

Received: 18.12.2023

Revised: 21.03.2024



Accepted: 24.05.2024



DOI: 10.17804/2410-9908.2024.3.006-016

A METHOD FOR IDENTIFYING THE OPTIMAL OPERATING PARAMETERS OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE DIAGNOSTIC DEVICE

N. N. Poltorykhin^{a,*} and M. V. Nikiforov^b

Tver State Agricultural Academy, 7 Marshala Vasilevskogo St. (Sakharovo), Tver, 170904, Russia

^{a)}  <https://orcid.org/0000-0001-7249-3981>  nikitapoltoryhin@yandex.ru;

^{b)}  <https://orcid.org/0000-0003-2359-8968>  mnikiforov@tvgsa.ru

*Corresponding author. E-mail: nikitapoltoryhin@yandex.ru

Address for correspondence: ul. Marshala Vasilevskogo, 7 (Sakharovo), Tver, 170904, Russia

Tel.: +7 (961) 014-0899

The paper discusses selecting the optimal operating parameters of a device for diagnosing internal combustion engines. A laboratory experiment procedure is developed, the experiment layout being approved. Mathematical planning is used to compile a planning matrix of a three-factor experiment 3^3 . The objects of the study are pneumatic valves, air pressure in a pneumatic system, and the compressed air supply interval in degrees of the crankshaft rotation. The experiment yields data on the camshaft angle after the termination of air supply to an internal combustion engine cylinder as dependent on the variation of the set device parameters. The data are statistically processed, with the calculation of the necessary values of the mean, variance, and coefficient of variation. The verification of the accuracy of the data testifies to the repeatability of the process. The results obtained from the experiment are statistically analyzed to generate regression equations. The study presents 3D surface plots and 2D plots showing the angle of camshaft rotation after the cessation of airflow to the engine cylinder as dependent on the values of variable factors. The analysis of the laboratory experiment results allows us to determine the most efficient design and process parameters of an internal combustion engine diagnostic device. The following parameters of the diagnostic device are determined: a pneumatic valve area of 29.5 to 34.5 mm², a system pressure of 0.48 to 0.62 MPa, and a compressed air supply interval (in crankshaft rotation degrees) of 140 to 180°, which allows for a camshaft rotation angle of 95 to 110 degrees.

Keywords: multifactorial experiment, internal combustion engine, complex diagnostic system

References

1. Livshits, V.M., Krashennnikov, S.V., and Pyatin, S.P. Perspective developments in the field of diagnosis of motor and tractor diesels. *Vestnik IrGSKHA*, 2010, 38, 77–81. (In Russian).
2. Zotov, S.V., Mezin, I.Yu., and Kasatkina, E.G. Analysis of modern methods for diagnosing internal combustion engines of automobiles. *Aktualnyye Problemy Sovremennoy Nauki, Tekhniki i Obrazovaniya*, 2016, 1, 247–250. (In Russian).
3. Poltorykhin, N.N., Nikiforov, M.V., and Panov, Yu.A. *Analysis of diagnostic tools in diesel engines. In: Obrazovanie, innovatsii, tsifrovizatsiya: vzglyad regionov* [Education, Innovations, Digitalization. A View of the Regions: Proceedings of the Russian (National) Scientific and Practical Conference]. Tver SAA Publ., Tver, 2022, 279–281. (In Russian).

