

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ



УДК 51-74

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-255-1-68-73

Л.О. Круш, С.В. Акайкин,
М.А. Мелконян, Р.В. Жалнин
L.O. Krush, S.V. Akaykin,
M.A. Melkonyan, R.V. Zhalnin

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕГЕРМЕТИЧНОСТИ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ ВОЗДУХА В УСЛОВИЯХ СТЕНДА БЕНЗИНОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL TO DETERMINE SEAL FAILURE OF THE AIR SUPPLY SYSTEM UNDER THE CONDITIONS OF A GASOLINE ENGINE STAND

Ключевые слова: гидродинамика, давление, скорость, плотность, система, впускной коллектор, диагностирование, стенд, автомобиль.

Приведены результаты исследования по определению значений показателей уровня разряжения давления воздуха во впусканом тракте двигателя внутреннего сгорания, представленного стендовой установкой ВАЗ-21114 на кафедре технического сервиса машин института механики и энергетики, методом математического анализа данных. Проведен анализ метода PISO, который представляет собой усовершенствованную версию алгоритма SIMPLE, применяемого в вычислительной гидродинамике для решения уравнений Навье-Стокса. Определено, что основным видом течения газов в трубопроводах является турбулентное, в

связи с этим было сформулировано уравнение дисциплины, которое было применено в рамках обработки уравнений специализированным программным обеспечением OpenFOAM. Создана трехмерная модель впускного тракта двигателя ВАЗ-21114. Выявлено, что изменение значений уровня разряжения давления во впусканом тракте в зависимости от значений площади негерметичности имеет плавный график, что говорит о линейной зависимости данных составляющих характеристик, при этом это подтверждается экспоненциальной линией; при наличии площади негерметичности до значений в $3,135 \text{ mm}^2$ наблюдается резкий скачок уровня разряжения давления, что говорит о высокой степени влияния негерметичности сразу после появления данной неисправности во впусканом тракте двигателя; при прохождении значения

площади негерметичности в $3,135 \text{ mm}^2$ наблюдается постепенное снижение разницы между расчетными значениями уровня разряжения давления, что говорит о приближении к значениям, являющимся критическими для работы двигателя автомобиля.

Keywords: hydrodynamics, pressure, speed, density, system, intake manifold, diagnostics, stand, car.

The research findings on the determination of the values of air pressure discharge level in the intake tract of an internal combustion engine, represented by the VAZ-21114 stand at the Department of Technical Service of Automobiles of the Institute of Mechanics and Power Engineering, using mathematical data analysis are discussed. The PISA methodology was analyzed - an improved version of the SIMPLE algorithm used in computational fluid dynamics to solve the Navier-Stokes equations. It was determined that the main type of gas

flow in pipelines was turbulent, and in this regard, the dissipation equation was derived which was applied as part of the equation processing by the specialized OpenFOAM software. A three-dimensional model of the intake tract of the VAZ-21114 engine was developed. It was found that the change in the values of the pressure discharge level in the intake tract depending on the values of the leakage area had a smooth graph which indicated a linear dependence of these component characteristics, while this was confirmed by an exponential line; in the presence of a leakage area up to values of 3.135 mm^2 ; there was a sharp jump in the pressure discharge level which indicated a high degree of leakage influence immediately after the occurrence of this malfunction in the intake tract of the engine when passing through the leakage area of 3.135 mm^2 there was a gradual decrease in the difference between the calculated values of the pressure discharge level which indicated an approach to the values that were critical for the operation of the car engine.

Круш Леонид Олегович, вед. аналитик, аспирант, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет, г. Саранск, Российская Федерация, e-mail: leonidsgrants@yandex.ru.

Акайкин Сергей Владимирович, студент, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет, г. Саранск, Российская Федерация, e-mail: sector-grants@mail.ru.

Мелконян Маргар Артакович, студент, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет, г. Саранск, Российская Федерация, e-mail: molodnauka@mail.ru.

Жалнин Руслан Викторович, к.ф.-м.н., доцент, декан факультета математики и информационных технологий, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет, г. Саранск, Российская Федерация, e-mail: zhrv@mrsu.ru.

Krush Leonid Olegovich, leading analyst, post-graduate student, National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russian Federation, e-mail: leonidsgrants@yandex.ru.

