

Научная статья
УДК 621.43

Автоматизация моторного стенда для повышения эффективности испытаний двигателей внутреннего сгорания

Павел Витальевич Душкин¹, Алексей Сергеевич Селезнёв²

^{1,2}Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹pavel.dushkin@madi.ru, <https://orcid.org/0009-0006-2861-7434>

²alexe1seleznev@yandex.ru

Аннотация. Испытательные стенды для двигателей внутреннего сгорания (моторные стенды) – дорогостоящее оборудование, поэтому целесообразно вместо приобретения нового стенда модернизировать имеющееся оборудование. Тем более в настоящее время в испытательных станциях и лабораториях широко представлены стенды предыдущих поколений производства Vsetin, которые хорошо поддаются дооснащению современными контрольно-измерительными приборами и средствами автоматизации. Цель – повышение эффективности испытаний ДВС с помощью автоматизации. Проверка результатов работы проводится на примере исследования теплового баланса двигателя ВАЗ 21124. Для достижения поставленной цели при технической поддержке компании ОВЕН установлены новые: измерительные приборы, ПЛК (программирующий логический контроллер) и компьютер со SCADA-системой. Полученные результаты позволяют снизить временные затраты на проведение испытаний, повысить достоверность результатов и перейти к более современным методам сбора и обработки данных.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, ДВС, моторный стенд, программируемый логический контроллер, ПЛК, автоматизация.

Для цитирования: Душкин П.В., Селезнёв А.С. Автоматизация моторного стенда для повышения эффективности испытаний двигателей внутреннего сгорания // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2026. № 1 (47).

Original article

Automation of a test bench to improve the efficiency of testing internal combustion engines

Pavel V. Dushkin¹, Alexey S. Seleznev²

^{1,2}Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

¹pavel.dushkin@madi.ru, <https://orcid.org/0009-0006-2861-7434>

²alexe1seleznev@yandex.ru

Abstract. Test benches for internal combustion engines (ICE) are expensive equipment. Therefore, rather than purchasing a new stand, it is sometimes more cost-effective to modernize existing equipment. Moreover, currently, many testing stations and laboratories still use Vsetin-manufactured stands from previous generations, which can be readily modernized with modern control, measurement, and automation equipment. The aim is to improve the efficiency of ICE testing through automation. The upgraded test bench is then tested by measuring the thermal energy balance of the spark-ignition ICE. To achieve this goal, the following components were installed: modern measuring instruments, a programmable logic controller (PLC), and a SCADA-equipped computer. The results obtained make it possible to reduce the time for testing, increase the reliability of the results, and switch to more modern methods of data collection and processing.

Keywords: internal combustion engine, spark-ignition engine, motor stand, programmable logic controller, PLC, automation.

For citation: Duskin P.V., Seleznev A.S. Automation of a test bench to improve the efficiency of testing internal combustion engines. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2026. No. 1 (47).