4. Demakov, K.K. Methods of piston internal combustion engine diagnostics by analysis of crankcase gas-dynamic parameters. *Nauchno-Tekhnicheskoe i Ekonomicheskoe Sotrudnichestvo Stran ATR v XXI Veke*, 2021, 1, 16–21. (In Russian).
5. Prosvirov, Yu.E. and Basov, S.A. Reliability of operation and methods for preliminary treatment of cylinder - piston group of internal combustion engines. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*, 2010, 2 (38), 40–45. (In Russian).
6. Danilov, I.K. and Popova, I.M. Analysis of methods, development and economic feasibility of a diagnostic device for a cylinder piston group of internal combustion engines. In: *Problemy tekhnicheskoy ekspluatatsii i avtoservisa podvizhnogo sostava avtomobilnogo transporta* [Problems of Technical Maintenance and Service of Motor Vehicles: Proceedings of the 75th MADI Conference]. Tekhpoltorgiztsentr Publ., 2017, 51–57. (In Russian).
7. Shevtsov, Yu.D. and Zhuravlev, M.M. Promising methods for diagnosing internal combustion engines. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie*, 2021, 36, 1603–1608. (In Russian).
8. Sivakov, V.V., Gryadunov, S.S., and Derevyagin, R.Yu. Improvement of car diagnostics by thermal imaging method. *Transport. Transportnyye Sooruzheniya. Ekologiya*, 2021, 3, 79–87. (In Russian). DOI: 10.15593/24111678.
9. Aksenov, A.A. and Khudyakova, M.V. Modern approaches to diagnosing diesel internal combustion engine. *Aktualnyye Napravleniya Nauchnykh Issledovaniy XXI Veka: Teoriya i Praktika*, 2015, 3 (5–3) (16–3), 7–10. (In Russian).
10. Koshevenko, A.V. Search of faults of a diesel engine. *Tekhnika i Oborudovaniye Dlya Sela*, 2008, 3, 44–45. (In Russian).
11. Nikiforov, M.V., Panov, Yu.A., and Poltorykhin, N.N. Methods for diagnosing internal combustion engines by forcibly supplying compressed air to an engine cylinder. In: *Razvitie nauchno-innovatsionnogo potentsiala agrarnogo proizvodstva: problemy, tendentsii, puti resheniya* [Development of the Scientific and Innovative Potential of Agricultural Production. Problems, Trends, Solutions: Proceedings of an International Scientific and Practical Conference]. Tver SAA Publ., Tver, 2022, 337–339. (In Russian).
12. Poltorykhin, N.N., Nikiforov, M.V., and Panov, Yu.A. Analysis of malfunctions and their causes in diesels. In: *Innovatsionnyye tekhnologii v APK: problemy i perspektivy* [Innovative Technologies in Agriculture. Problems and Prospects: Materials of International Scientific and Practical Conference]. Tver SAA Publ., Tver, 2021, 218–222. (In Russian).
13. Marley, C.J. and Woods, D.C. A comparison of design and model selection methods for supersaturated experiments. *Computational Statistics and Data Analysis*, 2010, 54 (12), 3158–3167. DOI: 10.1016/j.csda.2010.02.017.
14. Pavlik, A.V., Dergachev, V.A., Saveliev, A.S., and Anikin, A.N. Automation of multifactorial experiment carrying out. *Sovremennaya Tekhnika i Tekhnologii*, 2014, 6 (34), 25. (In Russian).
15. Dzhasheyev, K.A.M. and Dzhasheyeva, Z.A.M. Nomogram method of the analysis of results of multifactorial experiment. *Sovremennyye Naukoyemkie Tekhnologii*, 2008, 8, 3. (In Russian).
16. Skvortsov, V.S. and Lazarenko, O.I. Methodology for constructing a static regression multifactor model from experimental data with factor scheduling of a fiber optic gyroscope. *Informatsionno-Tekhnologicheskii Vestnik*, 2021, 4 (30), 103–110. (In Russian).
17. Reznik, N.A. Multifactorial experiment (technology and results). *Obrazovatelnye Tekhnologii i Obshchestvo*, 2012, 15, 1, 436–452. (In Russian).

18. Denisov, V.I., Lisitsin, D.V., and Gavrilov, K.V. The design of an experiment in estimating the parameters of a multifactor model from nonhomogeneous observations. *Sib. Zh. Ind. Mat.*, 2002, 5 (4), 14–28. (In Russian).
19. Koshevoy, N.D. and Sukhobrus, E.A. The comparative analysis of optimization methods of multilevel multifactor experiment plans. *Radioelektronika, Informatika, Upravleniye*, 2012, 1 (26), 53–58. (In Russian).
20. Suyunbaev, Sh., Sarsembekov, B., Suleyev, B., and Kukeshcheva, A. Establishment of the Reynolds criterion for ultrasonic cleaning of exhaust gases of internal combustion engines. *Proceedings of the University*, 2022, 1 (86), 175–181. DOI: 10.52209/1609-1825_2022_1_175.



Подана в журнал: 18.12.2023



УДК 51-74:621.43

DOI: 10.17804/2410-9908.2024.3.006-016

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ УСТАНОВКИ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯН. Н. Полторыхин^а*, М. В. Никифоров^б

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тверская государственная сельскохозяйственная академия»,
ул. Маршала Василевского (Сахарово), 7, г. Тверь, 170904, Россия

^{а)}  <https://orcid.org/0000-0001-7249-3981>  nikitapoltoryhin@yandex.ru;

^{б)}  <https://orcid.org/0000-0003-2359-8968>  mnikiforov@tvgscha.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: nikitapoltoryhin@yandex.ru

Адрес для переписки: ул. Маршала Василевского (Сахарово), 7, г. Тверь, 170904, Россия

