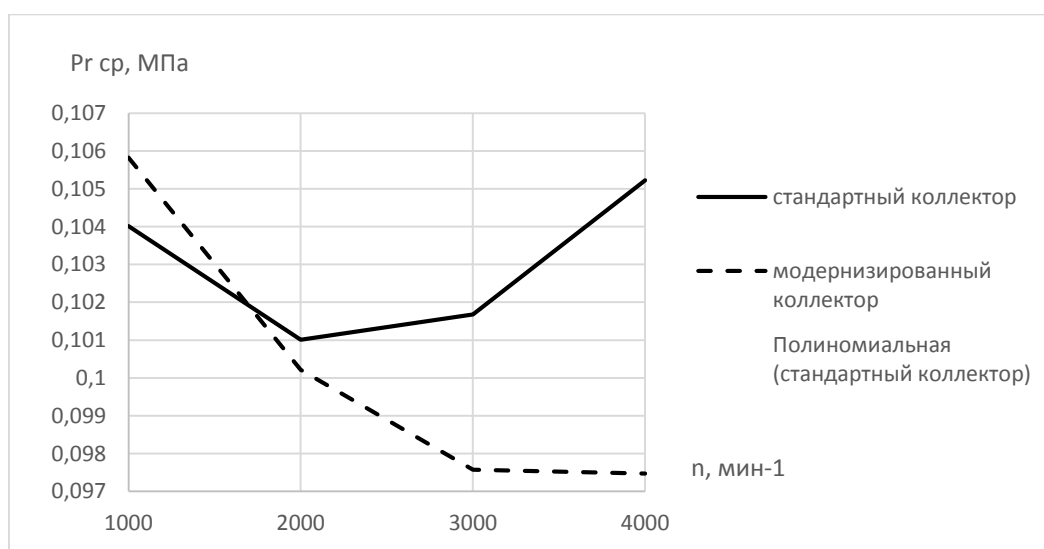


Рис. 10. График давления $p_{r \text{ ср}}$ со стандартным и модернизированным коллекторами

Из рисунка 10 видно, что давление в модернизированном коллекторе на низких частотах вращения выше, чем в стандартном (поскольку коллектор был рассчитан для средних и высоких частот вращения). Это связано с низкой скоростью ОГ, что в совокупности с увеличенной длиной коллектора не дает желаемого эффекта (газы не успевают достичь пересечения с соединением трубопроводов и создается газодинамический подпор). Но на частотах вращения выше 2000 мин^{-1} видно падение давления p_r относительно стандартного коллектора, что способствует увеличению скорости движения газов.

