



# МЕХАНИКА МОБИЛЬНЫХ МАШИН

УДК 629.3

**И.А. ТРУСЕВИЧ**, канд. техн. наук  
инженер-конструктор 1-й категории<sup>1</sup>  
младший научный сотрудник<sup>2</sup>  
доцент кафедры гусеничных машин и прикладной механики<sup>3</sup>  
E-mail: trival@bk.ru

**С.В. АБДУЛОВ**, канд. техн. наук  
исполнительный директор – главный конструктор<sup>1</sup>  
доцент кафедры гусеничных машин и прикладной механики<sup>3</sup>  
E-mail: sincora2004@mail.ru

**И.А. ТАРАТОРКИН**, д-р техн. наук, проф.  
главный научный сотрудник, заведующий отделом механики транспортных машин<sup>2</sup>  
профессор кафедры гусеничных машин и прикладной механики<sup>3</sup>  
E-mail: ig\_tar@mail.ru

**В.Б. ДЕРЖАНСКИЙ**, д-р техн. наук, проф.  
ведущий научный сотрудник<sup>2</sup>  
заведующий кафедрой гусеничных машин и прикладной механики<sup>3</sup>  
E-mail: dvb\_47@mail.ru

<sup>1</sup>АО «Специальное конструкторское бюро машиностроения», г. Курган, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>3</sup>Курганский государственный университет, г. Курган, Российская Федерация

Поступила в редакцию 23.10.2024.

## **СРАВНИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОЙ КОНСТРУКЦИИ СИСТЕМ ПИТАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ВОЗДУХОМ И ВЫХЛОПА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ С ЭЖЕКЦИОННЫМ ПЫЛЕУДАЛЕНИЕМ**

*В рамках проведения исследования выполняется литературный анализ, посвященный различным вариантам повышения эффективности систем питания двигателя воздухом и выхлопа отработавших газов. Особое внимание уделяется применению программных продуктов для определения сопротивления трасс систем питания двигателя воздухом и выхлопа отработавших газов, методов и подходов по его снижению и использованию выхлопных газов для очищения пылесборника. В работе приводятся обобщенные требования к системам очистки воздуха для силовых дизельных установок согласно отраслевому стандарту и к системам питания воздухом и выхлопа отработавших газов для дизельного двигателя, рассматриваемого в данной работе, согласно техническим условиям. В соответствии с задачами исследования представлено описание эксперимента по определению сопротивления воздухоочистителя без кассет и с кассетами, перечислены применяемые для симуляционных расчетов модели и методы, обеспечивающие сходимость численного решения и реализованные в многофункциональном программном продукте для мультифизического моделирования STAR-CCM+, приведены исходные данные, граничные и начальные условия, выполнена верификация разработанных моделей, установившая расхождение между экспериментальными показателями и расчетными результатами < 5 %, проведен сравнительный анализ системы питания двигателя*

воздухом и системы выхлопа отработавших газов базовой и перспективной конструкции. Полученные научно-технические результаты подтверждают возможность осуществления эжекционного отсоса пыли из пылесборника воздухоочистителя с коэффициентом отсоса пыли 17 % (должен быть не менее 12 %) на режиме максимальной мощности, что потребует проведения отдельного исследования, и определяют основные направления дальнейших работ. Для базовой конструкции приоритетным является доработка системы питания двигателя воздухом с целью снижения сопротивления, существенно превышающего требуемую величину. Установка патрубков циклонов под оптимальными углами относительно потока для обеспечения равномерного распределения массового расхода представляется наиболее перспективным решением.

**Ключевые слова:** CFD, система питания двигателя воздухом, воздухоочиститель, система пылеудаления, эжекционный отсос пыли, система выхлопа отработавших газов, дизельный двигатель, симуляция, верификация, прогнозирование

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-1-70-5-16>

**Введение.** Важным направлением текущих и перспективных работ в области машиностроения является улучшение эксплуатационных характеристик двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Помимо создания более надежных, компактных и эффективных образцов, позволяющих существенно повысить топливную экономичность и снизить объем вредных выбросов, а также применения новых технологий, важным направлением исследований является совершенствование многочисленных систем, обеспечивающих функционирование ДВС в различных условиях эксплуатации, оказывающих комплексное влияние на совокупность показателей транспортного средства в целом [1].

Система охлаждения двигателя является широко изученной областью, где основные направления повышения эффективности известны и активно применяются на практике — замена теплоносителя системы охлаждения и повышение интенсивности циркуляции, оптимизация конструкции и увеличение частоты вращения вентилятора [2–3]. Аналогичная ситуация свойственна системам пуска, топливоподдачи и смазки, где большинство возникающих задач носят исключительно компоновочный характер, а перспективные исследования направлены на внедрение более совершенных электронных систем управления.

Система питания двигателя воздухом, помимо своей основной функции, включает в себя воздухоочиститель и позволяет снизить абразивный износ цилиндро-поршневой группы и механизма газораспределения, являющийся основной причиной выхода современных ДВС из строя, что особенно актуально для вездеходов, строительных и сельскохозяйственных машин, работающих в условиях высокой запыленности. При этом из-за сложности процесса воздухоочистки новые конструкции преимущественно испытывают в лабораторных условиях и доводят экспериментальным путем [4–6]. Однако появление программных продуктов на основе методов вычислительной аэродинамики позволяет решать данные задачи на качественно новом уровне [7–20].

Система выхлопа отработавших газов оказывает существенное влияние на коэффициент наполнения, а, следовательно, и на величины крутящего момента и мощности, поэтому при проектировании узла необходимо стремиться к минимизации сопротивления трассы, что осложняется требованиями по обеспечению норм выбросов и уровня шума [21–33]. Среди образцов специальной техники нашло широкое распространение использование выхлопных газов для очищения пылесборников [34–38].

Научной целью данной работы является разработка комплексной модели для прогнозирования и совершенствования функционирования системы питания двигателя воздухом и системы выхлопа отработавших газов, в том числе с учетом реализации эжекционного отсоса пыли из пылесборника воздухоочистителя.

Задачами данной научно-исследовательской работы является:

- экспериментальное определение сопротивления воздухоочистителя без кассет и с кассетами в лабораторных условиях;
- разработка симуляционной модели воздухоочистителя, верификация на основе сопоставления расчетных и экспериментальных данных;
- проведение сравнительного анализа системы питания двигателя воздухом и системы выхлопа отработавших газов базовой и перспективной конструкции на основе серии симуляционных расчетов;
- предложение комплекса мер по совершенствованию рассматриваемых систем.

Помимо вышперечисленного, в рамках данной работы для базовой и перспективной конструкции оценивается распределение массовых расходов через каждый из циклонов, входящий в воздухоочиститель.

Согласно отраслевому стандарту на системы очистки воздуха для силовых дизельных установок коэффициент отсоса должен быть не менее 12 % на режимах работы двигателя, соответствующих максимальной (100 %) и 80 % мощности и оборотам, и не менее 5 % на режимах холостых

оборотов двигателя, сопротивление воздухоочистителя должно быть не более 11 770 Па, а сопротивление трассы подвода воздуха к воздухоочистителю должно быть не более 981 Па.

Согласно техническим условиям на дизельный двигатель, рассматриваемый в данной работе, максимальное разрежение (сопротивление), создаваемое системой питания двигателя воздухом, на входе в компрессор на режиме максимальной мощности составляет не более 13 200 Па, противодавление (сопротивление), создаваемое системой выхлопа отработавших газов, на выходе из турбины дизеля на режиме максимальной мощности — не более 14 700 Па.

