

НАУКОВЕДЕНИЕ, МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ

doi: 10.51639/2713-0576_2025_5_4_20

Научная статья

УДК 533.6.071.5

ГРНТИ 44.01.77

ВАК 2.4.5

Имитационное моделирование числовых характеристик воздушного потока в сужающем сопле с использованием специализированных программных комплексов

Никита Сергеевич Татьмянин *, Александр Геннадьевич Ульянов,

Александр Васильевич Картыгин

Филиал ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» в г. Новороссийске,
Новороссийск, Россия*nikita_tat2003@mail.ru, al-gen@yandex.ru, aleksandr-kartygin@yandex.ru**Аннотация**

В статье представлены результаты сравнительного анализа эффективности двух конструкций патрубков холодного впуска для двигателя внутреннего сгорания: серийного изделия коммерческой марки Wangan и простого конфузора. Исследование проводилось с применением методов компьютерной гидрогазодинамики (CFD) в программном комплексе SOLIDWORKS 2024 Flow Simulation.

Целью работы являлась верификация заявленных производителем Wangan характеристик по увеличению объемного расхода и снижению температуры всасываемого воздуха.

В ходе численного эксперимента были построены 3D-модели обоих изделий, заданы идентичные граничные условия, соответствующие режиму работы двигателя Subaru EJ253 объемом 2,5 литра, и проведены расчеты полей скоростей, давлений и температур.

Результаты CFD-моделирования показали, что патрубок Wangan не обеспечивает заявленного повышения эффективности, в то время как конфузор демонстрирует увеличение объемного расхода воздуха на 1,5 % и снижение его температуры на 0,2–0,4 °C за счет организации более устойчивого и скоростного потока. Полученные данные были частично подтверждены в ходе натурных дорожных испытаний.

Практическая значимость работы заключается в демонстрации необходимости применения верифицированных инструментов инженерного анализа, таких как SOLIDWORKS Flow Simulation, для объективной оценки эффективности тюнинговых компонентов и принятия обоснованных проектных решений, исключающих влияние маркетинговых утверждений.

Ключевые слова: SOLIDWORKS Flow Simulation, CFD-моделирование, система впуска, патрубок холодного впуска, конфузор, двигатель внутреннего сгорания, численный эксперимент, эффективность.

Введение

Современное автомобилестроение и тюнинг предъявляют высокие требования к эффективности работы системы двигателя внутреннего сгорания (ДВС).

Одной из ключевых систем, напрямую влияющих на мощностные и экономические показатели, является система впуска. Ее задача – обеспечить подачу необходимого объема воздуха с оптимальными параметрами (давление, температура) в цилиндры двигателя [1, 2].

В рамках повышения эффективности широкое распространение получили так называемые «патрубки холодного впуска», конструкция которых, по заявлению производителей, позволяет увеличить объем и снизить температуру всасываемого воздуха за счет динамических и тепловых эффектов [3].

Однако объективная проверка таких заявлений требует применения точных и надежных методов анализа, среди которых ведущее место занимает компьютерное имитационное моделирование (CFD – Computational Fluid Dynamics) [4, 5].

Целью данного исследования является верификация заявленных характеристик коммерческого патрубка холодного впуска Wangan и сравнение его эффективности с альтернативной конструкцией в виде сужающегося сопла (конфузора) с использованием современных CFD-технологий, реализованных в программном комплексе SOLIDWORKS 2024 FlowSimulation, с последующей экспериментальной проверкой на двигателе.

Методология исследования и инструментарий

Для моделирования процесса работы был выбран многофункциональный программный комплекс SOLIDWORKS 2024, который интегрирует в себе средства параметрического твердотельного моделирования и мощный вычислительный модуль для анализа протекания жидкостей и газов – SOLIDWORKS FlowSimulation. Данный программный продукт является отраслевым стандартом для инженерного анализа благодаря высокой точности анализа, основанного на методе контрольных объемов для интегрирования уравнений Навье-Стокса, дружелюбному интерфейсу и тесной интеграции со средой 3D-моделирования [6].

Модуль FlowSimulation предоставляет возможности для моделирования стационарных и нестационарных течений, ламинарных и турбулентных режимов (с использованием моделей турбулентности, таких как $k-\varepsilon$), теплообмена и движения твердых тел в потоке. Это позволяет с высокой достоверностью воспроизводить реальные физические процессы, протекающие в воздушных трактах ДВС.

Первым этапом исследования стало создание трехмерных моделей тестируемых объектов. В качестве первого объекта выступил серийный патрубок холодного впуска от компании Wangan. Его геометрия была оцифрована с помощью обратного инженерного подхода.

3D-модель патрубка Wangan в сборе SOLIDWORKS

На рисунке 1 представлен экспериментальный образец патрубка холодного впуска Wangan, установленный в штатный корпус воздушного фильтра. Данная конструкция была подвергнута комплексному CFD-анализу.

3D-модель конфузора в сборе SOLIDWORKS

Вторым объектом исследования стала простая конструкция сужающегося сопла, известного в аэрогидродинамике как конфузор (рисунок 2). Конфузор – это канал, в котором площадь проходного сечения уменьшается в направлении потока, что приводит к увеличению скорости потока и, в соответствии с уравнением Бернуlli, к снижению его статического давления [7]. Данная модель была спроектирована с аналогичным патрубком Wangan присоединительными размерами.