Тел.: +7 (961) 014-08-99

В работе рассмотрен вопрос выбора оптимальных параметров работы диагностической установки для двигателя внутреннего сгорания. Разработана методика и утверждена программа проведения лабораторного эксперимента. С применением метода математического планирования составлена план-матрица трехфакторного эксперимента 3^3 . Объектами исследования выбраны пневматические клапаны, давление воздуха в пневматической системе и интервал подачи сжатого воздуха в градусах поворота коленчатого вала. В результате проведенного эксперимента получены данные изменения угла поворота распределительного вала после прекращения подачи воздуха в цилиндр ДВС в зависимости от изменения заданных параметров работы установки. Проведена статистическая обработка значений с расчетом необходимых величин среднего значения, дисперсии и коэффициента вариации. Проверка на достоверность полученных данных подтвердила воспроизводимость процесса. Полученные при проведении эксперимента результаты обработаны статистически с получением регрессионных уравнений. Построены трехмерные графики поверхностей и двухмерные графики зависимости угла поворота распределительного вала после прекращения подачи воздуха в цилиндр ДВС от значений варьируемых факторов. Выполненный анализ результатов лабораторного эксперимента позволяет определить наиболее рациональные конструкторские и технологические параметры работы диагностической установки для двигателя внутреннего сгорания. Определены параметры диагностической установки для двигателя внутреннего сгорания: сечение пневматического клапана от 29,5 до 34,5 мм²; давление в системе от 0,48 до 0,62 МПа; интервал подачи сжатого воздуха в градусах поворота коленчатого вала от 140 до 180°, обеспечивающий угол поворота распределительного вала от 95 до 110°.

Ключевые слова: многофакторный эксперимент, двигатель внутреннего сгорания, комплексная система диагностирования

1. Введение

Развитие транспортных систем в сельском хозяйстве предъявляет новые требования к эксплуатации и техническому обслуживанию транспортных средств. Одной из частей поддержания технического состояния машинно-тракторного парка является диагностика. Она позволяет своевременно выявлять неисправности, сокращая расходы на ремонт и простой неисправных транспортных средств [1–3].

Одним из наиболее подверженных износу узлов транспортного средства является двигатель. Работоспособность поршневых двигателей внутреннего сгорания обеспечивает цилиндропоршневая группа и газораспределительный механизм [4–6]. С совершенствованием систем двигателя совершенствуются методы и средства их диагностики. Основное направление разработки новых и модернизации уже существующих диагностических систем – это универсальность и технологичность таких средств выявления неисправностей [7–9]. Систематизация поиска и проведение его в соответствии с определенной методикой позволяют сократить время простоя, которое составляет иногда более 50 % от всего времени ремонта транспортного средства [10].

С целью повышения точности определения неисправности и снижения трудоемкости работ была разработана диагностическая установка для двигателя внутреннего сгорания, позволяющая оценить состояние цилиндропоршневой группы и газораспределительного механизма. Она представляет собой комплект из пневматических клапанов и датчиков давления, соединенных посредством электрических проводов с микроконтроллером, подключенным к персональному компьютеру [11].

Целью проведения лабораторного эксперимента является выбор оптимальных параметров работы экспериментальной установки (параметров, при которых осуществляется поворот коленчатого вала на заданную величину), поскольку выбор правильных настроек диагностического оборудования повышает его надежность при эксплуатации и увеличивает точность получаемых данных.

2. Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования были выбраны пневматические клапаны, давление воздуха в пневматической системе и интервал подачи воздуха в цилиндр двигателя, выраженный в градусах угла поворота коленчатого вала. В экспериментальной установке (рис. 1) используется исправный серийный двигатель ВА3-21083 с впускным и выпускным коллекторами, в штатном исполнении (четырёхтактный, бензиновый, с рабочим объемом 1500 см³ и степенью сжатия 9,9). Номинальная мощность двигателя – 51,5 кВт при частоте вращения коленчатого вала 5600 мин⁻¹; максимальный крутящий момент – 106,4 Н·м при $n = 3400$ мин⁻¹.

Исследование проводится на базе лаборатории технического сервиса ФГБОУ ВО Тверская ГСХА.

Экспериментальная установка состоит из бензинового двигателя ВА3-21083, компрессора, переходника для подачи сжатого воздуха в двигатель, пневматических клапанов, пневматического распределителя, пневматических трубок, аппаратной платформы Arduino, персонального компьютера.