**Исходные данные и условия моделирования.**

Расчетное исследование осуществлялось в многофункциональном программном продукте для мультифизического моделирования STAR-CCM+. Все трассы смоделированы в соответствии с кон-

структорской документацией и проработками перспективной конструкции, без учета допусков и отклонений.

На рисунке 1 представлена расчетная модель базовой конструкции, на рисунке 2 — перспективной. Расчетные модели трасс, входящих в базовую и перспективную конструкции, представлены на рисунке 3. Для рассматриваемых в рамках исследования случаев трасса системы питания двигателя воздухом без воздухоочистителя идентична.

Используемые в расчетах дымовые газы, входящие в расчете перспективной конструкции в состав многокомпонентной смеси, задавались в соответствии с начальными условиями для трех расчетных режимов: режим холостых оборотов, 80-процентной и максимальной (100 %) мощности и оборотов двигателя. Параметры воздуха и дымовых газов при 80-процентной и максимальной мощности приведены в таблице 1.



Рисунок 1 — Расчетная модель базовой системы питания двигателя воздухом  
Figure 1 — Calculation model of the basic engine air supply system

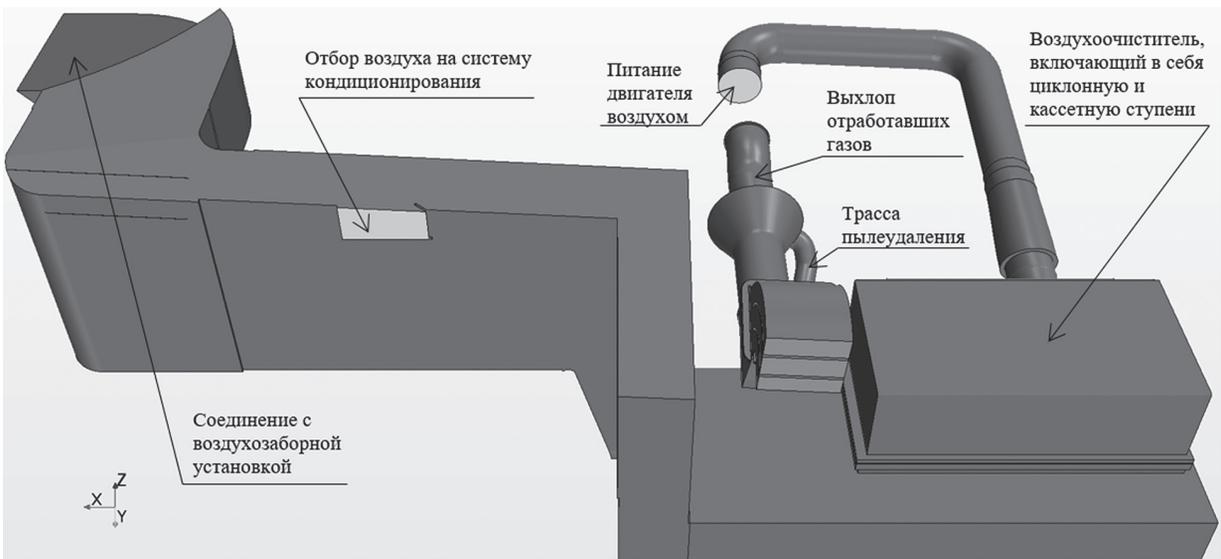
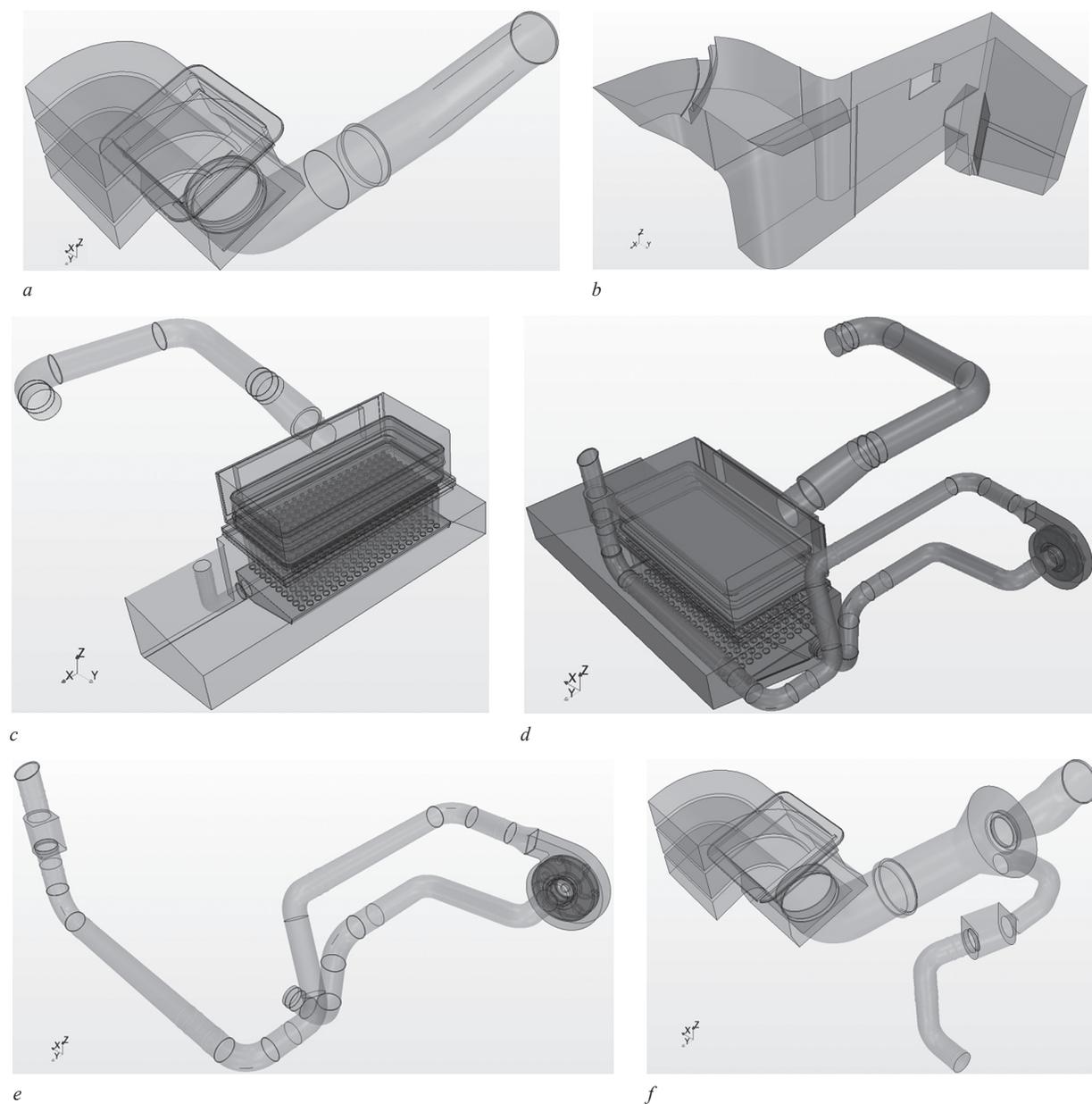