Введение

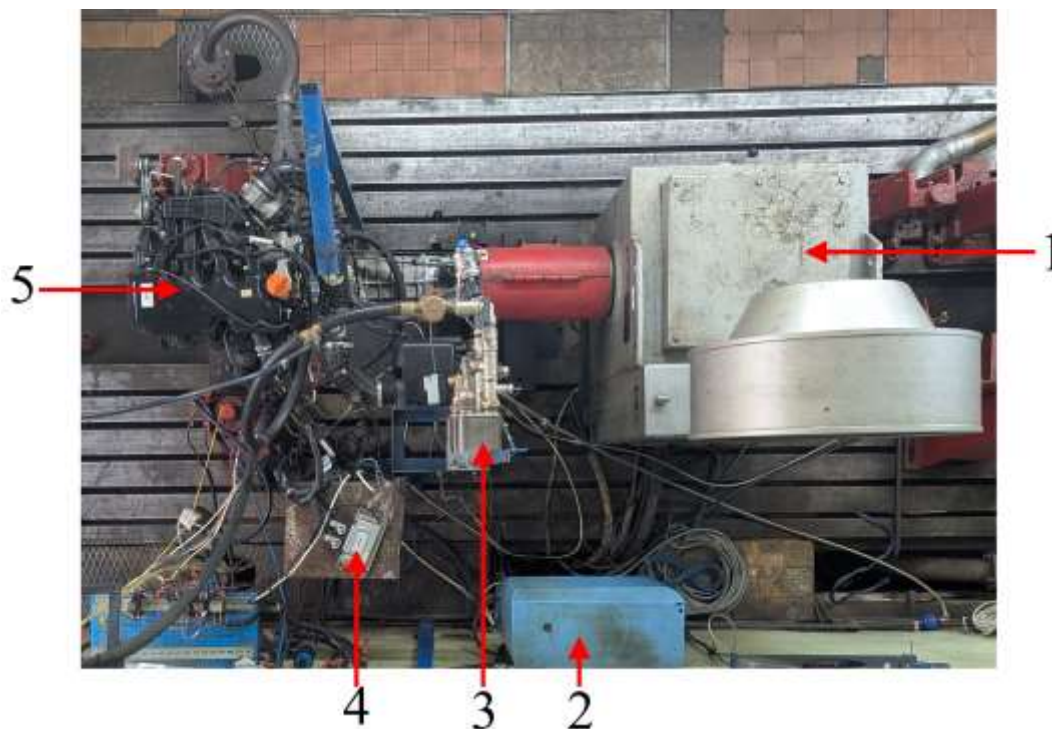
Испытания двигателей внутреннего сгорания – продолжительный и дорогостоящий процесс, поэтому исследования в направлении их автоматизации ведутся с момента появления первых подходящих технических средств [1, 2]. Наряду с общепринятыми подходами к автоматизации появляются новые, например, калибровка систем управления с помощью эмпирических моделей [3, 4] или использование методов по автоматическому поиску оптимальных регулировок [5].

Для проведения автоматизированных испытаний не всегда необходимо приобретение нового оборудования. Многие задачи можно решить модернизацией имеющегося стенда с помощью современных программируемых устройств. Пример такой модернизации представлен в данной публикации.

Моторный стенд для испытаний двигателей внутреннего сгорания

В основе моторного стенда (рис. 1) находится электрическая машина постоянного тока производства Vsetin (1989 год выпуска), предназначенная для нагружения ДВС и его прокрутки.

Преимущества данного стенда: возможность рекуперации энергии торможения ДВС в электрическую сеть, система обеспечения плавного пуска умформера (мотор-генератора системы Вард-Леонарда) и встроенная автоматизация для поддержания заданной частоты вращения [6].



*Рис. 1. Моторный стенд для проведения лабораторной работы:
1 – балансирная машина Vsetin; 2 – топливный расходомер; 3 – теплообменный аппарат;
4 – блок управления двигателем ИТЭЛМА М86;
5 – испытываемый двигатель внутреннего сгорания*

Автоматизация измерений

В пультовом отсеке бокса расположена приборная стойка (рис. 2), дополненная при технической поддержке компании ОВЕН приборами: ПЛК150 (программируемый логический контроллер) и терморегулятор (ТРМ12). Это позволило отказаться от использования устаревших показывающих приборов (3, см. рис. 2).

Назначение терморегулятора – измерение температуры охлаждающей жидкости (ОЖ) на входе и выходе из теплообменного аппарата, управление регулирующим краном для поддержания заданной температуры ОЖ по ПИД-закону [7] и передача этой информации на ПЛК по шине RS-485 [7, 8].

ПЛК в свою очередь тоже проводит комплекс измерений и передаёт данные в удобный графический интерфейс (SCADA-систему, рис. 3) [7, 8].