Рассмотрим принцип работы диагностического комплекса, показанного на рис. 1. От компрессора сжатый воздух поступает в распределительную магистраль повышенного давления через пневматическую трубку и распределяется по пневматическим клапанам на подачу сжатого воздуха в цилиндр двигателя. Сжатый воздух подается в цилиндр двигателя на такте рабочего хода. При открытии пневматического впускного клапана сжатый воздух поступает в пневматический распределитель и далее через пневматическую трубку и переходник – в цилиндр двигателя. Данный поток сжатого воздуха подается на такте рабочего хода и обеспечивает необходимое давление в цилиндре для совершения этого такта и поворота коленчатого вала на 180°. В это время в другом цилиндре двигателя, где проходит такт сжатия, увеличивается давление противодействия. Для компенсации данного противодействия и удаления воздуха из цилиндра создана обратная система. Воздух из цилиндра в момент такта сжатия проходит через переходник и пневматические трубки в пневматический распределитель и открытый пневматический выпускной клапан, через который удаляется в атмосферу. Управление пневматическими клапанами и сбор данных с датчиков осуществляется с помощью электронного

блока управления. Данная установка имитирует работу двигателя внутреннего сгорания. Во время имитации работы двигателя записываются диаграммы изменения давлений с помощью датчиков давлений. Анализ данных диаграмм позволяет выявить неисправность в цилиндропоршневой группе и газораспределительном механизме на основе сравнения давлений между цилиндрами и сопоставления с эталонными диаграммами.