Рисунок 2 — Расчетная модель перспективной конструкции  
Figure 2 — Calculation model of an advanced design



**Рисунок 3** — Расчетные модели: *a* — базовой трассы системы выхлопа обработавших газов; *b* — системы питания двигателя воздухом без воздухоочистителя; *c* — трассы воздухоочистителя перспективной конструкции; *d* — трассы воздухоочистителя базовой конструкции; *e* — трассы пылеудаления с вентилятором отсоса пыли; *f* — трассы системы выхлопа обработавших газов с эжекционным пылеудалением

**Figure 3** — Calculation models: *a* — basic exhaust system route; *b* — engine air supply system without air cleaner; *c* — route of air cleaner of the advanced design; *d* — route of air cleaner of basic design; *e* — dust extraction route with dust extraction fan; *f* — exhaust system route with induction dust extraction

**Таблица 1** — Исходные данные для режима 80 и 100 % мощности

**Table 1** — Initial data for 80 and 100 % power mode

Наименование	Воздух	Дымовые газы	
Начальная температура $t$ , К	293	846	923
Динамический коэффициент вязкости $\mu \cdot 10^6$ , Па·с	18,1	37,063	39,3
Молекулярная масса $M$ , кг/кмоль	29,9664	90,04	
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1,205	0,419	0,384
Коэффициент теплопроводности $\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·К)	2,59	7,188	7,845
Удельная теплоемкость $c_p$ , Дж/(кг·К)	1005	1206	1227

Данные для моделирования на режиме холостых оборотов (массовые расходы, температура) получены в начале предварительных испытаний и предоставлены производителем для частоты вращения коленчатого вала двигателя от 900 до 2300 об/мин. В таблице 2 приведены параметры дымовых газов на холостых оборотах.

В процессе расчета перспективной конструкции определялись и уточнялись значения параметров многокомпонентной газовой смеси вплоть до установившегося режима. Динамического коэффициента вязкости, коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости — для взвешенной по массе смеси; молекулярной массы — для смеси; плотности — для объемно-взвешенной смеси.

Таблица 2 — Исходные данные для режима холостых оборотов  
Table 2 — Initial data for idle speed mode

Наименование	Дымовые газы		
	Частота вращения коленчатого вала двигателя $n$ , об/мин	900	1100
Начальная температура $t$ , К	480	503	530
Динамический коэффициент вязкости $\mu \cdot 10^6$ , Па·с	24,759	25,610	26,609
Молекулярная масса $M$ , кг/кмоль	90,04		
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	0,739	0,709	0,673
Коэффициент теплопроводности $\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·К)	4,068	4,259	4,483
Удельная теплоемкость $c_p$ , Дж/(кг·К)	1099	1105	1111

Расчетная область была разбита на тетраэдральные элементы, также применялись призматические слои и объемный контроль, базовый размер от 50 до 5 мм, относительный минимум размера — 20 %, число призматических слоев — 5, а общее число ячеек  $\approx 11$  млн. Выбор типа и параметров сетки обусловлен серией предварительных сравнительных расчетов для обеспечения необходимой сходимости и минимизации требуемого расчетного времени. Исходное качество сетки определялось по минимуму качества грани (0,51), минимальному качеству ячейки (1,0E-8), минимальному изменению объема (1,0E-10), минимуму смежных ячеек, минимальной площади присоединенной грани (0,0 м<sup>2</sup>) и минимуму объема (0,0 м<sup>3</sup>) и подтвердило удовлетворительные показатели — несоответствующих требованиям ячеек не найдено.

Для моделирования использовался стационарный режим, сжимаемость среды не учитывалась, применялся решатель разделенного потока. В качестве метода определения связи давление–скорость был выбран алгоритм SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations). Турбулентность потока описывалась моделью  $k-\epsilon$ . Используемые типы границ — стагнация на входе, давление на выходе, массовый расход на входе, внутренний интерфейс, стенка. Инициализация решения выполнялась встроенным инструментом используемого программного продукта.

Анализ сходимости выполнялся как посредством встроенных инструментов используемого программного продукта, так и оценки изменения

величин давлений и массовых расходов, и показал достаточную степень достоверности и стабильности. Невязки по итерациям менее 0,0001.

Молекулярная диффузность описывалась числом Шмидта и определялась по формуле:

$$S_c = \frac{\nu}{D_{im}}, \quad (1)$$

где  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $D_{im}$  — молекулярная диффузность компонента  $i$  смеси.

Турбулентное число Прандтля определялось по формуле:

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}. \quad (2)$$

Граничные условия для расчета базовой конструкции приведены в таблице 3, для перспективной конструкции в таблицах 4 — для режима 80-процентной и максимальной мощности и 5 — для режима холостых оборотов. Во всех расчетных случаях изначально весь объем занят воздухом при температуре 293 К (20 °С). Поступление дымовых газов, температура которых зависит от рассматриваемого режима, осуществляется через вход системы выхлопа отработавших газов, для всех остальных границ на всех расчетных режимах задан воздух при температуре 293 К.

В связи с отсутствием сообщения между трассами системы питания двигателя воздухом и системы выхлопа отработавших газов в базовой конструкции расчеты для каждой из них выполнялись отдельно. При этом в рамках расчета системы пи-

Таблица 3 — Граничные условия расчета базовой конструкции  
Table 3 — Calculation boundary conditions for the basic design

Наименование	Режим холостых оборотов	Режим 80 % мощности	Режим максимальной мощности
Частота вращения коленчатого вала двигателя, об/мин	900	1680	2100
Частота вращения крыльчатки вентилятора, об/мин	5172	9655	12069
Давление на входе системы питания двигателя воздухом, Па	101 325		
Массовый расход на систему кондиционирования, кг/с	0,066		
Массовый расход на выходе системы питания двигателя воздухом, кг/с	0,113	0,749	0,960

Таблица 4 — Граничные условия расчета для режима 80 и 100 % мощности  
Table 4 — Calculation boundary conditions for 80 and 100 % power mode

Наименование	Режим 80 % мощности	Режим максимальной мощности
Давление на входе системы питания двигателя воздухом, Па	101 325	
Массовый расход на систему кондиционирования, кг/с	0,066	
Массовый расход на выходе системы питания двигателя воздухом, кг/с	0,749	0,960
Массовый расход на входе системы выхлопа отработавших газов, кг/с	0,782	0,996
Давление на выходе системы выхлопа отработавших газов, Па	101 325	

Таблица 5 — Граничные условия расчета для режима холостых оборотов  
Table 5 — Calculation boundary conditions for idle speed mode

Наименование	Режим холостых оборотов		
Частота вращения коленчатого вала двигателя, об/мин	900	1100	1300
Давление на входе системы питания двигателя воздухом, Па	101 325		
Массовый расход на систему кондиционирования, кг/с	0,066		
Массовый расход на выходе системы питания двигателя воздухом, кг/с	0,113	0,138	0,165
Массовый расход на входе системы выхлопа отработавших газов, кг/с	0,115	0,140	0,168
Давление на выходе системы выхлопа отработавших газов, Па	101 325		

тания двигателя воздухом вместо многокомпонентной газовой смеси использовалась модель материала — газ, а определение сопротивления системы выхлопа отработавших газов осуществлялось только на режиме максимальной мощности.

