

---

---

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ  
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

---

---

УДК 631.3

**ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ОТКАЗОВ ДВИГАТЕЛЯ  
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПУТЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ ЦИФРОВОГО  
АНАЛИТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ**© 2025 г. Н. С. Севрюгина<sup>1, \*</sup>, А. Г. Арженковский<sup>1</sup>, А. С. Апатенко<sup>1</sup><sup>1</sup> *Российский государственный аграрный университет –**МСХА им. К. А. Тимирязева”, Москва, Россия**\* e-mail: nssevr@yandex.ru*

Поступила в редакцию 02.09.2024 г.

После доработки 26.01.2025 г.

Принята к публикации 20.02.2025 г.

Установлено, что мониторинг-диагностика технического состояния и эффективности работы ДВС в режиме реального времени достаточно затратен не столько в сборе данных, сколько в адекватности модели обработки данных и их интерпретации. Разработан алгоритм создания библиотеки программы глубокого обучения на основе имеющегося банка данных о работе ДВС на различных нагрузочных режимах. В результате мониторинга ДВС выполнено видео эндоскопирования элементов цилиндропоршневой группы по установлению отклонений от нормативного состояния, проведена обработка данных с помощью ELM327 и программы Forscan. Предложено обработку данных на первом этапе проводить комбинированным методом, идентификацию отклонений вести на основе экспертного анализа, сопоставляя их с результатом принятия решения цифровым модулем. Это позволит дать оценку обоснованности принятия решения программным модулем искусственного интеллекта на основе глубокого обучения и исключить появление ошибочного решения.

*Ключевые слова:* двигатель внутреннего сгорания, надежность, отказы, контроль, цифровые технологии

**DOI:** 10.31857/S0235711925030136, **EDN:** GNTGSP

**Постановка проблемы.** Силовые агрегаты технологических машин, двигатели внутреннего сгорания (ДВС), являются ключевыми конструктивными элементами. Эффективное поддержание их работоспособного состояния играет большую роль в процессе эксплуатации в целом.

Постоянное усложнение конструкции технологических машин приводит к увеличению числа подсистем сопряжения, при которых даже незначительные неисправности ДВС приводят к снижению общей надежности [1].

Производители технологических машин закладывают проектную надежность, которая обеспечивается в эксплуатационный период за счет технического обслуживания по состоянию, устранения неисправности. Тем самым снижаются риски появления новых неисправностей и предотвращаются отказы систем [2, 3].

Исследования показывают, что диагностика технического состояния и эффективности работы ДВС (ДТСиЭР ДВС) путем сбора данных через мониторинг сигналов

с датчиков является в настоящее время оптимальным способом сохранения работоспособного состояния двигателя и поддержания проектной надежности. Признаки неисправности обнаруживаются методами обработки и анализа сигналов с датчиков, в основном с использованием сигналов вибрации, изменения силы тока, угловой скорости, давления, шума и температуры, что с экономической точки зрения признано эффективным. Однако в условиях вариативности нагрузочных характеристик система аналоговых датчиков не справляется с задачей получения точного сигнала, характеризующего отдельные признаки неисправностей [4].

С развитием цифровых технологий все более широко используются методы, основанные на больших данных, использовании нейронных сетей глубокого обучения. Например, для выполнения диагностики необработанных сигналов вибрации двигателя предложена модель сверточной нейронной сети с многомасштабным ядром [5, 6].

Несмотря на достаточное разнообразие создаваемых интеллектуальных методов диагностики неисправностей двигателя на основе глубокого обучения, в практических приложениях существуют серьезные ограничения.

Алгоритмы глубокого обучения в значительной степени зависят от достаточного количества данных для обучения модели, что трудно выполнимо в разрозненной информационной базе данных режимов эксплуатации и состояния единичной технологической машины в АПК [7–9].

Очевидно, что постоянный мониторинг ДТСиЭР ДВС достаточно затратен в части не столько сбора данных, сколько в модели обработки данных и их интерпретации. Традиционный механизм исследования в случае с ДВС предполагает принятие решения после серии повторов, сбор значительного количества данных с метками неисправностей за длительное время эксплуатации с данной неисправностью, как наступившей, так и после ее устранения. Этот метод несет неоправданные трудовые, временные и экономические затраты, а также ведет к аварийным ситуациям, т. к. экспериментам зачастую требуется подтверждения установленных последствий различных видов неисправностей [10, 11].