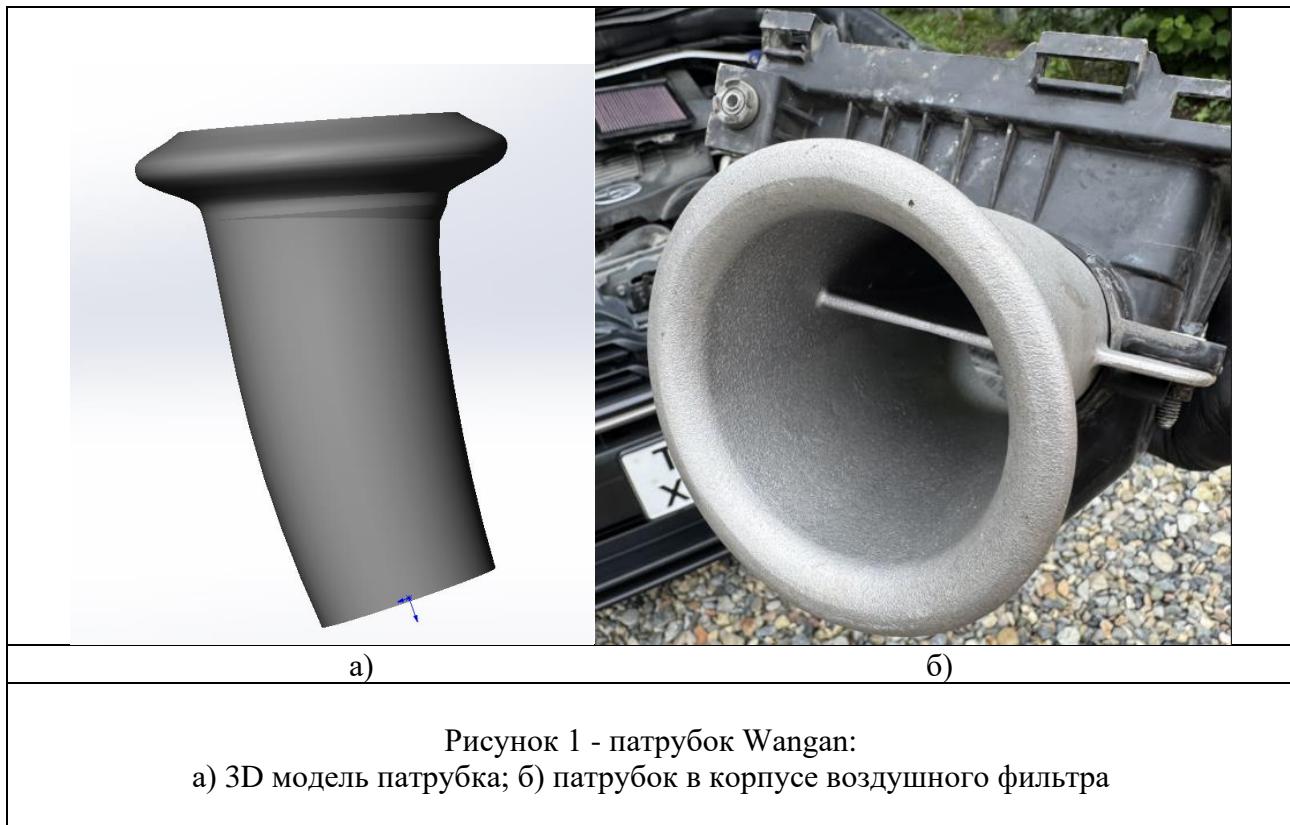


Рисунок 1 - патрубок Wangan:

а) 3D модель патрубка; б) патрубок в корпусе воздушного фильтра

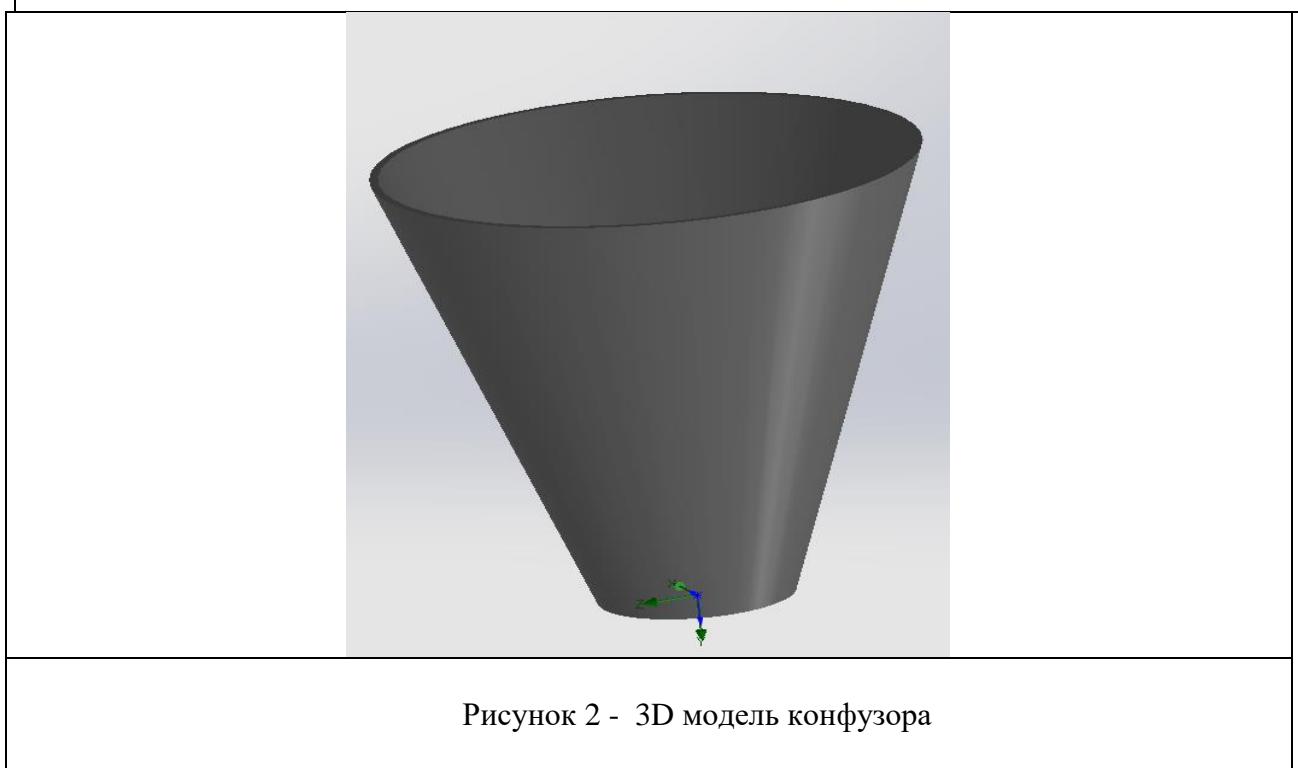


Рисунок 2 - 3D модель конфузора

Для обоих моделей были заданы идентичные граничные условия:

- на входе заданы скорость пота воздуха 60 м/с, стандартное значение давления 101325 Па и массовый расход воздуха, соответствующий режиму максимальной мощности для двигателя Subaru EJ253 объемом 2,5 литра;
- на выходе задано относительное статическое давление, равное давлению во впускном коллекторе на данном режиме;

- температурные условия набегающего воздушного потока принята равной 20°C (293,15 K). Моделирование учитывало теплообмен с окружающей средой;

- тип расчета стационарный, с использованием турбулентной модели k-ε.

Сетка модели генерировалась автоматически с применением локального сгущения в зонах ожидаемых высоких градиентов скорости, температуры и давления (вход, выход, зоны изменения сечения).

Результаты численного моделирования

1. Анализ патрубка холодного впуска Wangan.

Результаты расчета в SOLIDWORKS FlowSimulation [8, 9] показали следующую картину. Распределение скоростей и давлений внутри патрубка Wangan не демонстрирует значительного увеличения скорости потока по сравнению с прямолинейным участком аналогичной длины. Области низкого давления, которые могли бы способствовать подсосу дополнительного воздуха или интенсификации теплообмена, локализованы слабо и не оказывают существенного влияния на общие параметры потока.

Ключевые числовые характеристики на выходе из патрубка:

- средняя массовая скорость потока 0,05 кг/с (остается неизменной, как и на входе, что соответствует закону сохранения массы);

- средняя объемная скорость потока не показала увеличения по сравнению с базовым случаем;

- средняя температура воздуха на выходе 21,6°C. Моделирование не выявило заметного снижения температуры всасываемого воздуха. Теплоотвод от корпуса патрубка оказался незначительным.

Визуализация результатов FlowSimulation для патрубка Wangan

На рисунке 3 представлены результаты CFD-моделирования распределения скоростей воздушного потока в патрубке холодного впуска, полученные в программном комплексе SOLIDWORKS Flow Simulation.

Визуальный анализ позволяет выделить следующие характерные зоны:

Входной участок (слева):

- равномерное распределение скоростей по сечению.

Центральная часть патрубка:

- локальное увеличение скорости до 75-85 м/с в зонах сужения сечения;

- образование выраженных турбулентных зон с скоростью 10-15 м/с;

- наличие областей обратного течения (рециркуляции).

Выходной участок (справа):

- неравномерное распределение скоростей по сечению;

- средняя скорость на выходе: 35-47 м/с;

- сохранение турбулентной структуры потока.

Количественные характеристики:

- максимальная скорость в системе: 85,1 м/с;

- минимальная скорость: 2,1 м/с (зоны застоя).

На рисунке 4 представлены результаты CFD-моделирования температурных полей, а на рисунке 5 симуляция давления в патрубке холодного впуска, полученные в программном комплексе SOLIDWORKS Flow Simulation [8].