В расчете базовой конструкции для симуляции работы вентилятора отсоса пыли использовалась стационарная модель движущейся системы координат, позволяющая с высокой достоверностью описывать его поведение, что подтвердилось сравнением характеристик, полученных расчетным и экспериментальным путем.

Верификация расчетной модели проводилась путем сравнения показателей сопротивления воздухоочистителя, полученных расчетным и экспериментальным путем.

Испытания проводились в АО «ВНИИТранс-маш» в лабораторных условиях на специализированном стенде с целью определения коэффициента пропуска пыли и сопротивления воздухоочистителя без кассет и с кассетами. Для этого при проведении экспериментального исследования фиксировались перепады давлений и разрежение в мерных точках.

При замере величин сопротивлений часть элементов стенда, необходимых для определения коэффициента пропуска пыли, исключают, а ис-

пользуемая конструкция состоит из воздухоудовки, каналов для подачи-забора воздуха и выполнения замеров, водяных пьезометров и устройства для регулирования расхода воздуха.

Установление расхода на трассах питания двигателя воздухом и пылеудаления осуществлялось методом последовательных приближений до получения заданных, соответствующих режиму максимальной мощности двигателя.

В соответствии с методикой проводилось 4 опыта, а величины сопротивления определялись из замеренных показателей потерь, приведенных к нормальным условиям.

Результаты верификации приведены в таблице 6. При этом важно отметить, что полученные расчетным и экспериментальным путем значения превышают требуемые в технических условиях.

**Результаты моделирования.** Основные результаты серии симуляционных расчетов приведены в таблице 7.

Для оценки возможности снижения сопротивления трассы системы питания двигателя воздухом, обеспечения требуемого сопротивления воздухоочистителя и, следовательно, большего расхода отсоса пыли из пылесборника, были рассмотрены массовые расходы каждого из циклонов воздухо-

Таблица 6 — Верификация расчетной модели  
Table 6 — Calculation model verification

Наименование	Расчетное значение	Экспериментальное значение	Расхождение	Значение лимитируемое ТУ
Сопротивление воздухоочистителя без кассет, Па	8470	8826	4,0 %	7355
Сопротивление воздухоочистителя с кассетами, Па	9980	10 480	4,8 %	8335

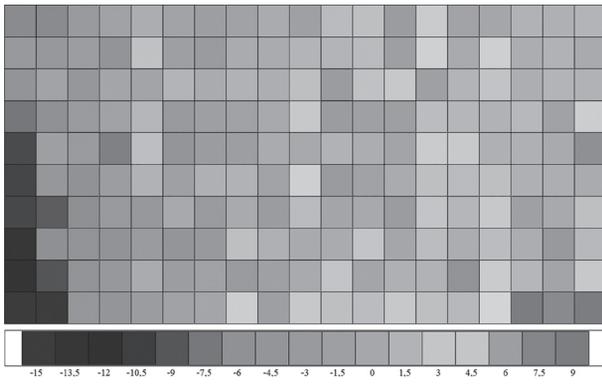
Таблица 7 — Результаты расчетов  
Table 7 — Calculation results

Показатель	Требуемое	Базовая конструкция	Перспективная конструкция
Сопrotивление подвода воздуха к воздухоочистителю, Па	981	4296	3857
Сопrotивление воздухоочистителя, Па	11 770	10 150	9800
Коэффициент отсоса пыли на режиме:			
максимальной мощности двигателя, %	12,0	23,5	17,0
80 % максимальной мощности двигателя, %	12,0	24,0	15,4
холостых оборотов двигателя, %	5,0	103,4	5,5
Сопrotивление системы питания двигателя воздухом, Па	13 200	14 450	13 700
Сопrotивление системы выхлопа отработавших газов, Па	14 700	11 200	38 380

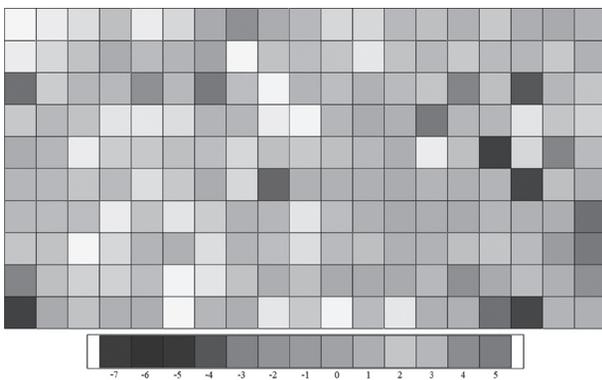
очистителя. Для удобства восприятия и анализа построены лоскутные диаграммы, показывающие процентное отклонение массовых расходов в каждом из циклонов от среднего арифметического значения для базовой (А) и перспективной (Б) конструкции в трех случаях — на питание двигателя (рисунок 4), на пылеудаление (рисунок 5) и суммарное (рисунок 6). Все нижеприведенные рисунки показывают циклоны при взгляде на воздухоочиститель сверху (+Z, вверх +Y (см. рисунок 3 с)). Аналогичные картины без принципиальных отличий наблюдаются для базовой и перспективной

конструкции и на режиме 80 % мощности. На холостых оборотах распределение массовых расходов существенно изменяется.

**Заключение и выводы.** В рамках проведенной работы выполнена оценка возможности эжекционного отсоса пыли из пылесборника воздухоочистителя, определены величины сопротивления трасс системы питания двигателя воздухом и системы выхлопа отработавших газов, получено распределение массовых расходов через каждый из циклонов, входящий в воздухоочиститель, для базовой и перспективной конструкции. По резуль-



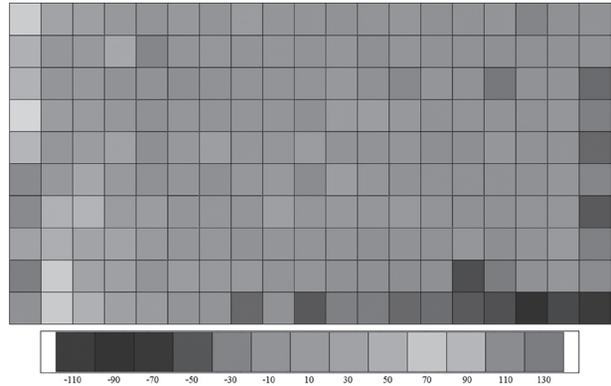
a



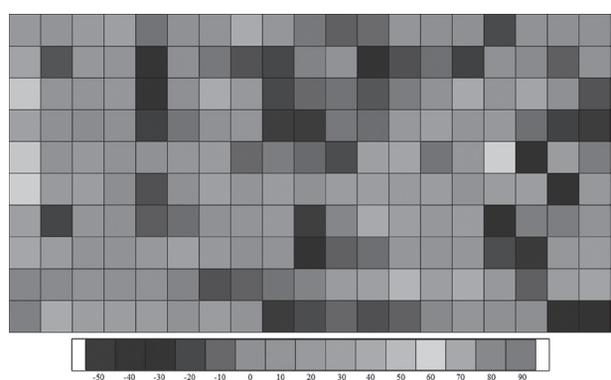
b

Рисунок 4 — Процентное отклонение массовых расходов на питание двигателя по циклонам: a — базовая конструкция; b — перспективная конструкция

Figure 4 — Percentage deviation of mass flow rates for engine supply by cyclone: a — basic design; b — advanced design