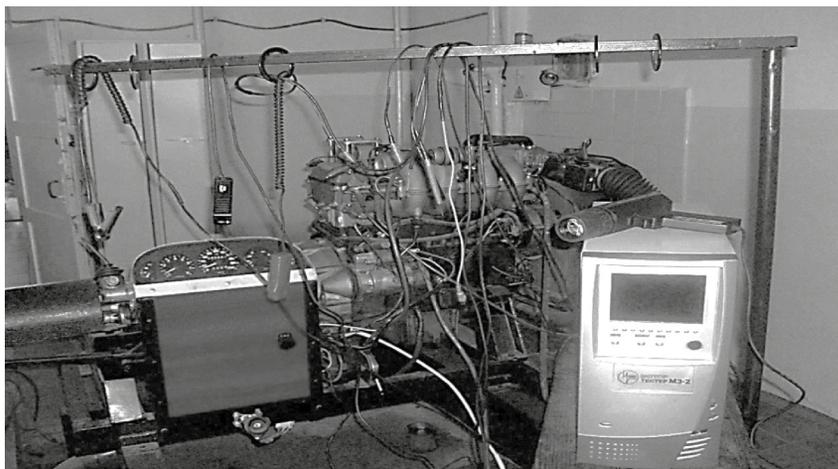
**Цель исследований** – поддержание проектной надежности ДВС путем контроля технического состояния в режиме реального времени с корректировкой сервисных и ремонтных воздействий путем применения цифровых технологий глубокого обучения и предотвращения элементарных отказов.

**Материалы и методы исследования.** В работе [12] выходом из такой проблемы названа организация более качественного сбора данных в период технического обслуживания, но установлено, что полученный банк данных нельзя использовать для цифровой модели напрямую, принимая допущения по ряду факторов, выполняя осреднение данных, что также не позволяет получить достоверного результата [13].

Исследованиями подтверждено, что становится непрактичными серии экспериментов на нескольких однородных объектах для получения осредненного значения считываемого параметра при ряде допущений на факторные признаки влияния. Быстрое развитие технологий интеллектуального производства позволило активизировать моделирование цифровых двойников (digital twin, DT), обеспечивающих новый способ доступа к состоянию физического объекта за счет совмещения его с виртуальной моделью [14].

Сбор данных о состоянии моделирования с применением DT-модели является альтернативным способом более надежной диагностики неисправностей для ограниченного количества сигнальных датчиков (реперных меток сбора данных). При всем разнообразии архитектурного моделирования цифровых двойников остается актуальной задача повышения точности получаемых данных диагностирования и адекватности их интерпретации реальным условиям.

**Результаты исследований и обсуждение.** Двигатели различных технических средств комплектуют системами повышения эксплуатационных показателей, а для контроля эффективности работы устанавливают комплект датчиков. Например, индуктивный датчик при установке в кожухе маховика со стороны зубчатого венца позиционируется в ВМТ первого цилиндра ДВС; датчик давления обеспечивает контроль во впускном трубопроводе перед форсункой первого цилиндра. Комплекс датчиков позволяет получить количественные показатели давления наддува, полной и цилиндровой мощности, а также угла опережения подачи топлива при различных угловых скоростях коленчатого вала в период эксплуатации ДВС. Можно также установить косвенные характеристики, оценивая состояние турбокомпрессора, цилиндропоршневой группы и системы топливоподачи в реальных условиях эксплуатации ДВС (рис. 1).



**Рис. 1.** Испытательный модуль для оценки технического состояния ДВС.

Современные цифровые системы позволяют перевести систему контроля в автоматизированный режим, а применение нейронных сетей для обработки информационного модуля из банка данных облачных технологий позволяет создать диагностическую модель эффективности работы ДВС и машины в целом.

Недостаточно накопить информационный ресурс, его нужно обработать и интерпретировать, для чего применяют программные приложения искусственного интеллекта, адаптированные к задачам глубокого обучения.