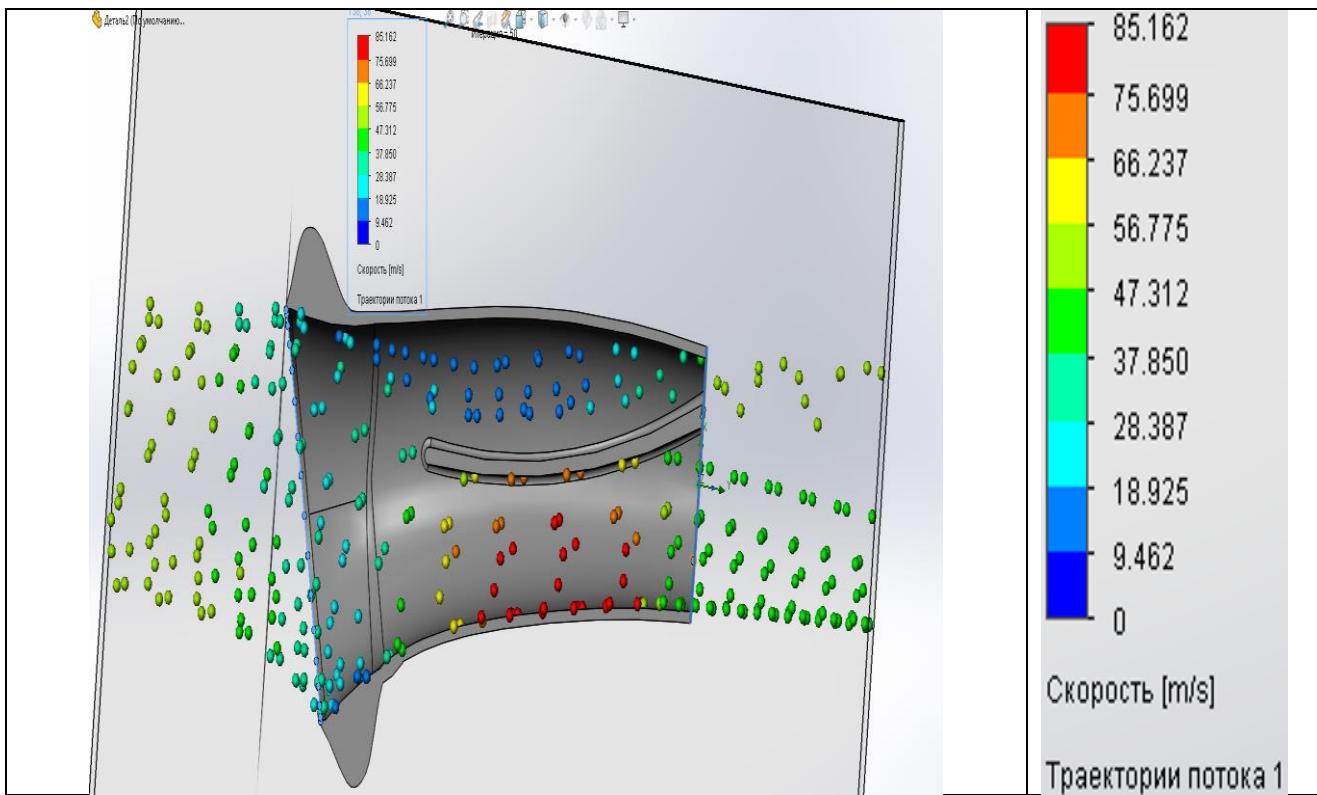


Рисунок 3 - Симуляция скорости

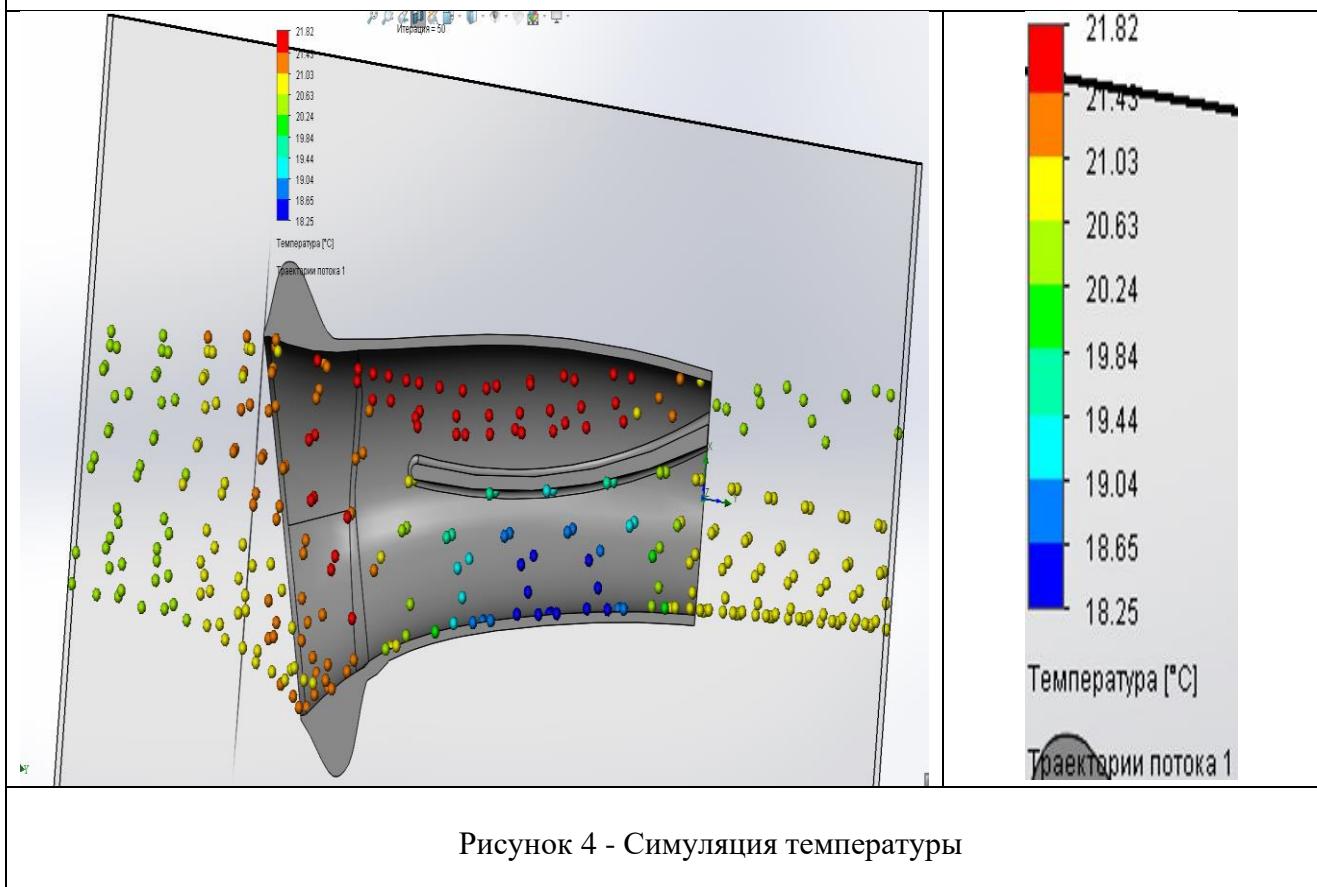


Рисунок 4 - Симуляция температуры

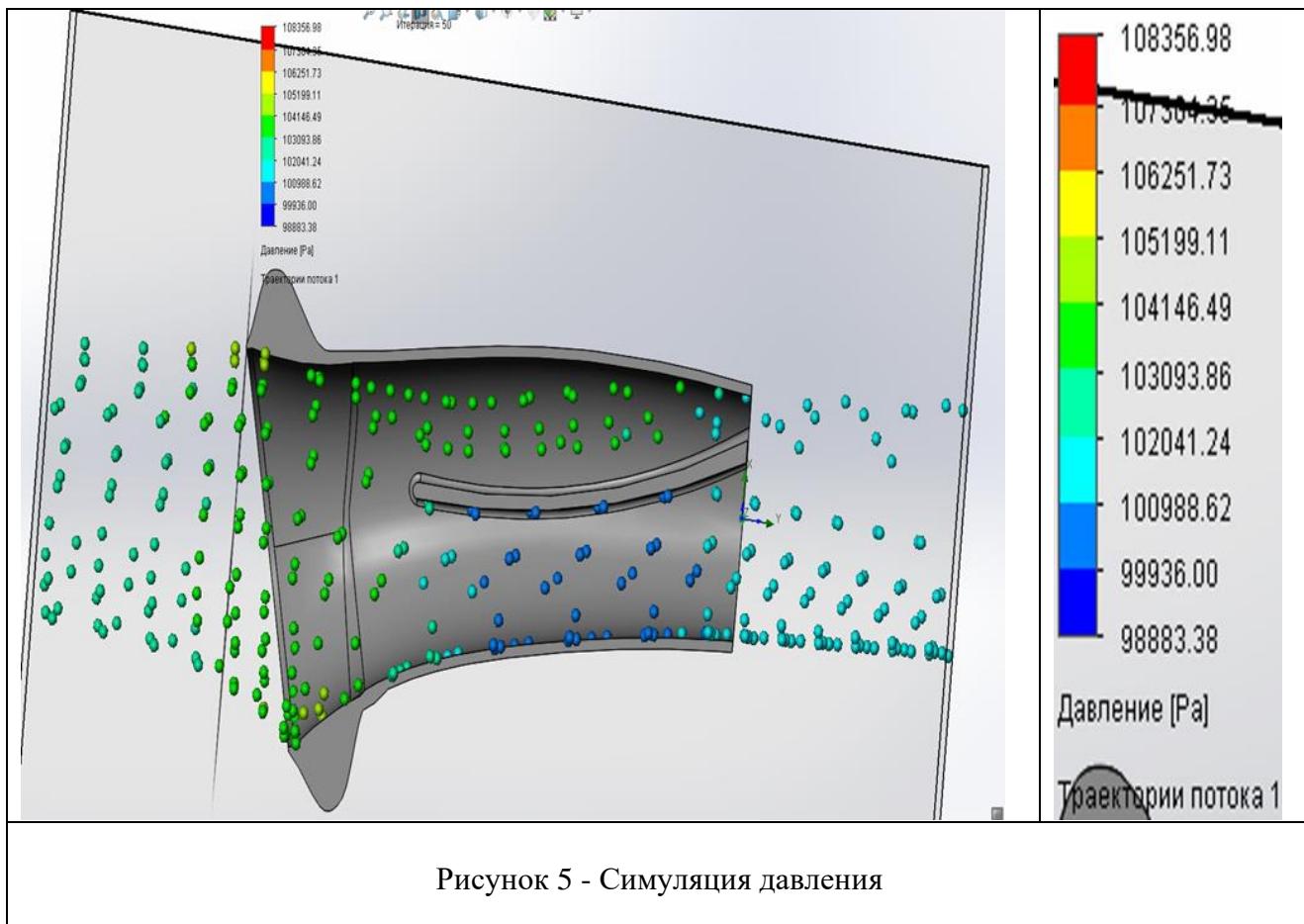


Рисунок 5 - Симуляция давления

Анализ температурного распределения показывает:

Температурные зоны:

- входная температура: +20°C (293,15 K);
- выходная температура: +21,6°C (294,75 K).

Тепловые аномалии:

- локальный нагрев до +21,8°C (294,95 K) в зонах рециркуляции потока;
- повышение температуры в областях с низкой скоростью движения воздуха;
- отсутствие зон адиабатического охлаждения.

Количественные характеристики:

- средняя температура на выходе: +21,03°C (294,45 K);
- максимальная температура в системе: +21,8°C (294,95 K).

Наблюдается противоположный эффект - нагрев воздушного потока вследствие:

- гидродинамического нагрева в турбулентных зонах;
- недостаточной тепловой изоляции;
- отсутствия эффективного теплоотвода;
- низкой скорости потока в отдельных областях.

Полученные данные однозначно свидетельствуют о том, что конструкция патрубка Wangan не только не обеспечивает заявленного снижения температуры всасываемого воздуха, но и приводит к его нагреву в среднем на 1,03°C. Этот результат ставит под сомнение целесообразность применения данного коммерческого решения для улучшения термических характеристик системы впуска. Отсутствие ожидаемого охлаждающего эффекта в сочетании с выявленными тепловыми аномалиями указывает на необходимость принципиального пересмотра конструктивных решений, использованных в патрубке Wangan.