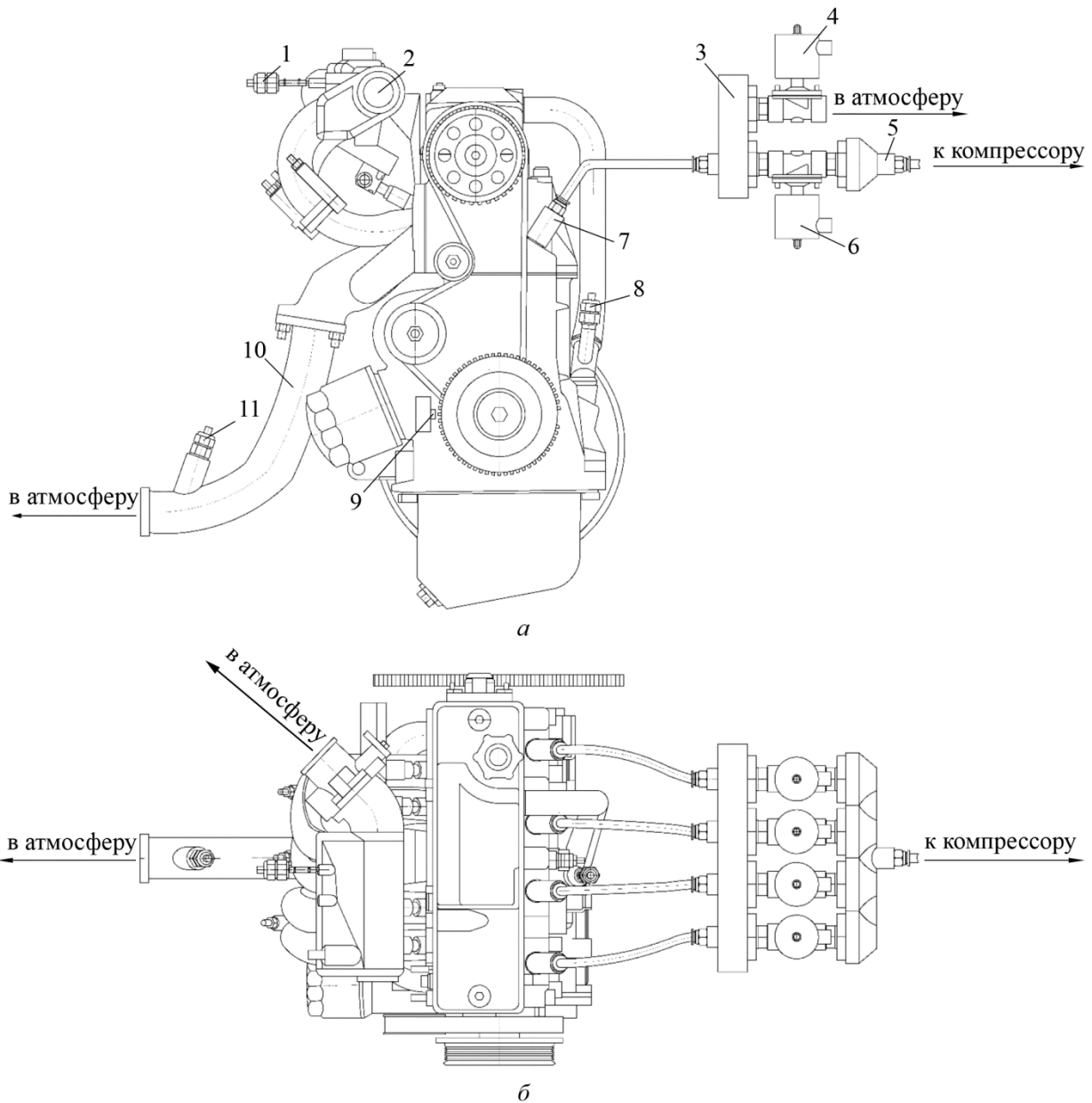


Рис. 1. Экспериментальная диагностическая установка (*а* – вид сбоку, *б* – вид сверху):
1 – датчик давления во впускном коллекторе; 2 – впускной коллектор; 3 – пневматический распределитель; 4 – пневматические выпускные клапаны; 5 – пневматический распределитель высокого давления; 6 – пневматические впускные клапаны; 7 – переходник; 8 – датчик давления в картере двигателя; 9 – датчик положения коленчатого вала; 10 – выпускной коллектор; 11 – датчик давления в выпускном коллекторе

Для проведения лабораторного эксперимента был использован первый цилиндр для подачи сжатого воздуха в цилиндр двигателя и третий – для удаления воздуха из цилиндра. Задача эксперимента – подавать сжатый воздух в первый цилиндр в течение определенного интервала времени, который выражен в градусах поворота коленчатого вала, и фиксировать угол поворота распределительного вала после прекращения подачи воздуха в цилиндр двигателя.

Для разработки методики проведения многофакторного эксперимента и статистической обработки данных был проведен анализ научных литературных источников [13–20], позволивший сформировать модель проведения эксперимента и обработки полученных данных.

Методика исследования заключается в проведении многофакторного эксперимента с последующим анализом полученных данных. Матрица кодирования значений полнофакторного эксперимента показана в таблице 1.

Таблица 1

Матрица кодирования значений полнофакторного эксперимента типа 3^3

Исследуемые факторы	Уровни варьирования			Кодовое значение		
				минимальное	нулевое	максимальное
Диаметр проходного сечения клапана, мм ²	25	40	55	–1	0	1
Давление в системе, МПа	0,48	0,55	0,62	–1	0	1
Интервал подачи сжатого воздуха в градусах поворота коленчатого вала	60	120	180	–1	0	1

Первым фактором является диаметр сечения впускного пневматического клапана. Для проведения эксперимента было выбрано три пневматических клапана: 2W025-08, 2W040-10 и 2W160-15. Диаметр рабочего сечения для них равен 25, 40 и 160 мм² соответственно. Диаметр клапана 2W160-15 ограничен диаметром сечения пневматической трубки и составляет 55 мм².

Второй фактор – давление воздуха в пневматической системе. Это давление воздуха в пневматических трубках, которое поступает от компрессора к впускным пневматическим клапанам. Для проведения эксперимента выбраны следующие давления: 4,8; 5,5; 6,2 МПа. Диапазон давлений был взят из предварительных экспериментов.

Третьим фактором является угол поворота коленчатого вала, в течение которого подается сжатый воздух в двигатель. Были выбраны следующие углы: 60, 120 и 180°. Диапазон данных углов обусловлен тем, что подача сжатого воздуха после поворота коленчатого вала двигателя более чем на 180°, то есть после завершения цикла рабочего хода, будет влиять на изменение давления в выпускном коллекторе.

Последовательность проведения эксперимента включает в себя следующие этапы:

1. Подготовка двигателя к эксперименту.

1.1. Подключение пневматических переходников для подачи сжатого воздуха к двигателю внутреннего сгорания.

1.2. Подключение пневматических трубок к механизмам установки для диагностирования двигателя.

1.3. Подключение датчика Холла для измерения положения распределительного вала через платформу Arduino к персональному компьютеру.