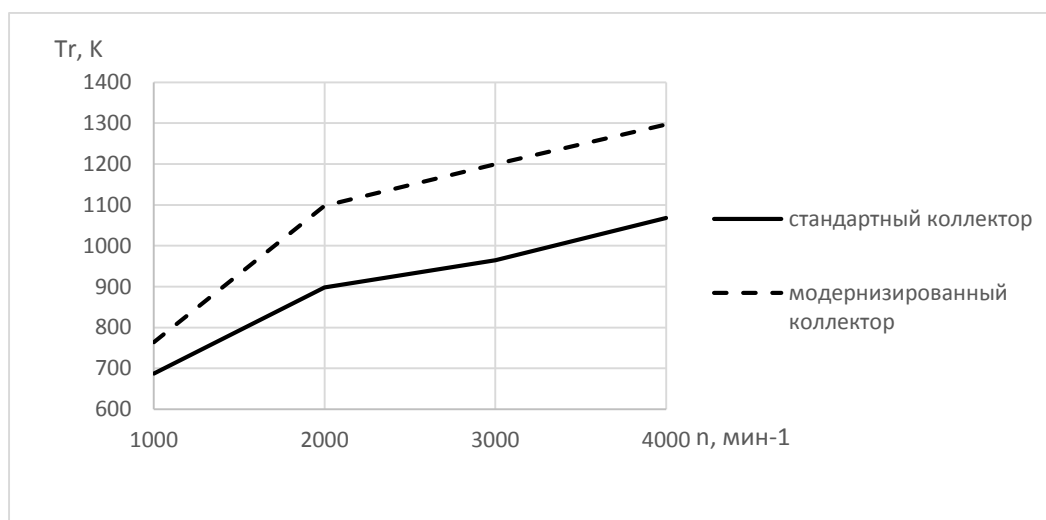


Рис. 11. График температуры T_r со стандартным и модернизированным коллекторами

Увеличение температуры в модернизированном коллекторе (рисунок 11) обусловлено тем, что ОГ в стандартном коллекторе разбавляются охлаждёнными газами, приходящими с волнами давления из соседних цилиндров. Этот эффект можно использовать, чтобы не проводить дополнительных мероприятий по термоизоляции трубопроводов модернизированного коллектора, поскольку нейтрализатор удален на большее расстояние, чем в заводском исполнении. Следует отметить, что максимальное увеличение температуры составило $\Delta T_r = 229 \text{ К}$.

Влияние формы коллектора на коэффициенты остаточных газов и наполнения

Полученные в ходе моделирования результаты используются для расчёта коэффициента остаточных газов (γ) и коэффициента наполнения (η_v) согласно стандартным формулам [9].

Формула расчета коэффициента остаточных газов (γ):

$$\gamma = \frac{T_0 + \Delta T}{T_r} \cdot \frac{p_r}{\varepsilon \cdot p_a - p_r} \quad (5)$$

Формула расчета коэффициента η_v :

$$\eta_v = \varphi_1 \cdot \frac{p_a}{p_0} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{T_0}{T_a \cdot (1 + \varphi_1 \cdot \gamma)} \quad (6)$$

Результаты расчета представлены в таблице 2.

Таблица 2

Коэффициенты остаточных газов и коэффициенты наполнения
в стандартном и модернизированном коллекторе

	Стандартный коллектор		Модернизированный коллектор		$\Delta\gamma, \%$	$\Delta\eta_v, \%$
	γ	η_v	γ	η_v		
1000	0,0723	0,78	0,0664	0,797	8,1	2,1
2000	0,0535	0,784	0,0434	0,805	18,8	2,6
3000	0,0502	0,783	0,0385	0,808	23,3	3,1
4000	0,0472	0,779	0,0356	0,809	24,5	3,7

При изменении давления в выпускном коллекторе скорость движения газов в цилиндре увеличивается, что приводит к большему перепаду в камере сгорания во время перекрытия клапанов. Следовательно, поток газов на впуске интенсивней вытесняет остаточные газы из цилиндра, что способствует улучшению процесса очистки.

Результаты по увеличению коэффициента наполнения цилиндров представлены на рисунке 12. За счет модернизации выпускной системы расчетный коэффициент наполнения η_v увеличился с 2% на низких оборотах

до 3,7% на высоких оборотах. Это способствует увеличению мощностных показателей двигателя в результате применения модернизированной выпускной системы.