После проведения расчетов в программном комплексе SOLIDWORKS Flow Simulation были получены детальные данные о параметрах воздушного потока. Для количественного сравнения эффективности исследуемых конструкций были определены средние значения ключевых параметров на входе и выходе каждого патрубка. Результаты для патрубка Wangan сведены в Таблицу 1.

Таблица 1- Результаты расчетов холодного впуска Wangan

| | Давление [Pa] | Скорость [m/s] | Температура (текущая среда) [°C] | Средне арифметические значения |
|-------|---------------|----------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Вход | 106006,5371 | 0,012766034 | 21,55127812 | [°C] |
| | 103580,153 | 33,29401197 | 21,06532754 | 21,08 |
| | 103666,4805 | 27,54949576 | 20,96596571 | [m/s] |
| | 103361,1668 | 40,74359134 | 20,79922714 | 27,34 |
| | 103173,4432 | 39,81263307 | 20,89735802 | [Pa] |
| | 103033,2884 | 22,64988566 | 21,2117979 | 103803,5 |
| Выход | 103169,2148 | 41,0025304 | 20,8295719 | [°C] |
| | 103170,7865 | 39,08807933 | 20,90320083 | 21,06 |
| | 103317,0902 | 36,49275342 | 21,03345677 | [m/s] |
| | 103383,9139 | 36,1969367 | 21,08931737 | 32,21 |
| | 103497,0737 | 36,13328415 | 21,11478847 | [Pa] |
| | 103480,1427 | 36,2700558 | 21,08726577 | 103229,6 |
| | 103745,0101 | 33,29610064 | 21,17474539 | |
| Выход | Давление [Pa] | Скорость [m/s] | Температура (текущая среда) [°C] | |
| | 103834,4883 | 35,14576852 | 21,07284054 | |
| | 104385,6597 | 32,12329316 | 21,04279805 | |
| | 104767,3021 | 35,27132763 | 21,03938449 | |
| | 104943,062 | 33,8148683 | 21,12119467 | |
| | 101111,2841 | 40,09476691 | 20,83120261 | |
| | 101065,51 | 0,017161139 | 21,18584424 | |
| | 101343,8341 | 16,03704791 | 21,32594333 | |