Рис. 2. Монтаж приборов в пультовом отсеке бокса

В результате обеспечены следующие измерения:

- частота вращения коленчатого вала двигателя n ;
- температура отработавших газов t_r (с помощью датчика ТХА [9]);
- температура охлаждающей жидкости на входе и выходе из системы охлаждения ДВС ($t_{\text{вых}}$, $t_{\text{вх}}$, с помощью датчиков ТСМ50 [9]);
- расход жидкости в горячем контуре системы охлаждения ДВС $G_{\text{ж}}$;
- крутящий момент двигателя M_k ;
- расход топлива G_t ;
- температура воздуха в моторном отсеке бокса.

Интерфейс SCADA-системы представляет собой схематичное изображение испытательной установки (рис. 3), что делает контроль измерений наглядным для инженера-испытателя.

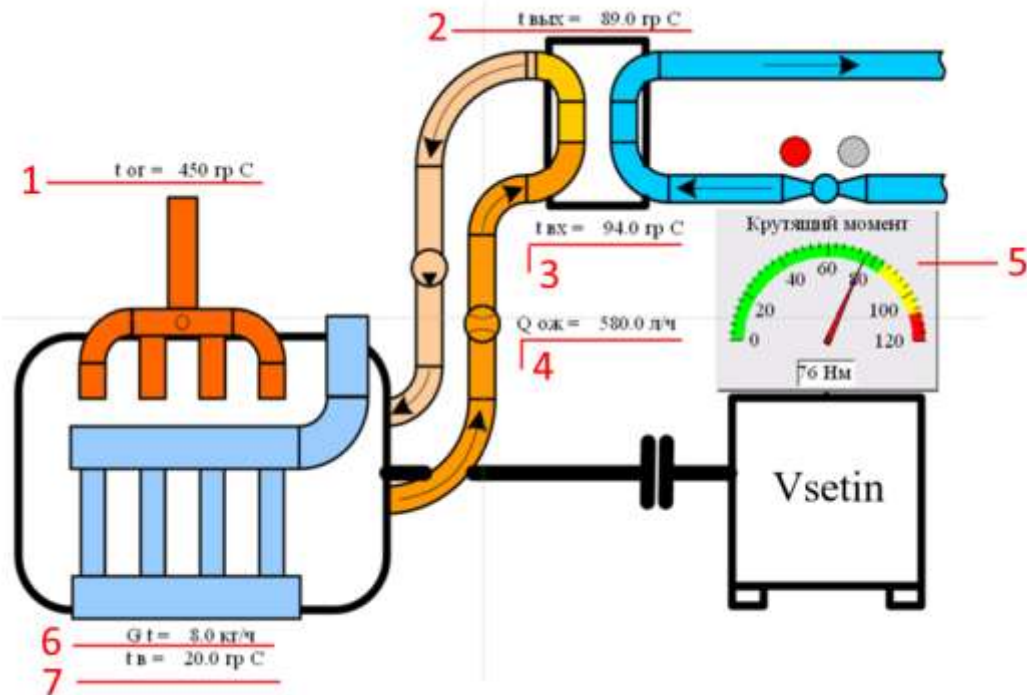


Рис. 3. Интерфейс SCADA-системы: 1 – температура отработавших газов; 2 и 3 – температура охлаждающей жидкости на выходе и входе в теплообменный аппарат системы охлаждения; 4 – водосчетчик; 5 – крутящий момент; 6 – массовый расход топлива; 7 – температура воздуха в боксе

Результат измерения M_k до вывода в SCADA-систему фильтруется ЕМА-фильтром (экспоненциальная скользящая средняя):

$$M_{k-i}^{\text{фильтр}} = \alpha \cdot M_{k-i} - (1 - \alpha) \cdot M_{k-i-1}^{\text{фильтр}}, \quad (1)$$

где $M_{k-i}^{\text{фильтр}}$ и $M_{k-i-1}^{\text{фильтр}}$ – фильтрованный крутящий момент на текущем и предыдущем вызове задачи фильтрации, α – коэффициент фильтра.