Akaykin Sergey Vladimirovich, student, National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russian Federation, e-mail: sector-grants@mail.ru.

Melkonyan Margar Artakovich, student, National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russian Federation, e-mail: molodnauka@mail.ru.

Zhalnin Ruslan Viktorovich, Cand. Phys.-Math. Sci., Assoc. Prof., Dean, Mathematics and Information Technology Dept., National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russian Federation, e-mail: zhrv@mrsu.ru.

Введение

В процессе эксплуатации автомобилей с бензиновыми двигателями применяемые для их работы датчики, устройства и системы обеспечения функционирования оказывают непосредственное влияние на характеристики автотранспортного средства [1, 2]. Одной из неисправностей, которая оказывает сильное влияние на эксплуатацию транспортных средств в условиях предприятий агропромышленного комплекса, является наличие негерметичностей во впускном тракте ДВС. Проведенные ранее исследо-

вания наглядно показывают, что при наличии данной неисправности происходит резкое отклонение всех показателей электронной системы управления двигателем (ЭСУД). При этом важно отметить, что ЭСУД в процессе длительной эксплуатации с какими-либо неисправностями проводит адаптацию работы электронного блока управления двигателем (ЭБУ) [3].

Длительная эксплуатация при наличии негерметичности в большинстве случаев приводит к повышенному расходу топлива, снижению эксплуатационных характеристик, износу и повре-

ждению ДВС [4]. Данную неисправность возможно выявить и предупредить с помощью специализированных устройств, которые позволяют проводить контроль технического состояния впускного тракта ДВС в режиме эксплуатации [5-8].

В рамках выполнения исследований по разработке данных устройств необходимо создать структуры, позволяющие проводить анализ изменений уровня разряжения давления во впусканом тракте.

Цель и задачи исследования: разработка и адаптация в условиях стенда математической модели для оценки уровня разряжения давления воздуха во впусканом тракте ДВС.

Материалы и методы

Для исследования условий разработки математической модели для определения негерметичности системы подачи воздуха в условиях стенда бензинового двигателя ВАЗ-21114 были выбраны физические законы гидрогазодинамики.

При исследовании законов движения жидкостей, возникают два типа задач: первый, внешний включает в себя определение сил, действующих на обтекаемое жидкостью тело, при заданных характеристиках её потока; второй, внутренний, требует нахождения гидродинамических характеристик потока жидкости при известных силах, оказывающих на неё воздействие [9].

В качестве математической модели для расчета параметров воздуха в процессе работы впусканого тракта рассмотрим систему уравнений Навье-Стокса для несжимаемой жидкости:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) - \nabla \cdot (\nu \Delta \mathbf{u}) = -\nabla p, \quad (2)$$

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) - \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\bar{\mu} \Delta \mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p, \quad (4)$$

дополненные уравнениями $k - \varepsilon$ модели турбулентности

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon; \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \mu_t \frac{C_1 \varepsilon}{k} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\rho C_2 \varepsilon^2}{k}, \quad (6)$$

где $C_1, C_2, \sigma_\varepsilon, \sigma_k$ – эмпирические постоянные $k - \varepsilon$ модели турбулентности;

μ_t – коэффициент турбулентной вязкости, который вычисляется следующим образом: $\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}$.

где $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ – оператор набла;

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$ – коэффициент кинематической вязкости;

t – время;

ρ – плотность;

p – давление;

\mathbf{u} – векторное поле скорости.

Течение жидкости и газа, особенно в трубопроводах и вентиляционных каналах, в большинстве случаев является турбулентным. Отличительной особенностью турбулентности является наложение мелкомасштабных, высокочастотных случайных колебаний в направлении основного потока. Хотя амплитуда этих колебаний обычно составляет всего 5-10% от основной скорости, их влияние на поведение жидкости чрезвычайно значительно. Таким образом, понимание и моделирование турбулентности имеют важное значение для инженерных приложений.

Турбулентность представляет собой сложное и хаотичное движение жидкости или газа, при котором скорость и давление изменяются беспорядочно как во времени, так и в пространстве. В противоположность ламинарному течению, где слои жидкости движутся параллельно друг другу, турбулентные потоки характеризуются наличием вихрей и завихрений.

Моделирование турбулентных процессов играет ключевую роль в вычислительной гидродинамике. Для этого используются различные методики и подходы.