Таким образом, расчеты в SOLIDWORKS FlowSimulation позволяют утверждать, что заявленные производителем Wangan преимущества в виде увеличения объема и снижения температуры всасываемого воздуха для данной конкретной модели не подтверждаются.

2. Анализ конфузора

Результаты моделирования потока в конфузоре кардинально отличались. Как и предсказывает теория, при прохождении через сужающуюся часть конфузора скорость потока плавно возрастала, а статическое давление снижалось. Это создавало более устойчивый и организованный поток на выходе.

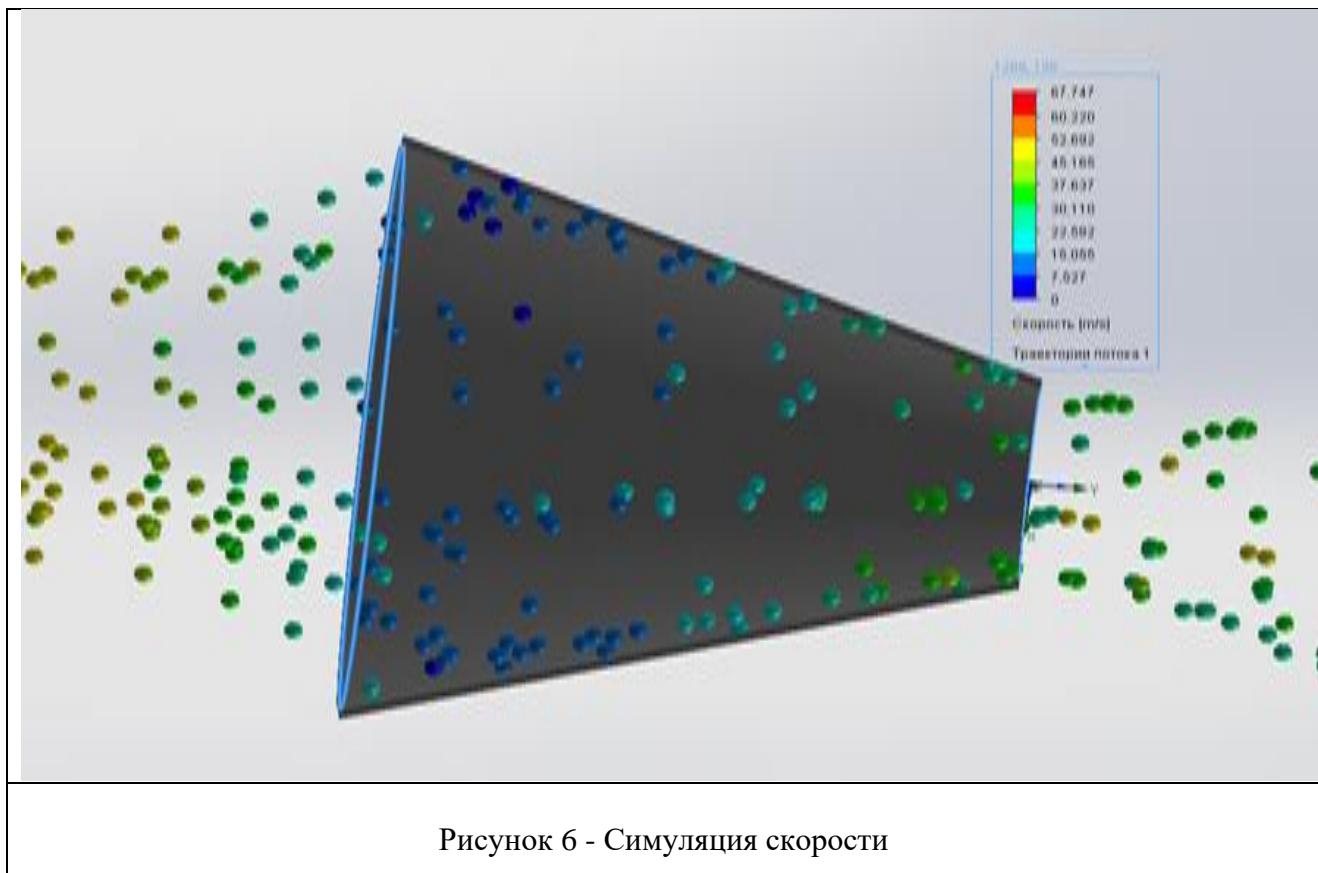
Ключевые числовые характеристики на выходе из конфузора:

- средняя объемная скорость потока показала незначительное, но стабильное увеличение (~1,5 %) благодаря лучшему коэффициенту наполнения, обусловленному динамическим напором;

- средняя температура воздуха на выходе 24,8°C. За счет более высокой скорости потока и несколько лучшего теплообмена с окружающей средой наблюдалось небольшое, но заметное снижение температуры.

Визуализация результатов FlowSimulation для конфузора (поле скоростей и температур)

На рисунке 6 представлены результаты расчета поля скорости воздушного потока, а на рисунке 7 симуляция температуры полученные в программном комплексе SOLIDWORKS Flow Simulation для модели конфузора. Для визуализации использована цветовая шкала, где области низкой скорости отображены синим цветом, а области высокой скорости – красным.