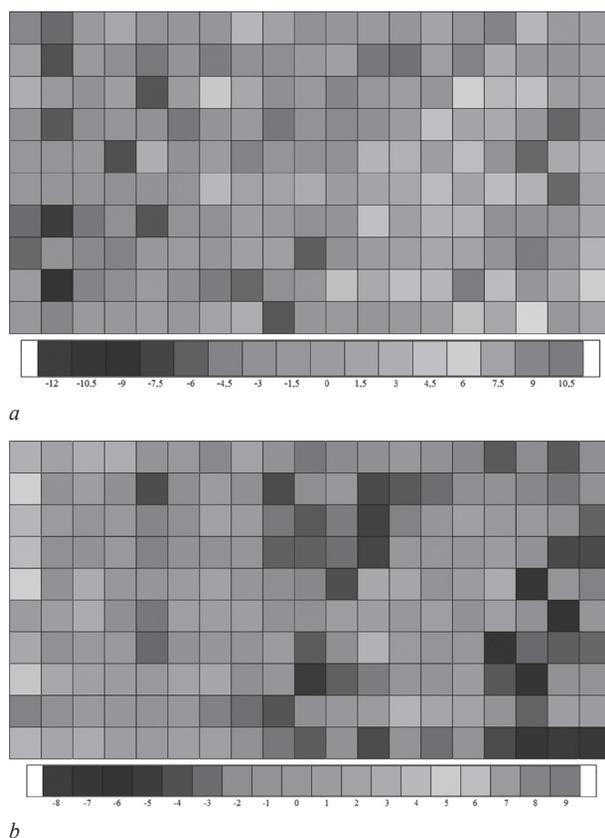
a



b

Рисунок 5 — Процентное отклонение массовых расходов на пылеудаление по циклонам: a — базовая конструкция; b — перспективная конструкция

Figure 5 — Percentage deviation of mass flow rates for dust extraction by cyclone: a — basic design; b — advanced design



**Рисунок 6** — Суммарное процентное отклонение массовых расходов по циклонам: *a* — базовая конструкция; *b* — перспективная конструкция  
**Figure 6** — Total percentage deviation of mass flow rates by cyclones: *a* — basic design; *b* — advanced design

татам выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Разработанная и верифицированная комплексная модель с высокой степенью достоверности описывает рассматриваемые системы питания двигателя воздухом и выхлопа отработавших газов. Расхождение результатов < 5,0 %.

2. Расхождение в значениях сопротивления воздухоочистителя, полученных расчетным (8470 и 9980 Па) и экспериментальным (8826 и 10480 Па) путем, объясняется, в том числе, низким качеством изготовленного образца. При обеспечении должного качества изготовления расхождение снизится.

3. Полученные значения сопротивления воздухоочистителя — 10150 Па для базовой конструкции и 9800 Па для перспективной конструкции соответствуют требуемому в отраслевом стандарте (11770 Па) и превышают требуемое в технических условиях (8335 Па). Необходимо внесение изменений в конструкцию воздухоочистителя для обеспечения допустимого уровня сопротивления. Одним из основных направлений может быть установка патрубков циклонов под оптимальными углами относительно потока для обеспечения равномерного распределения массового расхода между циклонами. Также необходима доработка пылесборника.

4. Полученные значения сопротивления подвода воздуха к воздухоочистителю — 4296 Па для базовой конструкции и 3857 Па для перспективной конструкции существенно превышают требуемое (981 Па). Необходимо внесение изменений в конструкцию для обеспечения допустимого уровня сопротивления.

5. По результатам серии расчетов перспективной конструкции на разных режимах холостых оборотов определено, что отсос осуществляется, начиная с частоты вращения коленчатого вала двигателя 1300 об/мин, что соответствует результатам предварительных расчетов по РТМ.

6. Требуемый коэффициент отсоса пыли обеспечивается на всех рассматриваемых режимах в базовой и перспективной конструкции соответственно. На режиме максимальной мощности — 23,5 и 17,0 % (должен быть не менее 12,0 %), на режиме 80 % мощности — 24,0 и 15,4 % (должен быть не менее 12,0 %), на режиме холостых оборотов — 103,4 и 5,5 % (должен быть не менее 5,0 %).

7. Полученные значения сопротивления системы питания двигателя воздухом — 14450 Па для базовой конструкции и 13700 Па для перспективной конструкции превышают требуемое (13200 Па). Внесение изменений в конструкцию трассы подвода воздуха к воздухоочистителю и самого воздухоочистителя, изложенных выше, позволит снизить текущее и обеспечить требуемое сопротивление.

8. Полученное значение сопротивления перспективной конструкции системы выхлопа отработавших газов (38380 Па) в 2,6 раза превышает требуемое (14700 Па), что соответствует результатам предварительных расчетов по РТМ. Необходимо внесение изменений в конструкцию для обеспечения допустимого уровня сопротивления. Наиболее предпочтительным решением выглядит разработка новой трассы. В то же время в базовой конструкции полученное значение сопротивления системы выхлопа отработавших газов (11200 Па) не превышает требуемое (14700 Па).

9. Важно отметить, что в выполненных расчетах кассеты принимались промытыми и промасленными. В ходе эксплуатации сопротивление кассет будет расти, что приведет к увеличению сопротивления воздухоочистителя и, следовательно, увеличению сопротивления системы питания двигателя воздухом.

#### Список литературы

1. Effects of air intake pressure on the engine performance, fuel economy and exhaust emissions of a small gasoline engine / N.R. Abdullah, N.S. Shahrudin, R. Mamat [et al.] // Journal of Mechanical Engineering and Sciences. — 2014. — Vol. 6. — P. 949–958. — DOI: <https://doi.org/10.15282/jmes.6.2014.21.0091>.
2. Макоклоев, А.И. Системы охлаждения силовых установок образцов бронетанкового вооружения и техники / А.И. Макоклоев, И.С. Сенникова, И.Н. Мухина // Наука и военная безопасность. — 2021. — № 4(27). — С. 69–76.