В данной работе для учёта турбулентности использовались осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS-модель):

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0; \quad (3)$$

Далее коэффициент эффективной вязкости вычисляется как сумма коэффициента молекулярной вязкости и коэффициента турбулентной вязкости:

$$\bar{\mu} = \mu + \mu_t.$$

В качестве значений эмпирических констант модели турбулентности берутся стандартные значения: $C_1 = 1,44$, $C_2 = 1,92$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\mu = 0,09$.

Для нахождения численного решения системы уравнений (3)-(6) применялся решатель *ri-soFOAM*, реализующий метод PISO в свободно распространяемом пакете OpenFOAM [9, 10].

Метод PISO представляет собой усовершенствованную версию алгоритма SIMPLE, приме-

няемого в вычислительной гидродинамике для решения уравнений Навье-Стокса [11].

Результаты исследований

Для выполнения вычислительных экспериментов была создана 3D модель впускного тракта бензинового двигателя технологического стенда, которым является рабочая модель ДВС модели ВАЗ-21114, с применением программного обеспечения FreeCAD.

По результатам выполнения расчетов были получены следующие значения изменения уровня разряжения давления во впусканом тракте стенового двигателя внутреннего сгорания модели ВАЗ-21114 от теоретической площади негерметичности (табл.).

Графическое изображение полученных расчетных данных представлено на рисунке.

Таблица

Результаты расчетов площади негерметичности

Значение площади негерметичности, мм^2	Полученное значение уровня разряжения давления, атм.	Отклонение от нормального давления разряжения, атм.	Значение площади негерметичности, мм^2	Полученное значение уровня разряжения давления, атм.	Отклонение от нормального давления разряжения, атм.
0,000	0,700	0,000	7,055	0,581	0,119
0,780	0,665	0,035	12,519	0,551	0,149
3,135	0,621	0,079	13,982	0,544	0,156