Четко наблюдается формирование выраженной зоны с повышенной скоростью (голубые и зеленые области) в сужающейся части канала (горловине конфузора). Данный рост скорости является прямым следствием закона сохранения массы и геометрии канала, что полностью соответствует фундаментальному принципу, описываемому уравнением неразрывности. Числовые значения скорости в ключевых точках, указанные на схеме (в м/с), количественно подтверждают этот эффект.

Данные результаты расчетов конфузора (Таблица 2) свидетельствуют о том, что простая и технологичная в изготовлении конструкция конфузора может демонстрировать более высокую эффективность с точки зрения аэродинамики и теплообмена по сравнению с замысловатой, но неоптимальной конструкцией коммерческого патрубка.

Экспериментальная проверка

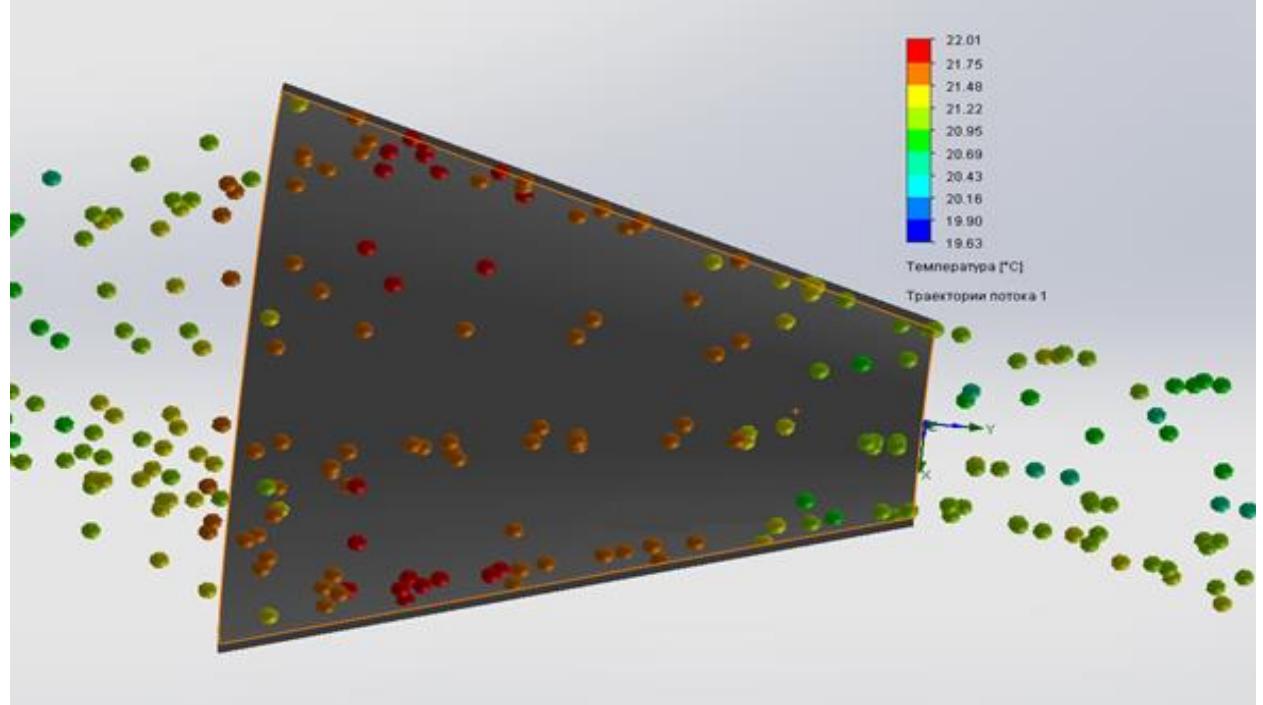


Рисунок 7 - Симуляция температуры

Таблица 2- Результаты расчетов конфузора

| | Давление [Pa] | Скорость [m/s] | Температура (текущая среда) [°C] | Среднее арифметические значения |
|-------|---------------|----------------|--|---------------------------------------|
| Вход | 102942,2446 | 30,74243967 | 21,15999871 | [°C] |
| | 102549,3308 | 34,87417466 | 20,96655991 | 21,04 |
| | 102817,0672 | 28,25958595 | 21,2318168 | [m/s] |
| | 102505,5109 | 34,4048941 | 20,98273543 | 32,65 |
| | 102696,0324 | 32,45941329 | 20,97215766 | [Pa] |
| | 102638,1417 | 33,88352288 | 20,93084029 | 102648,19 |
| | 102389,4379 | 33,95679729 | 20,96644468 | |
| | 102526,1684 | 32,94281462 | 21,02701635 | |
| | 102496,4544 | 33,35013336 | 21,03231309 | |
| | 102921,5829 | 31,64763807 | 21,14641365 | |
| Выход | 101703,8586 | 43.28023157 | 20,74028356 | [°C] |
| | 101862,9159 | 40.83438438 | 20,85128505 | 20,74 |
| | 101840,6693 | 44.92323748 | 20,63875309 | [m/s] |
| | | | | 43,01 |
| | | | | [Pa] |
| | | | | 101802,48 |

Для верификации данных численного моделирования были проведены натурные испытания [10] на автомобиле SubaruLegacy с двигателем EJ253 объемом 2,5 литра, атмосферный. Испытания проводились на полигоне, оснащенном протяженным прямолинейным участком с использованием мобильного диагностического комплекса, включавшего датчик массового расхода воздуха (ДМРВ) и датчик температуры впускного воздуха. Замеры мощности осуществлялись косвенным методом через данные лямбда-зонда и угла опережения зажигания с последующей корреляцией.