Эффективность создания архитектуры модели с функцией глубокого обучения (фреймворков) для ДТСиЭР ДВС реализуют через способность самостоятельно развиваться без дополнительного программирования. Алгоритмы фреймворков используют для улучшения компьютерного зрения, такого как классификация объектного изображения с последующей обработкой аналитических данных (рис. 2).

Предлагаемая модель предусматривает наличие банка данных, но в начальном периоде диагностика технического состояния и эффективности работы ДВС (ДТСиЭР ДВС) будет выполняться в условиях ограниченного массива информации. В последующие же периоды интеллектуальная система на основе цифрового двойника будет находиться в режиме постоянного глубокого обучения за счет непрерывного получения измеренных данных в режиме реального времени от физического объекта – ДВС. Дополнительно к этому в режиме имитационного моделирования могут создаваться запросные ситуации состояний с последующей предиктивной аналитикой полученных результатов и корректировкой регулировочных характеристик на ДВС, изменением

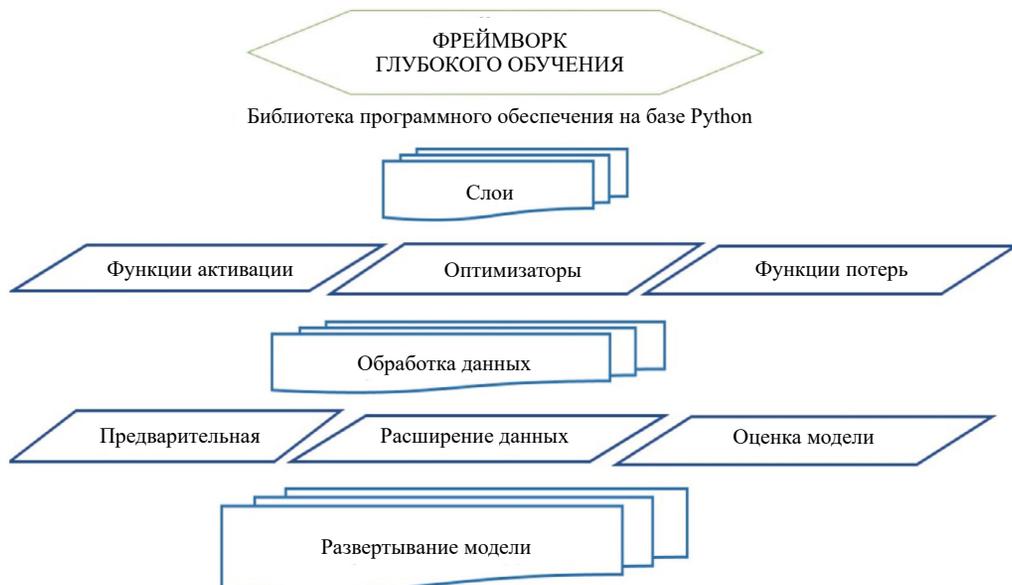


Рис. 2. Алгоритм формирования библиотеки программ глубокого обучения.

режимов нагружения, периодичности обслуживания/ремонта и недопущением снижения эксплуатационной эффективности или отказов.

В процессе обработки видеоданных формируются понятийный аппарат изображения и алгоритм интерпретации информации, ее кодирования, составления отчета. Для примера можно использовать модуль диагностики ДВС с помощью ELM327 и программы Forscan (рис. 3).