3. Optimization of cooling air flow for improved heat dissipation through radiator / C. Palve, P. Thakur, V. Chavan, A. Aher // SAE Technical Paper 2024-26-0042. — 2024. — DOI: <https://doi.org/10.4271/2024-26-0042>.
4. Development of a method to measure engine air cleaner fractional efficiency / T. Jaroszczyk, S. Fallon, Z. Liu, S. Heckel // SAE Technical Paper 1999-01-0002. — 1999. — DOI: <https://doi.org/10.4271/1999-01-0002>.
5. 山内 博. 内燃機関用サイクロン形空気清浄器の性能 / 山内 博, 小林 恒夫 // 日本機械学会論文集. — 1961. — 27巻, 180号. — P. 1337–1345. — DOI: <https://doi.org/10.1299/kikai1938.27.1337>. = Yamauchi, H. Performance of cyclone type air-cleaner as applied to internal combustion engine / H. Yamauchi, T. Kobayashi // Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. — 1961. — Vol. 27, iss. 180. — P. 1337–1345. — DOI: <https://doi.org/10.1299/kikai1938.27.1337>.
6. Jaroszczyk, T. Analysis of engine air cleaner efficiency for different size dust distributions / T. Jaroszczyk, S. Fallon, B.A. Pardue // Fluid - Particle Separation Journal. — 2002. — Vol. 14, iss. 2. — P. 75–88.
7. 全地形車之空気濾清器流場數値模擬與量測 / 朱力民, 張敏興, 陳建霖, 賴晉園 // 中國機械工程學刊. — 2009. — 3巻, 2期. — P. 143–150. — DOI: <https://doi.org/10.29979/JCSME.200904.0008>. = Simulation and experimental measurement of flow field within an air cleaner of all-terrain vehicle / L.-M. Chu, M.-H. Chang, J.-L. Chen, J.-Y. Lai // Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers. Series C. — 2009. — Vol. 30, iss. 2. — P. 143–150. — DOI: <https://doi.org/10.29979/JCSME.200904.0008>.
8. Song, H. A study on the optimum shape of automobile air cleaner diffuser / H. Song, B. Yang, H. Cho // International Journal of Applied Engineering Research. — 2017. — Vol. 12, no. 12. — P. 3377–3381.
9. Study on separation characteristics of dust and droplet on air intake pre-filtration systems of cv based on cfd simulation and test / R.-J. Tang, B.-F. Hu, M. Zhang, Z.-J. Lu // DEStech Transactions on Computer Science and Engineering. — 2019. — DOI: <https://doi.org/10.12783/dtce/icaic2019/29462>.
10. Song, H.S. Flow characteristics and noise reduction effects of air cleaners of automobile intake systems with built-in resonators with space efficiency / H.S. Song, H. Cho // Journal of Engineering Research. — 2021. — Vol. 9, no. 3A. — DOI: <https://doi.org/10.36909/jer.v9i3A.8370>.
11. Yun, J.-E. Optimal design of off-road utility terrain vehicle air filter intake / J.-E. Yun // Energies. — 2021. — Vol. 14, iss. 8. — DOI: <https://doi.org/10.3390/en14082269>.
12. Air cleaner performance improvement through multicyclone / T.M.M. de Amaral, A. Zeller, E.V. de Azevedo [et al.] // SAE Technical Paper 2013-36-0389. — 2013. — DOI: <https://doi.org/10.4271/2013-36-0389>.
13. Dziubak, T. Operational properties of performance engine intake air cleaners / T. Dziubak // Combustion Engines. — 2018. — Vol. 172, iss. 1. — P. 25–34. — DOI: <https://doi.org/10.19206/CE-2018-103>.
14. Zhang, J. Analysis of dust reduction characteristics of multistage tandem dust removal system / J. Zhang, D. Liang, Y. Cao // Shock and Vibration. — 2023. — DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/5541196>.
15. Dziubak, T. Experimental testing of filter materials for two-stage inlet air systems of internal combustion engines / T. Dziubak // Energies. — 2024. — Vol. 17, iss. 11. — DOI: <https://doi.org/10.3390/en17112462>.
16. Numerical studies of an axial flow cyclone with ongoing removal of separated dust by suction from the settling tank / S. Dziubak, J. Małachowski, T. Dziubak, M. Tomaszewski // Chemical Engineering Research and Design. — 2024. — Vol. 208. — P. 29–51. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2024.05.044>.
17. Dziubak, T. Computational and experimental analysis of axial flow cyclone used for intake air filtration in internal combustion engines / T. Dziubak, L. Bąkała // Energies. — 2021. — Vol. 14, iss. 8. — DOI: <https://doi.org/10.3390/en14082285>.
18. Dziubak, T. Theoretical and experimental studies of uneven dust suction from a multi-cyclone settling tank in a two-stage air filter / T. Dziubak // Energies. — 2021. — Vol. 14, iss. 24. — DOI: <https://doi.org/10.3390/en14248396>.
19. Dziubak, T. Experimental study of the effect of air filter pressure drop on internal combustion engine performance / T. Dziubak, M. Karczewski // Energies. — 2022. — Vol. 15, iss. 9. — DOI: <https://doi.org/10.3390/en15093285>.
20. Dziubak, T. Experimental investigation of possibilities to improve filtration efficiency of tangential inlet return cyclones by modification of their design / T. Dziubak // Energies. — 2022. — Vol. 15, iss. 11. — DOI: <https://doi.org/10.3390/en15113871>.
21. Yadav, P. Exhaust system of commercial vehicle: a review / P. Yadav, P. Kothmire // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2021. — Vol. 1116. — DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1116/1/012109>.
22. 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. — P. 115–136. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s41104-022-00104-w>.
23. Lucic, M. Design and CFD simulation of the exhaust manifold of the formula student vehicle / M. Lucic // Machines. Technologies. Materials. — 2023. — Vol. 17, iss. 2. — P. 54–57.
24. Siddha, D. CFD analysis of exhaust system of a formula racing vehicle / D. Siddha, G. Mahesh, R. Harish // International Journal of Vehicle Structures and Systems. — 2022. — Vol. 14, no. 6. — DOI: <https://doi.org/10.4273/ijvss.14.6.05>.
25. 孙雪迎. 整车排气系统对汽油机动力性的影响 / 孙雪迎, 苏方旭, 张艳青 // 内燃机学报. — 2018. — 36 卷, 06 期. — P. 538–545. — DOI: <https://doi.org/10.16236/j.cnki.nrxj.201806070>. = Sun, X. Influence of vehicle exhaust system on torque performance of a gasoline engine / X. Sun, F. Su, Y. Zhang // Transactions of Chinese Society for Internal Combustion Engines. — 2018. — Vol. 36, iss. 06. — P. 538–545. — DOI: <https://doi.org/10.16236/j.cnki.nrxj.201806070>.
26. Automobile exhaust after-treatment system of diesel engine: a technical review / B. Aich, S. Roy, P. Roy, S. Bhowmick // International Journal of Creative Research Thoughts. — 2024. — Vol. 12, iss. 5. — P. 559–565. — DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11442558>.
27. Kaya, B. Design and analysis of the exhaust manifold in a 6-cylinder commercial diesel engine / B. Kaya, C. Büyük, M. Öztürk // Orclever Proceedings of Research and Development. — 2023. — Vol. 3, no. 1. — P. 539–551. — DOI: <https://doi.org/10.56038/oprd.v3i1.373>.
28. Bober, B. Influence of exhaust manifold modification on engine power / B. Bober, M. Andrych-Zalewska, P. Boguś // Combustion Engines. — 2023. — Vol. 196, iss. 1. — P. 54–65. — DOI: <https://doi.org/10.19206/CE-171389>.
29. A review on the correlation between exhaust backpressure and the performance of IC engine / R. Murali, A.B. Shahrman, Z.M. Razlan [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 2051. — DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2051/1/012044>.
30. Yadav, P. CFD analysis of exhaust pipe of a diesel engine / P. Yadav, P. Kothmire // AIP Conference Proceedings. — 2021. — Vol. 2417, iss. 1. — DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0072779>.
31. CFD and thermal analysis of exhaust manifold and exhaust header for a 6 cylinder inline engine: a review / S. Usama, Y. Palav, Z. Shaikh, S. Ansari // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. — 2021. — Vol. 9, iss. X. — P. 771–775. — DOI: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.38518>.
32. Askari, A. Coupled CFD-FE-analysis for the exhaust manifold of EF7 engine / A. Askari, M. Farzin, E. Shirani // Proceedings of 13th Annual & 2nd International Fluid Dynamics Conference, Shiraz, 26–28 Oct. 2024 / Shiraz University. — Shiraz, 2024.
33. Thangapandian, P. Design and analysis of exhaust manifold for multi-cylinder diesel engine with monolith catalytic converter using CFD / P. Thangapandian // International Journal of Applied Science and Engineering. — 2022. — Vol. 19, no. 1. — DOI: [https://doi.org/10.6703/IJASE.202203\\_19\(1\).003](https://doi.org/10.6703/IJASE.202203_19(1).003).
34. Dziubak, T. Experimental studies of dust suction irregularity from multi-cyclone dust collector of two-stage air filter / T. Dziubak // Energies. — 2021. — Vol. 14, iss. 12. — DOI: <https://doi.org/10.3390/en14123577>.
35. Dziubak, T. A study on the improvement of uniformity of dust extraction from multicyclone dust collectors / T. Dziubak // Combustion Engines. — 2011. — Vol. 147, iss. 4. — P. 69–78. — DOI: <https://doi.org/10.19206/CE-117077>.
36. Калиновский, А.А. Моделирование и повышение эффективности эжекционного отсоса пыли из воздухозаборника выхлопными газами двигателя сельскохозяйственной машины / А.А. Калиновский, Ю.В. Чугурьин, А.А. Новиков // Вестник аграрной науки Дона. — 2018. — № 2(42). — С. 58–65.