2. Подготовка установки для первого замера.
 - 2.1. Подключается первый тип пневматического клапана.
 - 2.3. Задается давление в пневматической системе на уровне 0,48 МПа.
 - 2.4. В программе управления на персональном компьютере выбирается интервал поворота угла коленчатого вала в 60°. Данный угол контролируется датчиком Холла, установленным на место датчика поворота коленчатого *a*.
3. Проведение эксперимента.
 - 3.1. Первый цилиндр двигателя выставляется в верхнюю мертвую точку на такте рабочего хода.
 - 3.2. Производится поворот коленчатого вала двигателя путем подачи сжатого воздуха в первый цилиндр, при этом пневматический клапан на выпуск воздуха из цилиндра 3 открыт согласно схеме работы двигателя. Время подачи ограничено углом поворота коленчатого вала. Контроль угла производится с помощью датчика Холла, установленного на место датчика поворота коленчатого вала двигателя.
 - 3.3. Производится замер угла, на который повернулся распределительный вал после подачи воздуха.
 - 3.3. Согласно плану проведения эксперимента меняется диаметр проходного сечения пневматического клапана на впуск сжатого воздуха в цилиндр двигателя, давление в пневматической системе и угол поворота коленчатого вала, в течение которого подается сжатый воздух.
 - 3.5. Остальные замеры производятся от пункта 3.1 по плану эксперимента (таблица 2).
4. Анализ полученных данных.

Таблица 2

Матрица проведения полнофакторного эксперимента

Фактор	Номер эксперимента																										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1
2	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1
3	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1

3. Результаты и обсуждение

На основании проведенного исследования получены данные об изменении угла поворота распределительного вала после прекращения подачи сжатого воздуха. В соответствии с методикой обработки экспериментальных данных с применением программного обеспечения проведена статистическая обработка с расчетом необходимых величин среднего значения, дисперсии и коэффициента вариации. Результаты обработки полученных значений необходимы для получения регрессионного уравнения зависимости угла поворота распределительного вала от исследуемых факторов.

Выполненная статистическая обработка данных указывает на достоверность полученных результатов, ошибка данных эксперимента не превышает 5,0 %. Проверка проведена по критерию Кохрена, который составил 0,15, что меньше табличного значения 0,237; следовательно, процесс воспроизводим. Значение критерия Стьюдента составило 2,778; показатель критерия Фишера неполного квадратного уравнения равен 3,58. Это меньше табличного значения 4,04, что свидетельствует об адекватности модели.

В результате обработки данных была установлена следующая регрессионная зависимость:

$$y = 123,778 + 35,815 \cdot x_1 + 20,778 \cdot x_3 - 10,209 \cdot x_1^2 - 7,913 \cdot x_2^2 - 6,209 \cdot x_3^2.$$

Значение x в данном уравнении имеет натуральное значение, привязанное к фактору исследования, а y является углом поворота распределительного вала после прекращения подачи сжатого воздуха.

Для того чтобы изобразить поверхности отклика и их сечения полученного уравнения регрессии, необходимо каждый из трех факторов зафиксировать на нулевом уровне: сечение пневматического клапана $z = 40 \text{ мм}^2$, что соответствует клапану 2W040-10; давление в системе $\nu = 5,5 \text{ МПа}$; интервал подачи сжатого воздуха в градусах поворота коленчатого вала $c = 120^\circ$. Подставив эти значения в раскодированное уравнение регрессии, получим три уравнения с двумя факторами.

Для факторов z и ν

$$y = -0,04 \cdot z^2 + 6,04 \cdot z - 16,1 \cdot \nu^2 + 177,51 \cdot \nu - 529,7.$$

Для факторов z и c

$$y = -0,04 \cdot z^2 + 6,04 \cdot z - 0,006 \cdot c^2 + 1,5 \cdot c - 108,82.$$

Для факторов ν и c

$$y = -16,1 \cdot \nu^2 + 177,51 \cdot \nu - 0,006 \cdot c^2 + 1,5 \cdot c - 420,5.$$

Анализ полученных регрессионных зависимостей показывает, что на угол поворота распределительного вала после прекращения подачи сжатого воздуха в меньшей степени оказывает влияние величина давления сжатого воздуха в системе.

Таким образом, наиболее значимыми факторами являются диаметр сечения пневматического клапана и интервал (в градусах поворота распределительного вала) подачи сжатого воздуха в цилиндр двигателя.

Регрессионные зависимости позволили построить трехмерные графики изменения угла поворота распределительного вала в зависимости от значений факторов (рис. 2).