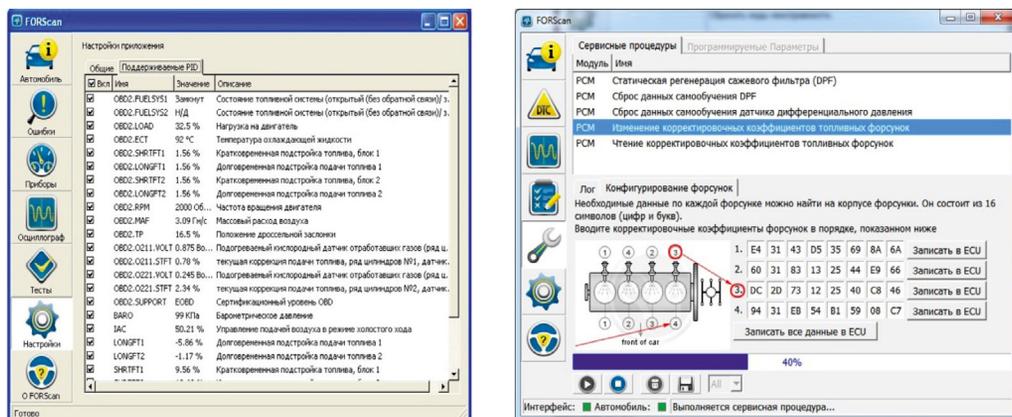


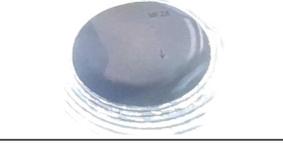
Рис. 3. Диалоговое окно модуля диагностики ДВС с помощью ELM327 и программы Forscan.

Следует отметить, что для различных моделей ДВС характерна общность признаков изменения физического состояния элементной базы, в данном случае – цилиндропоршневой и клапанной групп.

Сканирование ориентировано на выделение таких факторов, как наличие нагара, задиров, выкрашивание металла, общие признаки отклонения от типового состояния для элементов цилиндропоршневой группы (состояние днища поршня, зеркала цилиндра двигателя); состояние клапанной группы – головок впускного и выпускного клапанов.

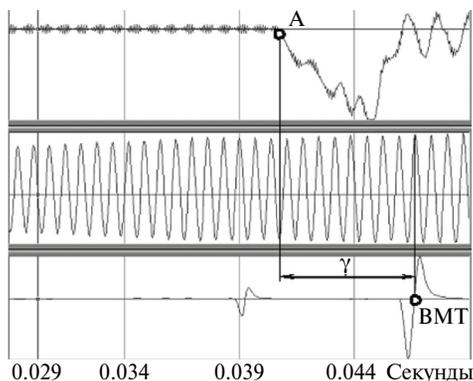
Полученные результаты обследования пространства камеры сгорания безразборным методом с использованием эндоскопа представлены в табл. 1: (а) – вид днища поршня; (б) – вид зеркала цилиндра; (в) – нагар на гильзе и поршне; (г) – вид головок клапанов.

**Таблица 1.** Результаты мониторинга ДВС путем видеоэндоскопирования элементов цилиндро-поршневой группы для установления отклонений от нормативного состояния

ДВС	Визуализация сканера для компьютерной обработки			
	Поршень – гильза цилиндра			Клапанная группа
	(а)	(б)	(в)	(г)
1-й цилиндр				
2-й цилиндр				
3-й цилиндр				
4-й цилиндр				

Дополнительно к визуализации физического состояния элементов ДВС представлены данные, косвенно характеризующие состояния ДВС, такие как показатели датчиков.

В качестве примера представлена инфограмма фрагмента снятия показаний в совмещенной осциллограмме изменения ЭДС используемых датчиков относительно функции времени (рис. 4) [15].



**Рис. 4.** Результаты контроля состояния ДВС: т. А – момент начала возрастания давления в топливопроводе; т. ВМТ – нахождение поршня 1-го цилиндра в ВМТ такта сжатия;  $\gamma$  – угол опережения подачи топлива, определяется расчетным путем.

Сценарий обработки данных имеет несколько вариантов: 1) идентификация отклонений на основе экспертного анализа; 2) глубокое обучение нейронной сети на основе сопоставления изменений физического состояния элементов конструкции с параметрическими данными мониторинга, интерпретация возможных изменений на основе косвенных признаков диагностирования.

В представленных вариантах не следует отдавать предпочтение отдельно каждому, а их совмещение позволяет давать оценку обоснованности принятия решения ИИ на основе глубокого обучения и исключить ошибочные решения.

**Вывод.** Разработана методика сбора и обработки данных эндоскопии контроля технического состояния компонентов ДВС. Предложен алгоритм интерпретации данных для создания информационного банка изменения нагрузочных режимов двигателя с последующей обработкой в цифровом модуле приложений глубокого обучения искусственного интеллекта и принятием решения о ресурсной работоспособности ДВС.