37. Калиновский, А.А. Моделирование и оценка эффективности эжекционного отсоса пыли выхлопными газами в глушителе сельскохозяйственной машины / А.А. Калиновский, Ю.В. Чупрынин, А.А. Новиков // Механика машин, механизмов и материалов. — 2018. — № 2(43). — С. 17–23.
38. Калиновский, А.А. Оптимизация геометрии проточной области эжектора удаления пыли из воздухозаборника сельскохозяйственной машины / А.А. Калиновский, Ю.В. Чупрынин, А.С. Шантыко // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — Минск, 2020. — Вып. 9. — С. 23–26.

TRUSEVICH Ilya A., Ph. D. in Eng.

First Category Design Engineer<sup>1</sup>

Junior Researcher<sup>2</sup>

Associate Professor of the Department of Tracked Vehicles and Applied Mechanics<sup>3</sup>

E-mail: trilal@bk.ru

ABDULOV Sergey V., Ph. D. in Eng.

Executive Director – Chief Designer<sup>1</sup>

Associate Professor of the Department of Tracked Vehicles and Applied Mechanics<sup>3</sup>

E-mail: sincopa2004@mail.ru

TARATORKIN Igor A., D. Sc. in Eng., Prof.

Chief Researcher, Head of the Department of Mechanics of Transport Vehicles<sup>2</sup>

Professor of the Department of Tracked Vehicles and Applied Mechanics<sup>3</sup>

E-mail: ig\_tar@mail.ru

DERZHANSKY Viktor B., D. Sc. in Eng., Prof.

Leading Researcher<sup>2</sup>

Head of the Department of Tracked Vehicles and Applied Mechanics<sup>3</sup>

E-mail: dvb\_47@mail.ru

<sup>1</sup>JSC “Special Design Bureau of Mechanical Engineering”, Kurgan, Russian Federation

<sup>2</sup>Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

<sup>3</sup>Kurgan State University, Kurgan, Russian Federation

Received October 23, 2024.

## COMPARATIVE MODELING OF A PROMISING DESIGN OF ENGINE AIR SUPPLY AND EXHAUST SYSTEMS WITH EJECTION DUST REMOVAL

*As part of the study, a literature analysis is performed on various options for increasing the efficiency of engine air supply and exhaust systems. Particular attention is paid to the use of software products for determining the resistance of the engine air supply and exhaust systems, methods and approaches to reducing it and using exhaust gases to clean the dust collector. The paper provides generalized requirements for air cleaning systems for diesel engines, according to the industry standard, and for air supply and exhaust systems for the diesel engine considered in this paper, according to technical specifications. In accordance with the objectives of the study, a description of the experiment to determine the resistance of the air cleaner without cassettes and with cassettes is presented, the models and methods used for simulation calculations that ensure the convergence of the numerical solution and implemented in the multifunctional software product for multiphysical modeling STAR-CCM+ are listed, the initial data, boundary and initial conditions are given, the verification of the developed models is performed, which established the discrepancy between the experimental indicators and the calculated results of < 5 %, a comparative analysis of the engine air supply system and the exhaust system of the basic and advanced designs is carried out. The obtained scientific and technical results confirm the possibility of implementing ejection dust extraction from the air cleaner dust collector with a dust extraction coefficient of 17 % (should be at least 12 %) in the maximum power mode, which will require a separate study, and determine the main directions of further work. For the basic design, the priority is to refine the engine air supply system in order to reduce the resistance, which significantly exceeds the required value. Installing cyclone nozzles at optimal angles relative to the flow to ensure uniform distribution of mass flow appears to be the most promising solution.*

**Keywords:** CFD, engine air supply system, air cleaner, dust removal system, ejection dust suction, exhaust system, diesel engine, simulation, verification, prediction