Автоматизация технических процессов

Благодаря использованию промышленного контроллера (ПЛК), налажена автоматизация некоторых процессов.

Расчёт расхода топлива

Используемый в лабораторном боксе топливный расходомер (2, см. рис. 1) – это весы, с установленными на них промежуточным топливным баком объёмом 350 мл. Для работы расходомера ПЛК

обеспечивает контроль наполнения бака и рассчитывает расход топлива по выражению:

$$G_t = \frac{m_t^1 - m_t^2}{\Delta t}, \quad (2)$$

где m_t^1 и m_t^2 – масса топлива в начале и конце измерения, Δt – продолжительность измерения. Размерности величин в выражении 1 приводятся к кг/ч.

Термостабилизация двигателя

Для обеспечения заданного теплового режима двигателя используется терморегулятор ТРМ12, который по обратной связи с датчиком температуры охлаждающей жидкости регулирует расход холодной воды во внешнем контуре теплообменного аппарата (3, см. рис. 1). В качестве исполнительного механизма используется регулирующий водопроводный кран с двухпозиционным управлением.

Благодаря подключению ТРМ12 к ПЛК осуществляется диспетчеризация управления регулирующим краном, предусматривающая состояния: 0 – регулирование отключено, ручное управление, 1 – нормальная работа, 3 – прогрев холодного ДВС, 10 – авария по перегреву.

Предотвращение аварийных состояний

Дополнительно обеспечивается аварийное отключение топливоподачи (размыкание промежуточного реле цепи питания топливных форсунок) при превышении допустимых значений температуры охлаждающей жидкости или отработавших газов.

Общая архитектура автоматизированной системы показана на рис. 4.