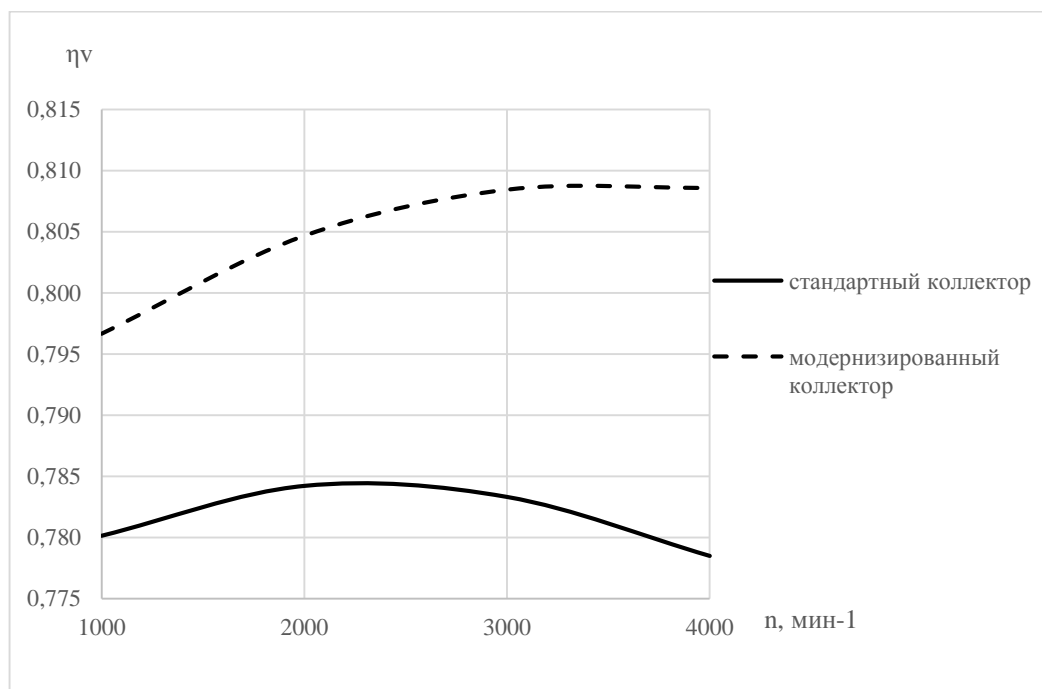


Рис. 12. График коэффициента наполнения η_v двигателей со стандартным и модернизированным коллекторами

Выводы

1. Разработана модель модернизированного выпускного коллектора двигателя ВАЗ-21126 и проведено *CFD*-моделирование течения ОГ в ПК *FlowVision*.
2. В модернизированном выпускном коллекторе волны давления не препятствуют выпуску ОГ из цилиндров, создаётся разрежение в выпускных трубопроводах, давление на выпуске уменьшается до 7%.
3. Рассчитаны коэффициенты наполнения в области частот вращения от $n = 1000$ мин⁻¹ до $n = 4000$ мин⁻¹. Увеличение коэффициента наполнения в модернизированным коллектором составило $\Delta\eta_v = 2,1...3,7\%$, что способствует росту мощности двигателя. Наибольший эффект достигается на высоких оборотах двигателя.

Список источников

1. Иванов, И. Е. Газовая динамика. Учебное пособие / И. Е. Иванов, В. Е. Ерещенко. – Москва : МАДИ (ГТУ), 2009. – 89 с.
2. Морозов, К. А. Особенности рабочих процессов высокооборотных карбюраторных двигателей / К. А. Морозов, Б. Ю. Черняк, Н. И. Синельников ; Под ред. акад. Б. С. Стечкина. – Москва : «Машиностроение», 1971. – 100 с.
3. Абрамович, Г. Н. Прикладная газовая динамика : В 2 ч. / Г. Н. Абрамович. –5-е изд., перераб. и доп. – Москва : Наука, 1991. – Ч. 1. – 597 с. – ISBN 5-02-014015-5.
4. Bell, A. Graham. Performance Tuning In Theory & Practice (4 Stroke Engines) / A. Graham Bell. – USA : Haynes, 1981. – P. 110-115.
5. Design and CFD analysis of intake port and exhaust port for a 4 valve cylinder head engine / V. M. Latheesh, P Parthasarathy, V. Baskaran, S. Karthikeyan // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – Vol. 310, No. 1. – P. 012122. – DOI 10.1088/1757-899X/310/1/012122.
6. A CFD (computational fluid dynamics) study on the effects of operating an engine with low intake valve lift at idle corresponding speed / A. C. Clenci, V. Iorga-Siman, M. Deligant, P. Podevin // Energy. – 2014. – Vol. 71. – P. 202-217. – DOI 10.1016/j.energy.2014.04.069.
7. Ahmed, S. Hybrid model for exhaust systems in vehicle thermal management simulations / S. Ahmed, H. Rottengruber, M. Full // Automotive and Engine Technology. – 2022. – Vol. 7, No. 1-2. – P. 115-136. – DOI 10.1007/s41104-022-00104-w. – EDN LQOTROP.
8. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик; под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1992. – 672 с. – ISBN 5-217-00393-6.
9. Автомобильные двигатели : Курсовое проектирование / М. Г. Шатров, И. В. Алексеев, С. Н. Богданов [и др.]. – 3-е издание, исправленное. – Москва : Издательский центр "Академия", 2014. – 256 с. – ISBN 978-5-4468-0407-8. – EDN ZCDQVV.
10. Hilgers M. The exhaust system / M. Hilgers // The diesel engine. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2025. – С. 41-53. – DOI 10.1007/978-3-662-70902-3_6.
11. A Comparative Study of the Velocity Profiles in Automotive Exhaust Manifolds / K. S. Shaffee, binti Mohd Noor, M. S. Omar [et al.] // Progress in Engineering Technology VI. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2025. – P. 115-122. – DOI 10.1007/978-3-031-81517-1_14