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-1-70-5-16>

## References

1. Abdullah N.R., Shahrudin N.S., Mamat R., Mamat A.M.I., Zulkifli A. Effects of air intake pressure on the engine performance, fuel economy and exhaust emissions of a small gasoline engine. *Journal of mechanical engineering and sciences*, 2014, vol. 6, pp. 949–958. DOI: <https://doi.org/10.15282/jmes.6.2014.21.0091>.
2. Makoklyuev A.I., Sennikova I.S., Muhina I.N. Sistemy ohlazhdeniya silovyykh ustanovok obraztsov bronetankovogo voozheniya i tekhniki [Cooling systems for power plants of armoured armament and equipment samples]. *Nauka i voennaya bezopasnost*, 2021, no. 4(27), pp. 69–76 (in Russ.).
3. Palve C., Thakur P., Chavan V., Aher A. Optimization of cooling air flow for improved heat dissipation through radiator. *SAE Technical Paper*, no. 2024-26-0042, 2024. DOI: <https://doi.org/10.4271/2024-26-0042>.
4. Jaroszczyk T., Fallon S., Liu Z., Heckel S. Development of a method to measure engine air cleaner fractional efficiency. *SAE Technical Paper*, no. 1999-01-0002, 1999. DOI: <https://doi.org/10.4271/1999-01-0002>.
5. Yamauchi H., Kobayashi T. Performance of cyclone type air-cleaner as applied to internal combustion engine. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 1961, vol. 27, iss. 180, pp. 1337–1345. DOI: <https://doi.org/10.1299/kikai1938.27.1337> (in Japanese).
6. Jaroszczyk T., Fallon S., Pardue B.A. Analysis of engine air cleaner efficiency for different size dust distributions. *Fluid - particle separation journal*, 2002, vol. 14, iss. 2, pp. 75–88.
7. Chu L.-M., Chang M.-H., Chen J.-L., Lai J.-Y. Simulation and experimental measurement of flow field within an air cleaner of all-terrain vehicle. *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers – Series C*, 2009, vol. 30, iss. 2, pp. 143–150. DOI: <https://doi.org/10.29979/JCSME.200904.0008> (in Chinese).
8. Song H., Yang B., Cho H. A study on the optimum shape of automobile air cleaner diffuser. *International journal of applied engineering research*, 2017, vol. 12, no. 12, pp. 3377–3381.
9. Tang R.-J., Hu B.-F., Zhang M., Lu Z.-J. Study on separation characteristics of dust and droplet on air intake pre-filtration systems of CV based on CFD simulation and test. *DEStech transactions on computer science and engineering*, 2019. DOI: <https://doi.org/s10.12783/dtcse/icaic2019/29462>.
10. Song H.S., Cho H. Flow characteristics and noise reduction effects of air cleaners of automobile intake systems with built-in resonators with space efficiency. *Journal of engineering research*, 2021, vol. 9, no. 3A. DOI: <https://doi.org/10.36909/jer.v9i3A.8370>.
11. Yun J.-E. Optimal design of off-road utility terrain vehicle air filter intake. *Energies*, 2021, vol. 14, iss. 8. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14082269>.
12. De Amaral T.M.M., et al. Air cleaner performance improvement through multicyclone. *SAE Technical Paper*, no. 2013-36-0389, 2013. DOI: <https://doi.org/10.4271/2013-36-0389>.
13. Dziubak T. Operational properties of performance engine intake air cleaners. *Combustion engines*, 2018, vol. 172, iss. 1, pp. 25–34. DOI: <https://doi.org/10.19206/CE-2018-103>.
14. Zhang J., Liang D., Cao Y. Analysis of dust reduction characteristics of multistage tandem dust removal system. *Shock and vibration*, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/5541196>.
15. Dziubak T. Experimental testing of filter materials for two-stage inlet air systems of internal combustion engines. *Energies*, 2024, vol. 17, iss. 11. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17112462>.
16. Dziubak S., Małachowski J., Dziubak T., Tomaszewski M. Numerical studies of an axial flow cyclone with ongoing removal of separated dust by suction from the settling tank. *Chemical engineering research and design*, 2024, vol. 208, pp. 29–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2024.05.044>.
17. Dziubak T., Bąkała L. Computational and experimental analysis of axial flow cyclone used for intake air filtration in internal combustion engines. *Energies*, 2021, vol. 14, iss. 8. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14082285>.
18. Dziubak T. Theoretical and experimental studies of uneven dust suction from a multi-cyclone settling tank in a two-stage air filter. *Energies*, 2021, vol. 14, iss. 24. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14248396>.
19. Dziubak T., Karczewski M. Experimental study of the effect of air filter pressure drop on internal combustion engine performance. *Energies*, 2022, vol. 15, iss. 9. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15093285>.
20. Dziubak T. Experimental investigation of possibilities to improve filtration efficiency of tangential inlet return cyclones by modification of their design. *Energies*, 2022, vol. 15, iss. 11. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15113871>.
21. Yadav P., Kothmire P. Exhaust system of commercial vehicle: a review. *IOP conference series: materials science and engineering*, 2021, vol. 1116. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1116/1/012109>.
22. Ahmed S., Rottengruber H., Full M. Hybrid model for exhaust systems in vehicle thermal management simulations. *Automotive and Engine Technology*, 2022, vol. 7, pp. 115–136. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41104-022-00104-w>.
23. Lucic M. Design and CFD simulation of the exhaust manifold of the Formula student vehicle. *Machines. Technologies. Materials*, 2023, vol. 17, iss. 2, pp. 54–57.
24. Siddha D., Mahesh G., Harish R. CFD analysis of exhaust system of a formula racing vehicle. *International journal of vehicle structures and systems*, 2022, vol. 14, no. 6. DOI: <https://doi.org/10.4273/ijvss.14.6.05>.
25. Sun X., Su F., Zhang Y. Influence of vehicle exhaust system on torque performance of a gasoline engine. *Transactions of Chinese Society for Internal Combustion Engines*, 2018, vol. 36, iss. 06, pp. 538–545. DOI: <https://doi.org/10.16236/j.cnki.nrjxb.201806070> (in Chinese).
26. Aich B., Roy S., Roy P., Bhowmick S. Automobile exhaust after-treatment system of diesel engine: a technical review. *International journal of creative research thoughts*, 2024, vol. 12, iss. 5, pp. 559–565. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11442558>.
27. Kaya B., Büyük C., Öztürk M. Design and analysis of the exhaust manifold in a 6-cylinder commercial diesel engine. *Orclever proceedings of research and development*, 2023, vol. 3, no. 1, pp. 539–551. DOI: <https://doi.org/10.56038/oprd.v3i1.373>.
28. Bober B., Andrych-Zalewska M., Boguś P. Influence of exhaust manifold modification on engine power. *Combustion engines*, 2023, vol. 196, iss. 1, pp. 54–65. DOI: <https://doi.org/10.19206/CE-171389>.
29. Murali R., et al. A review on the correlation between exhaust backpressure and the performance of IC engine. *Journal of physics: conference series*, 2021, vol. 2051. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2051/1/012044>.
30. Yadav P., Kothmire P. CFD analysis of exhaust pipe of a diesel engine. *AIP conference proceedings*, 2021, vol. 2417, iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0072779>.
31. Usama S., Palav Y., Shaikh Z., Ansari S. CFD and thermal analysis of exhaust manifold and exhaust header for a 6 cylinder inline engine: A Review. *International journal for research in applied science and engineering technology*, 2021, vol. 9, iss. X, pp. 771–775. DOI: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.38518>.
32. Askari A., Farzin M., Shirani E. Coupled CFD-FE-analysis for the exhaust manifold of EF7 engine. *Proceedings of 13th annual & 2nd international fluid dynamics conference*. Shiraz, Iran, 2024.
33. Thangapandian P. Design and analysis of exhaust manifold for multi-cylinder diesel engine with monolith catalytic converter using CFD. *International journal of applied science and engineering*, 2022, vol. 19, no. 1. DOI: [https://doi.org/10.6703/IJASE.202203\\_19\(1\).003](https://doi.org/10.6703/IJASE.202203_19(1).003).

34. Dziubak T. Experimental studies of dust suction irregularity from multi-cyclone dust collector of two-stage air filter. *Energies*, 2021, vol. 14, iss. 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14123577>.
35. Dziubak T. A study on the improvement of uniformity of dust extraction from multicyclone dust collectors. *Combustion engines*, 2011, vol. 147, iss. 4, pp. 69–78. DOI: <https://doi.org/10.19206/CE-117077>.
36. Kalinouski A.A., Chuprynin Yu.V., Novikov A.A. Modelirovanie i povyshenie effektivnosti ezheksionnogo otsosa pyli iz vozdukhobornika vykhlopnymi gazami dvigatelya selskokhozyaystvennoy mashiny [Modeling and increasing the efficiency of ejection dust suction from the air intake by exhaust gases of an agricultural machine engine]. *Don agrarian science bulletin*, 2018, no. 2(42), pp. 58–65 (in Russ.).
37. Kalinouski A.A., Chuprynin Yu.V., Novikov A.A. Modelirovanie i otsenka effektivnosti ezheksionnogo otsosa pyli vykhlopnymi gazami v glushitele selskokhozyaystvennoy mashiny [Modeling and evaluation of efficiency of the dust ejection suction by exhaust gases in the agricultural harvester damper]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2018, no. 2(43), pp. 17–23 (in Russ.).
38. Kalinovskiy A.A., Chuprynin Yu.V., Shantyko A.S. Optimizatsiya geometrii protochnoy oblasti ezhektora udaleniya pyli iz vozdukhobornika selskokhozyaystvennoy mashiny [Optimization of the geometry of the flow area of the ejector of removing dust from the air intake of an agricultural harvester]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2020, iss. 9, pp. 23–26 (in Russ.).