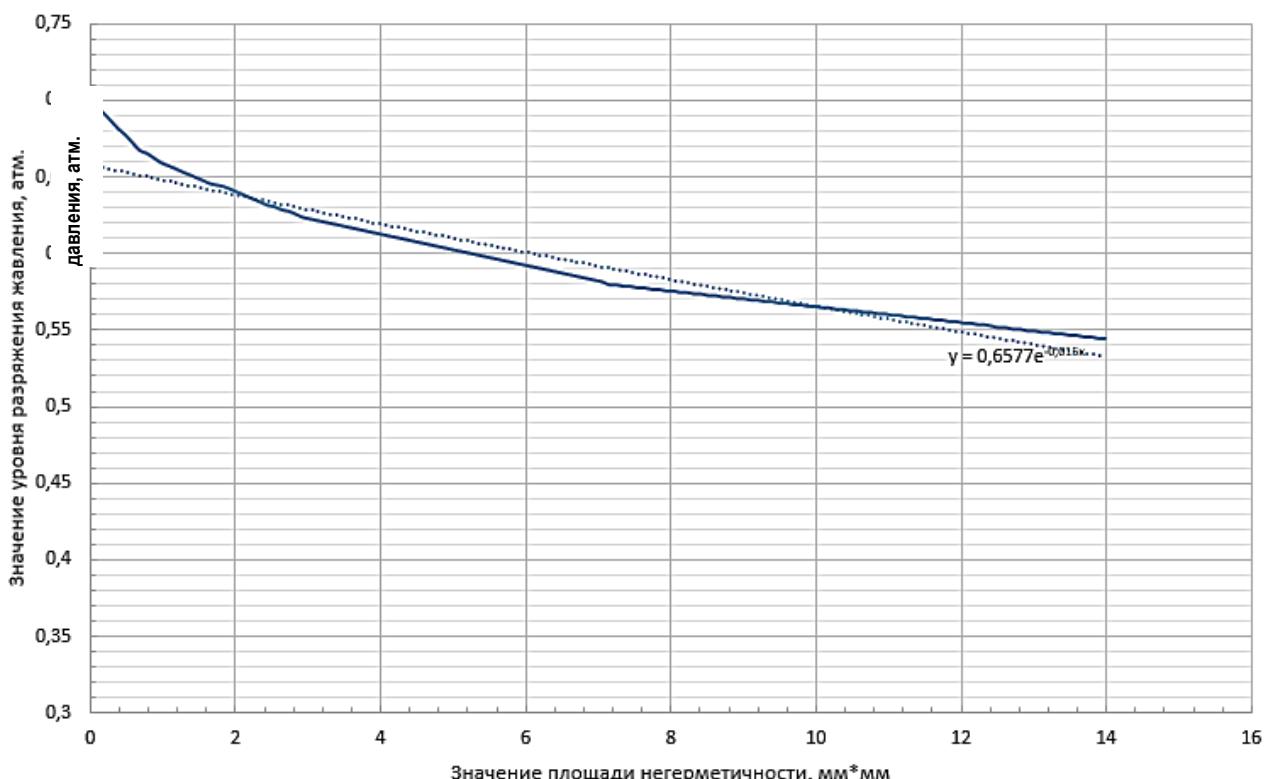


Рис. График зависимости уровня разряжения давления от площади негерметичности во впусканом тракте

Выводы

1. График изменения уровня разряжения во впускном тракте стендового двигателя ВАЗ-21114, зависящий от площади негерметичности, демонстрирует плавный характер. Это указывает на линейную зависимость между этими параметрами, что также подтверждается экспоненциальной линией.

2. При наличии площади негерметичности до значений в $3,135 \text{ mm}^2$ наблюдается резкий скачок уровня разряжения давления, что говорит о высокой степени влияния негерметичности сразу после появления данной неисправности во впускном тракте двигателя.

3. При прохождении значения площади негерметичности в $3,135 \text{ mm}^2$ наблюдается постепенное снижение разницы между расчетными значениями уровня разряжения давления, что говорит о приближении к значениям, являющимся критическими для работы двигателя автомобиля.

Библиографический список

1. Анализ потребности в датчиках на транспортных средствах / Н. И. Сергеев, К. И. Тенишев, А. С. Иванов, В. В. Лянденбурский. – Текст: непосредственный // Уральский научный вестник. – 2023. – Т. 8, № 3. – С. 108-110.

2. Применение интеллектуальной системы контроля транспортных средств / Н. И. Сергеев, К. И. Тенишев, А. В. Лянденурская [и др.]. – Текст: непосредственный // Уральский научный вестник. – 2023. – Т. 8, № 3. – С. 111-114.

3. Круш, Л. О. Определение показателей диагностического оборудования по значению разряжения давления во впусканом тракте двигателя / Л. О. Круш. – DOI: 10.53083/1996-4277-2025-249-7-65-71. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2025. – № 7 (249). – С. 65-71.

4. Hlaing, P., Silva, M., Echeverri, M., et al. (2021). Estimates of the air-fuel ratio at the time of ignition in a pre-chamber using a narrow throat geometry. *International Journal of Engine Research.* 24. 146808742110591. DOI: 10.1177/14680874211059148.

5. Экспериментальное исследование влияния характеристик двигателя на эксплуатационные свойства легкового коммерческого автомобиля / П. С. Мошков, Е. И. Торопов, А. С. Вашиурин [и др.]. – Текст: непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12 – 5. – С. 930-934.

6. Захаров, Н. С. Влияние периодичности технического обслуживания на ресурс двигателей внутреннего сгорания / Н. С. Захаров, Н. О. Сапожников, В. П. Назаров. – Текст: электронный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2025. – № 5 (2). – С. 109-117. – URL: <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-2-109-117>.

7. Пешков, А. А. Анализ эксплуатационных характеристик электромобиля и автомобиля с двигателем внутреннего сгорания / А. А. Пешков, В. Г. Кондратенко. – Текст: непосредственный // Современные технологии, применяемые при обслуживании и ремонте автомобилей: сборник трудов V Национальной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 22 апреля 2021 года. – Санкт-Петербург, 2022. – С. 41-49.

8. Белоусов И. В. Обзор и анализ способов диагностики сельскохозяйственных тракторов / И. В. Белоусов, С. Н. Шуханов. – Текст: непосредственный // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. – 2025. – № 2 (97). – С. 85-94.

9. Nawaz, M., Parik, A., Dutta, S., Truscott, T. (2025). Optimizing vertical wind tunnel design through integrated numerical and statistical modeling. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.* 267. DOI: 10.1016/j.jweia.2025.106218.