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021/1196/1 от 08.10.2021 “Приоритет 2030”, “Программа развития РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева”.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вайнштейн В. И., Вайнштейн И. И.* Оптимизационные задачи формирования смеси функций распределения наработок до отказа элементов технических систем // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021. № 3. С. 107–112.  
<https://doi.org/10.31857/S0235711921030160>
2. *Путинцев С. В., Аникин С. А., Стрельникова С. С.* Обоснование и результаты численного моделирования струйного маслоснабжения сопряжения “цилиндр–поршень” в быстроходном четырехтактном двигателе внутреннего сгорания // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2023. № 3. С. 89–99.
3. *Stoumpos S., Bolbot V., Theotokatos G., Boulougouris E.* Safety performance assessment of a marine dual fuel engine by integrating failure mode, effects and criticality analysis with simulation tools // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment. 2022. V. 236(2). P. 376–393.  
<https://doi.org/10.1177/14750902211043423>
4. *Арженовский А. Г., Чичиланов И. И.* Совершенствование методики и средств диагностирования дизельных двигателей: монография. Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт, 2017. 176 с.
5. *Wang D., Zhang M., Xu Y., Lu W., Yang J., Zhang T.* Metric-based meta-learning model for few-shot fault diagnosis under multiple limited data conditions // Mechanical Systems and Signal Processing. 2021. V. 155. 107510.  
<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107510>
6. *Tao F. et al.* Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2018. V. 67 (1). P. 169.  
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.055>
7. *Пастухов А. Г., Тимашов Е. П., Бахарев Д. Н.* Обобщенная оценка основных факторов при проектировании техники и технологий в агроинженерии // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2021. № 1 (29). С. 17–26.
8. *Голубев И. Г., Мишуров Н. П., Федоренко В. Ф. и др.* Цифровизация в сфере технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственной техники: Монография. М.: Росинформаротех, 2023. 80 с.
9. *Soloviev D. A., Rusinov A. V., Zagoruyko M. G. et al.* Investigation of the movement of multi-support frontal machines // Improving Energy Efficiency, Environmental Safety and Sustainable Development

- in Agriculture: International Scientific and Practical Conference, Saratov, 20–24.10.2021. London: IOP Publishing Ltd, 2022. P. 012059.  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/979/1/012059>
10. *Sevryugina N. S., Volkov E. A., Litovchenko E. P.* Justification for Remote Control of Construction and Road-Making Machines // *Modern Applied Science*. 2014. V. 8(5). P. 179.  
<https://doi.org/10.5539/mas.v8n5p179>
  11. *Golubev I. G., Apatenko A. S., Sevryugina N. S. et al.* A Maintenance and Repair Decision Support Model for Transport and Technological Machines // *J. Mach. Manuf. Reliab.* 2023. V. 52. P. 391–399.  
<https://doi.org/10.3103/S1052618823040064>
  12. *Deng M., Deng A., Shi Y., Liu Y., Xu M.* A novel sub-label learning mechanism for enhanced cross-domain fault diagnosis of rotating machinery // *Reliability Engineering & System Safety*. 2022. V. 225. P. 108589.  
<https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108589>
  13. *Wang H., Xu J., Yan R., Gao R. X.* A New Intelligent Bearing Fault Diagnosis Method Using SDP Representation and SE-CNN // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2019. V. 1–1. 12 p.  
<https://doi.org/10.1109/tim.2019.2956332>
  14. *Тынченко Я. А., Кукарцев В. В., Башмур К. А., Сяоган Ву, Севрюгина Н. С.* Вероятностный анализ показателей надежности насосов с помощью нейронной сети // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024. № 7–1. С. 126–136.  
[https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2024\\_71\\_0\\_126](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_71_0_126)
  15. *Lebedev A. T., Arzhenovskiy A., Zhurba V. V. et al.* Operational Management of Reliability of Technical Systems in the Agro-Industrial Complex // *XIV International Scientific Conference “INTER-AGROMASH 2021”: Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry*. Rostov-on-Don, 24–26.02.2021. Springer Verlag: Springer Verlag, 2022. V. 1. P. 79–87.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-81619-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81619-3_9)