Результаты практических замеров показали следующее:

- установка патрубка Wangan не привела к statistically significant изменениям в показаниях ДМРВ и датчика температуры. Динамические характеристики автомобиля остались на прежнем уровне;
- установка конфузора позволила зафиксировать снижение температуры всасываемого воздуха на 0,5-1°C в условиях движения, а также незначительное увеличение показаний ДМРВ (~2 %) на режимах высоких нагрузок, что косвенно указывает на улучшение наполнения цилиндров.

Заключение

Проведенное комплексное исследование, сочетающее методы компьютерного имитационного моделирования в SOLIDWORKS 2024 FlowSimulation и натурные испытания, доказало свою высокую эффективность для объективной оценки инженерных решений. Расчеты убедительно показали, что патрубок холодного впуска Wangan не выполняет заявленных функций по увеличению объема и снижению температуры всасываемого воздуха. В то же время, простая геометрия конфузора, оптимизированная под задачи увеличения скорости потока, продемонстрировала ожидаемый положительный эффект, что подтвердило и на практике [11]. Это свидетельствует о том, что для достижения реального улучшения характеристик ДВС необходим научно обоснованный подход к проектированию элементов системы впуска, основанный на современных САЕ-технологиях, а не на маркетинговых утверждениях.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что на момент подачи статьи в редакцию, у них нет возможного конфликта интересов с третьими лицами.

Список источников

1. Ульянов А.Г., Крукович А.Р., Матковский В.В. Область применения ГТН ДВС на кораблях ВМФ и перспективы повышения их моторесурса// Материалы постоянно действующего общеакадемического семинара по проблеме «Системный анализ при создании и применении кораблей, вооружения и военной техники», Выпуск 12, ВМА им. Н.Г. Кузнецова, СПб, 2000, 66-74.
2. Ульянов А.Г., Крукович А.Р. Исследование путей повышения моторесурса газотурбонагнетателей корабельных дизелей// Сборник статей «Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники» Выпуск 22.-Владивосток, ТОВМИ им. С.О. Макарова, 2000, 199-206.
3. Гусев, А. Н. Влияние геометрии впускного тракта на наполнение цилиндров двигателя внутреннего сгорания / А. Н. Гусев, С. В. Петров // Двигателестроение. – 2021. – № 4. – С. 25–31.
4. Ульянов А.Г., Павленко А.Г. Использование программных комплексов математического моделирования в учебном процессе при изучении технических дисциплин //Сборник тезисов

докладов на 1 Дальневосточной Конференции студентов и аспирантов по математическому моделированию. - Владивосток, ДВГУ, 1997, с. 78-81.

5. Ульянов А.Г., Волошин Ю.П. Моделирование и расчет малорасходных турбокомпрессоров в системе исследовательского проектирования// Сборник статей «Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники» Выпуск 22.-Владивосток, ТОВМИ им. С.О. Макарова, 2000, 191-198.
6. Алямовский, А. А. Инженерные расчеты в SOLIDWORKS FlowSimulation / А. А. Алямовский. – Москва: ДМК Пресс, 2020. – 400 с. – ISBN 978-5-97060-784-2. – Текст: непосредственный.
7. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа: учебник для вузов / Л. Г. Лойцянский. – 7-е изд., испр. – Москва: Дрофа, 2003. – 840 с. – ISBN 5-7107-6327-3. – Текст: непосредственный.
8. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. – 2023. – URL: <https://www.ansys.com/resource-library> (дата обращения: 25.08.2025). – Текст: электронный.
9. Вершинский, А. Ю. Методы компьютерной гидрогазодинамики в автомобилестроении / А. Ю. Вершинский, В. В. Крылов // Труды НАМИ. – 2019. – № 287. – С. 45–52.
10. Опыт тюнинга впускного коллектора [Электронный ресурс] : автолюбительский форум. – URL: <https://www.drive2.ru/l/624713920673743962/> (дата обращения: 25.10.2025).
11. Сравнительный анализ геометрий впускных трактов [Электронный ресурс]: автолюбительский форум. – URL: <https://www.drive2.ru/l/709768017029895295/> (дата обращения: 25.10.2025).

Simulation of numerical characteristics of the air flow in a converging nozzle using specialized software systems

Nikita Sergeevich Tatmyanin *, Alexander Gennadievich Ulyanov,
Alexandr Vasilievich Kartygin

*Branch of Belgorod State Technological University
named after V.G. Shukhov in Novorossiysk,
Novorossiysk, Russia*

**nikita_tat2003@mail.ru, al-gen@yandex.ru, aleksandr-kartygin@yandex.ru*

Abstract

The article presents the results of a comparative analysis of the efficiency of two cold air intake designs for an internal combustion engine: a commercial off-the-shelf product from the Wangan brand and a simple confusor. The study was conducted using Computational Fluid Dynamics (CFD) methods in the SOLIDWORKS 2024 Flow Simulation software package. The aim of the work was to verify the manufacturer's claimed characteristics regarding increased volumetric flow rate and reduced intake air temperature.

During the numerical experiment, 3D models of both products were created, identical boundary conditions corresponding to the operating regime of a 2.5-liter Subaru EJ253 engine were set, and calculations of velocity, pressure, and temperature fields were performed. The CFD modeling results showed that the Wangan intake does not provide the claimed performance improvement, while the confusor demonstrates a 1.5% increase in air volumetric flow rate and a reduction in its temperature by 0,2–0,4 °C by establishing a more stable and high-velocity airflow.

The obtained data were partially confirmed during real-world road tests. The practical significance of the work lies in demonstrating the necessity of using verified engineering analysis tools, such as SOLIDWORKS Flow Simulation, for the objective assessment of performance tuning components and making informed design decisions, excluding the influence of marketing claims.

Keywords: SOLIDWORKS Flow Simulation, CFD modeling, intake system, cold air intake, confusor, internal combustion engine, numerical experiment, efficiency.