10. Greenshields C., Weller H. Notes on Computational Fluid Dynamics: General Principles. CFD Direct Ltd, Reading, UK, 2022.

11. Computational Methods for Fluid Dynamics / Joel H. Ferziger / Milovan Peric. - 3., rev. ed. - Springer, 2002.

References

1. Sergeev, N.I. Analiz potrebnosti v datchikakh na transportnykh sredstvakh / N. I. Sergeev,

- K. I. Tenishev, A. S. Ivanov, V. V. Lyandenburskiy // Uralskiy nauchnyy vestnik. – 2023. – T. 8, No. 3. – S. 108-110.
2. Sergeev, N.I. Primenenie intellektualnykh sistemy kontrolya transportnykh sredstv / N. I. Sergeev, K. I. Tenishev, A. V. Lyandenburskaya [i dr.] // Uralskiy nauchnyy vestnik. – 2023. – T. 8, No. 3. – S. 111-114.
3. Krush, L. O. Opredelenie pokazateley diagnosticheskogo oborudovaniya po znacheniyu razryazheniya davleniya vo vpusknom trakte dvigatelya // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2025. No. 7 (249). S. 65–71. DOI: 10.53083/1996-4277-2025-249-7-65-71.
4. Hlaing, P., Silva, M., Echeverri, M., et al. (2021). Estimates of the air-fuel ratio at the time of ignition in a pre-chamber using a narrow throat geometry. *International Journal of Engine Research.* 24. 146808742110591. DOI: 10.1177/14680874211059148.
5. Moshkov P.S. Eksperimentalnoe issledovanie vliyaniya kharakteristik dvigatelya na ekspluatatsionnye svoystva legkogo kommercheskogo avtomobilya / P. S. Moshkov, E. I. Toropov, A. S. Vashurin [i dr.] // Fundamentalnye issledovaniya. – 2015. – No. 12-5. – S. 930-934.
6. Zakharov N.S. Vliyanie periodichnosti tekhnicheskogo obsluzhivaniya na resurs dvigateley vnutrennego sgoraniya / Zakharov N.S., Sapozhni-
- kov N.O., Nazarov V.P. // Arkhitektura, stroitelstvo, transport. – 2025. – No. 5 (2). – S. 109-117. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-2-109-117>.
7. Peshkov A.A. Analiz ekspluatatsionnykh kharakteristik elektromobiliya i avtomobiliya s dvigatelyem vnutrennego sgoraniya / A.A. Peshkov, V.G. Kondratenko // Sbornik trudov V Natsionalnoy mezhvuzovskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov i molodykh uchenykh "Sovremennye tekhnologii, primenyaemye pri obsluzhivanii i remonte automobiley". 2022. S. 41-49.
8. Belousov I.V. Obzor i analiz sposobov diagnostiki selskokhozyaystvennykh traktorov / Belousov I.V., Shukhanov S.N. // Vestnik VSGUTU. 2025. No. 2 (97). S. 85-94.
9. Nawaz, M., Parik, A., Dutta, S., Truscott, T. (2025). Optimizing vertical wind tunnel design through integrated numerical and statistical modeling. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.* 267. DOI: 10.1016/j.jweia.2025.106218.
10. Greenshields C., Weller H. Notes on Computational Fluid Dynamics: General Principles. CFD Direct Ltd, Reading, UK, 2022.
11. Computational Methods for Fluid Dynamics / Joel H. Ferziger / Milovan Peric. - 3., rev. ed. - Springer, 2002.



УДК 631.1741

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-255-1-73-82

С.Ю. Журавлев
S.Yu. Zhuravlev

ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ САМОХОДНЫХ И ПРИЦЕПНЫХ КОМБАЙНОВ В АПК

TECHNICAL OPERATION OF MODERN SELF-PROPELLED AND PULL-TYPE COMBINES IN THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

Ключевые слова: комбайны, техническая эксплуатация, надежность, обслуживание, ремонт, хранение, антакоррозионная защита.

Объектом исследований является проблема поддержания работоспособного состояния имеющих

сложную конструктивную схему дорогостоящих комбайнов путём совершенствования организации и технологии процессов их технической эксплуатации (ТЭ). В качестве материалов исследований использованы результаты научно-практических разработок в сфере совершенствования методов, форм, технологий и материальной базы осуществления ТЭ са-