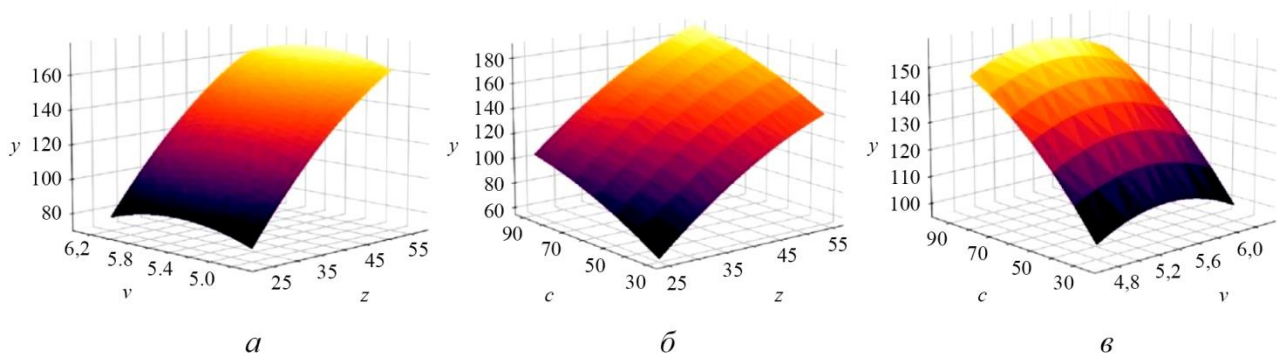


Рис. 2. Поверхности отклика угла поворота распределительного вала в зависимости от факторов z и ν (а); z и c (б); ν и c (в)

Анализ полученных поверхностей позволяет выделить параметры диагностической установки, при которых достигается угол поворота распределительного вала, обеспечивающий стабильную работу двигателя, в диапазоне от 95 до 110° . Данный диапазон угла поворота распределительного вала выбран для плавного вращения двигателя без избыточной подачи сжатого воздуха в цилиндр. В соответствии с трехмерными графиками были построены их сечения, на которых отмечены области работы диагностической установки (рис. 3).

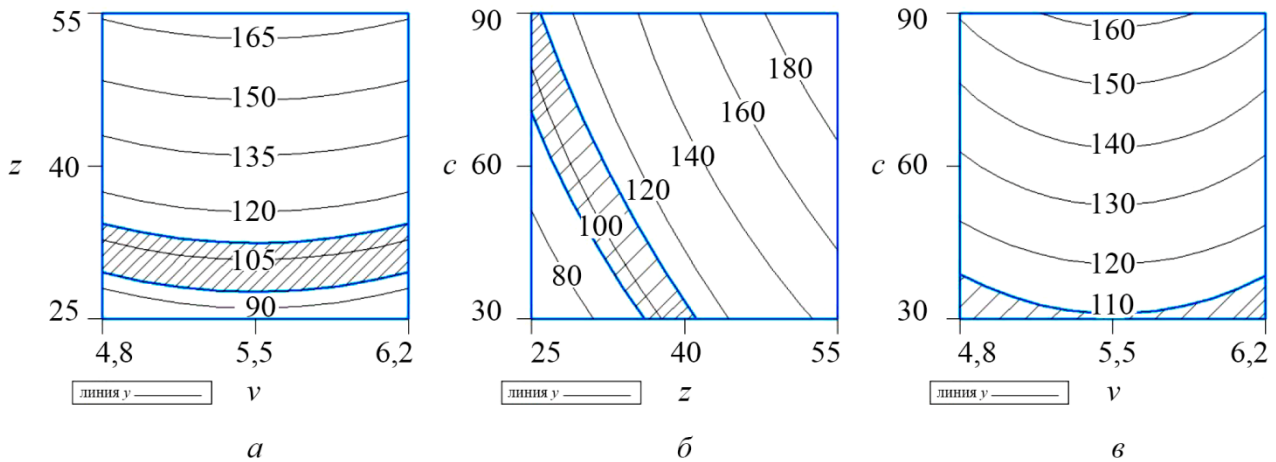


Рис. 3. Сечения отклика угла поворота распределительного вала в зависимости от факторов z и v (а); z и c (б); v и c (в)

4. Заключение

Таким образом, для достижения данного диапазона углов необходимы следующие параметры: сечение пневматического клапана от 29,5 до 34,5 мм², давление в системе от 0,48 до 0,62 МПа, интервал подачи сжатого воздуха в градусах поворота коленчатого вала от 140 до 180°.

Выбор наиболее рациональных режимов работы представленной установки позволит получить наиболее достоверные данные, что в конечном итоге даст возможность более точно диагностировать состояние двигателя. Данный диагностический комплекс является универсальным: он предназначен не только для двигателя ВАЗ-21083, но и для других бензиновых и дизельных двигателей внутреннего сгорания.