Reference

1. Ivanov I.E., Ereshchenko V.E. *Gazovaya dinamika* (Gas dynamics), Moscow, MADI, 2009, 89 p.
2. Morozov K.A., Chernyak B.Yu., Sinelnikov N.I., ed. Stechkin B.S. *Osobennosti rabochikh protsessov vysokooborotnykh karbyuratornykh dvigatelej* (Features of the operating processes of high-speed carburetor engines), Moscow, Mashinostroenie, 1971, 100 p.
3. Abramovich G.N. *Prikladnaya gazovaya dinamika* (Applied gas dynamics), Moscow, Nauka, 1991, Vol. 1, 597 p., ISBN 5-02-014015-5.

4. Bell A. Graham. Performance Tuning In Theory & Practice (4 Stroke Engines), USA, Haynes, 1981, pp. 110-115.
5. Latheesh V.M., Parthasarathy P, Baskaran V., Karthikeyan S. Design and CFD analysis of intake port and exhaust port for a 4 valve cylinder head engine, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2018, vol. 310, no. 1, p. 012122, doi 10.1088/1757-899X/310/1/012122.
6. Clenci A.C., Iorga-Siman V., Deligant M., Podevin P. A CFD (computational fluid dynamics) study on the effects of operating an engine with low intake valve lift at idle corresponding speed, *Energy*, 2014, vol. 71, pp. 202-217, DOI 10.1016/j.energy.2014.04.069.
7. Ahmed S., Rottengruber H., Full M. Hybrid model for exhaust systems in vehicle thermal management simulations. *Automot. Engine Technol.* 2022, vol. 7, no. 1-2, pp. 115-136, doi 10.1007/s41104-022-00104-w.
8. Idel'chik I.E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* (Handbook of Hydraulic Resistances) Moscow, Mashinostroenie, 1992. 672 p. ISBN 5-217-00393-6.
9. Shatrov M.G., Alexeev I.V., Bogdanov S.N., Gorshkov Yu.V., Ereschenko V.E., Ivanov I.E., Prishvin S.A., Safronov P.V. *Avtomobil'nye dvigateli* (Car engines) Moscow, Academia, 2014, 256 p., ISBN 978-5-4468-0407-8.
10. Hilgers M. The Exhaust System, The Diesel Engine, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2025, pp. 41-53, doi 10.1007/978-3-662-70902-3_6.
11. Shaffee K.S., binti Mohd Noor A.N., Omar M.S., Shamsuddin K.A., bin Mohamed Soid S.N., bin Abd. Azid I. A Comparative Study of the Velocity Profiles in Automotive Exhaust Manifolds, *Progress in Engineering Technology VI*, Cham, Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 115-122, doi 10.1007/978-3-031-81517-1_14.

Рецензент: В.В. Синявский, канд. техн. наук, доцент, МАДИ

Информация об авторах

Савастенко Э. А. – канд. техн. наук, доц., МАДИ, Москва;

Стряпунин А. С. – аспирант, МАДИ, Москва;

Скобелев Р. В. – студент, МАДИ, Москва.

Information about the authors

Savastenko E. A. – Candidate of Sciences (Technical), associate professor, MADI, Moscow;

Stryapunin A. S. – Postgraduate, MADI, Moscow;

Skobelev Roman V. – student, MADI, Moscow.

Статья поступила в редакцию 30.04.2026; одобрена после рецензирования 28.05.2026; принята к публикации 30.06.2026.

The article was submitted 30.04.2026; approved after reviewing 28.05.2026; accepted for publication 30.06.2026.