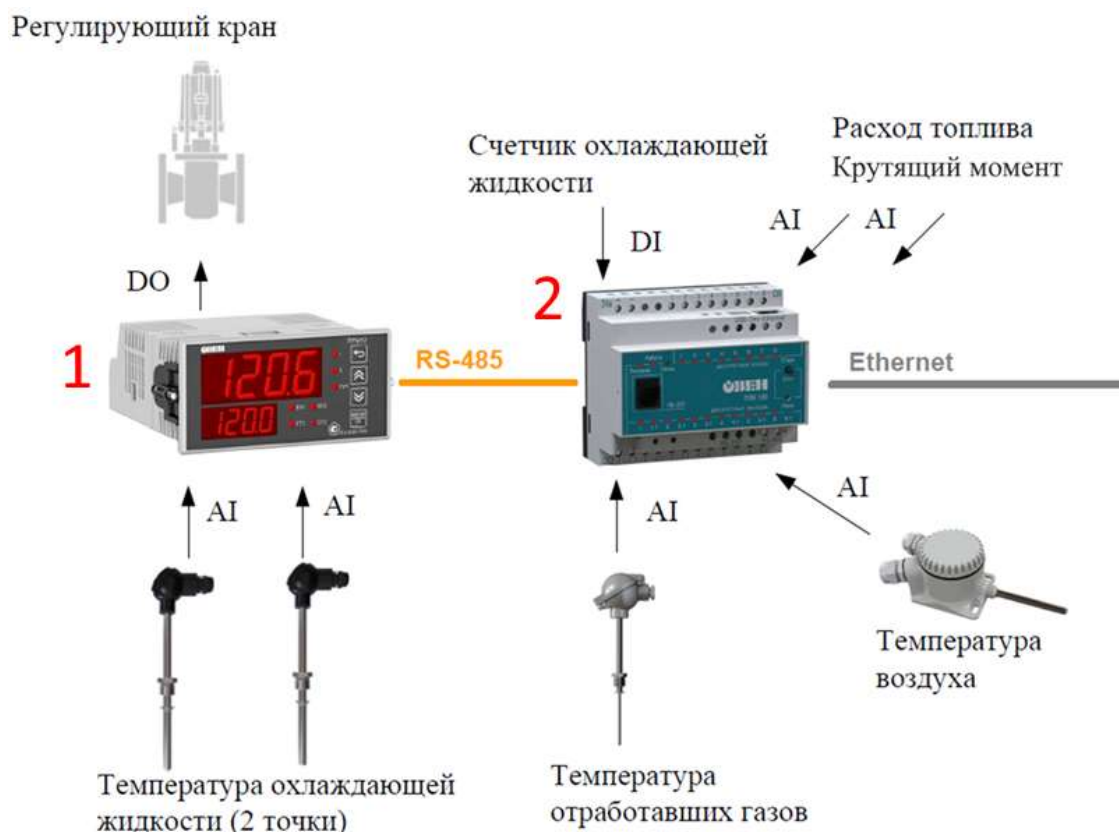


Рис. 4. Архитектура автоматизированной системы:

1 – терморегулятор ТРМ12, 2 – программируемый логический контроллер

Апробация результатов

Благодаря обновлению оборудования удалось провести работу по оценке потерь теплоты в систему охлаждения двигателя ВАЗ 21124 и влиянию температуры охлаждающей жидкости на показатели его рабочего цикла.

Так, при работе по внешней скоростной характеристике относительные тепловые потери в систему охлаждения ($Q_{о.ж}$) снизились с 17% до 10% при увеличении частоты вращения с $n=1000 \text{ мин}^{-1}$ до $n=4000 \text{ мин}^{-1}$. Причина – уменьшение времени контакта горячего рабочего тела с холодными стенками цилиндра двигателя.

Расчёт потерь теплоты в систему охлаждения $Q_{о.ж}$ осуществляется по выражению [10]:

$$Q_{о.ж} = c_v (t_{вых} - t_{вх}) \cdot G_{ж} \cdot 10^3, \text{ кДж/ч}, \quad (3)$$

где c_v – удельная теплоемкость при постоянном объеме ОЖ, Дж/(кг·К).

Поскольку все измерения в (3) обеспечиваются автоматизированной системой, то расчёт $Q_{o.ж}$ производится средствами ПЛК.

Для дальнейшей проверки автоматизированной системы была исследована гипотеза [11, 12] о влиянии температуры охлаждающей жидкости на $Q_{o.ж}$ и, следовательно, показатели рабочего цикла ДВС.

Для этого проводилось изменение $t_{o.ж}$ в диапазоне 70...90 °С на режиме работы: $n = 1500$ мин⁻¹, УОЗ = 20 °ПКВ до ВМТ, цикловое наполнение цилиндра воздухом – близкое к максимальному (положение дросселя постоянно). В результате, при увеличении $t_{o.ж}$ с 70 до 90 С произошло снижение тепловых потерь в систему охлаждения на 15%. При этом экономичность двигателя, улучшилась на 0,7 %. Предположительно, небольшое улучшение экономичности обусловлено увеличением потерь теплоты с отработавшими газами. Крутящий момент при этом сократился на 1,5% из-за снижения коэффициента наполнения η_v вследствие подогрева воздуха, поступающего в цилиндры ДВС.

Выводы

В результате модернизации моторного стенда удалось обеспечить:

- наглядное представление основных измерений;
- заданный тепловой режим двигателя по обратной связи с датчиком температуры охлаждающей жидкости;
- автоматическое измерение расхода топлива с помощью весового расходомера старого образца;
- повышение безопасности проведения работ, благодаря защитному отключению топливоподачи при превышении допустимых температур.

В качестве апробации работы проведено исследование влияния температуры охлаждающей жидкости ($t_{o.ж}$) на показатели рабочего цикла ДВС при частоте вращения $n = 1500$ мин⁻¹ – при увеличении $t_{o.ж}$ с 70 до 90 °С происходит снижение тепловых потерь в систему охлаждения на 15%, улучшение экономичности на 0,7 % и снижение крутящего момента 1,5% (при постоянном положении дроссельной заслонки).