Литература

1. Лившиц В. М., Крашенинников С. В., Пятин С. П. Перспективные разработки в области диагностики автотракторных дизелей // Вестник ИрГСХА. – 2010. – № 38. – С. 77–81.
2. Зотов С. В., Мезин И. Ю., Касаткина Е. Г. Анализ современных методов диагностирования ДВС автомобилей // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2016. – Т. 1. – С. 247–250.
3. Полторыхин Н. Н., Никифоров М. В., Панов Ю. А. Анализ средств диагностики в дизельных двигателях // Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция «Образование, инновации, цифровизация: взгляд регионов», Тверь, 15 февраля 2022 г. : сборник научных трудов. – Тверь : ФГБОУ ВО Тверская ГСХА, 2022. – С. 279–281.
4. Демаков К. К. Методы диагностики поршневых двигателей внутреннего сгорания анализом газодинамических параметров картерных газов // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2021. – Т. 1. – С. 16–21.
5. Просвиров Ю. Е., Басов С. А. Надежность работы и методы диагностики цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2010. – № 2 (38). – С. 40–45.
6. Данилов И. К., Попова И. М. Анализ методов, разработка и экономическое обоснование средства диагностирования цилиндропоршневой группы ДВС // Проблемы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта, Москва, 01–06 февраля 2017 г. : сборник научных трудов по материалам 75-ой научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ. – М. : Техполиграфцентр, 2017. – С. 51–57.
7. Шевцов Ю. Д., Журавлев М. М. Перспективные способы диагностирования двигателей внутреннего сгорания // Инновации. Наука. Образование. – 2021. – № 36. – С. 1603–1608.

8. Сиваков В. В., Грядунов С. С., Деревягин. Р. Ю. Совершенствование диагностирования автомобилей тепловизионным способом // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2021. – № 3. – С. 79–87. – DOI: 10.15593/24111678.
9. Аксенов А. А., Худякова М. В. Современные подходы к диагностированию дизельных двигателей внутреннего сгорания // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3, № 5–3 (16–3). – С. 7–10.
10. Кошевенко А. В. Поиск неисправностей дизеля // Техника и оборудование для села. – 2008. – № 3. – С. 44–45.
11. Никифоров М. В., Панов Ю. А., Полторыхин Н. Н. Методика диагностирования ДВС путем принудительной подачи сжатого воздуха в цилиндр двигателя // Развитие научно-инновационного потенциала аграрного производства: проблемы, тенденции, пути решения, Тверь, 25 октября 2022 г. : сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. – Тверь : Тверская государственная сельскохозяйственная академия, 2022. – С. 337–339.
12. Полторыхин Н. Н., Никифоров М. В., Панов Ю. А. Анализ неисправностей и их причины в дизелях // Инновационные технологии в АПК: проблемы и перспективы, Тверь, 12–14 октября 2021 г. : материалы Международной научно-практической конференции. – Тверь : Издательство Тверской ГСХАС. – С. 218–222.
13. Marley C. J., Woods D. C. A comparison of design methods and model selection for experiments with oversaturation // Computational statistics and data analysis. – 2010. – Vol. 54, iss. 12. – P. 3158–3167. – DOI: 10.1016/j.csda.2010.02.017.
14. Автоматизация проведения многофакторного эксперимента / А. В. Павлик, В. А. Дергачев, А. С. Савельев, А. Н. Аникин // Современная техника и технологии. – 2014. – № 6 (34). – С. 25.
15. Джашеев К. А. М., Джашеева З. А. М. Номограммный метод анализа результатов многофакторного эксперимента // Современные наукоемкие технологии. – 2008. – № 8. – С. 3.
16. Скворцов В. С., Лазаренко О. И. Методика построения статической регрессионной многофакторной модели по данным эксперимента с факторным планированием волоконно-оптического гироскопа // Информационно-технологический вестник. – 2021. – № 4 (30). – С. 103–110.
17. Резник Н. А. Многофакторный эксперимент (технология и результаты) // Образовательные технологии и общество. – 2012. – Т. 15 (1). – С. 436–452.
18. Денисов В. И., Лисицин Д. В., Гаврилов К. В. Планирование эксперимента при оценивании параметров многофакторной модели по неоднородным наблюдениям // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2002. – Т. 5 (4). – С. 14–28.
19. Кошевой Н. Д., Сухобрус Е. А. Сравнительный анализ методов оптимизации многоуровневых планов многофакторного эксперимента // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2012. – № 1 (26). – С. 53–58.
20. Establishment of the Reynolds criterion for ultrasonic cleaning of exhaust gases of internal combustion engines / Sh. Suyunbayev, B. Sarsembekov, B. Suleyev, A. Kukeshva // Proceedings of the University. – 2022. – No. 1 (86). – P. 175–181. – DOI 10.52209/1609182520221175.