Список источников

1. Сироткин, А. А. Разработка и исследование работы автоматизированного стенда для испытаний двигателей внутреннего сгорания : автореферат диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сироткин Александр Александрович ; МАДИ. – Москва, 1972. – 23 с.
2. Benson, R. S. Recent Advances in Internal Combustion Engine Instrumentation with Particular Reference to High-Speed Data Acquisition and Automated Test Bed / R. S. Benson, R. Pick // SAE Transactions. – 1974. – Vol. 83, Section 3. – P. 2569–2585. – Art. No. 740525-740863. – 17 p.
3. Евдонин, Е. С. Разработка и применение эмпирических моделей для оптимизации управления двигателем внутреннего сгорания / Е. С. Евдонин, П. В. Душкин, А. И. Кузьмин // Труды НАМИ. – 2020. – № 4(283). – С. 101-108. – DOI 10.51187/0135-3152-2020-4-101-108. – EDN GBXFAT.
4. Автоматизация стендовых калибровочных испытаний автомобильного двигателя внутреннего сгорания / Е. С. Евдонин, П. В. Душкин, А. И. Кузьмин [и др.] // Труды НАМИ. – 2021. – № 4(287). – С. 12-21. – DOI 10.51187/0135-3152-2021-4-12-21. – EDN WAAIDG.
5. Подбор коэффициентов ПИД-регулятора применением автоматизированного сценария / А. Г. Ларин, А. А. Шершнева, П. О. Шолом [и др.] // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2021. – № 4(30). – EDN WFNNNG.
6. Пришвин, С. А. Испытания двигателей внутреннего сгорания : учебное пособие в 2-х частях / С. А. Пришвин, П. В. Сафронов, Э. А. Савастенко. – Москва : Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2023. – Ч. I. – 276 с. – EDN MUNSAD.
7. Денисенко, В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием: монография / В. В. Денисенко. – Москва : Горячая линия - Телеком, 2013. – 606 с. – ISBN 978-5-9912-0060-8. – EDN RBAWTF.
8. Карушкин, В. Испытательный стенд тепловозных дизельных двигателей / В. Карушкин // Автоматизация и производство. – 2023. – № 1 (53). – URL: https://aip.com.ru/article/ispitatelnyy_stend_teplovoznyh_dizelnyh_dvigatelay?ysclid=mkz5hqontm624562227 (дата обращения: 01.10.2025).
9. Сидорцев, А. Выбор датчика температуры / А. Сидорцев, И. Опарина // Автоматизация и производство. – 2023. – № 1 (53). – URL: https://aip.com.ru/article/vybor_datchika_temperatury (дата обращения: 01.10.2025).
10. Теория рабочих процессов. Характеристики ДВС: учебно-методическое пособие / В.В. Сиявский и др. – Москва : МАДИ, 2023. – 148 с.
11. Castiglione, T. A Novel Cooling System Control Strategy for Internal Combustion Engines / T. Castiglione, F. Pizzonia, S. Bova // SAE International Journal of Materials and Manufacturing. – 2016. – Vol. 9, No. 2. – P. 294–302.
12. Abdul Jalal, R.I. Engine thermal management with model predictive control : a doctoral thesis / Rifqi Irzuan Bin Abdul Jalal, – England, Loughborough University, 2016.

References

1. Sirotkin A.A. *Razrabotka i issledovaniye raboty avtomatizirovannogo stenda dlya ispytaniy dvigateley vnutrennego sgoraniya* (Development and research of an automated test bench for internal combustion engines), abstract of the candidate's thesis, Moscow, MADI, 1972, 23 p.
2. Benson R.S., Pick R. Recent Advances in Internal Combustion Engine Instrumentation with Particular Reference to High-Speed Data Acquisition and Automated Test Bed, *SAE Transactions*, 1974, vol. 83, Section 3, pp. 2569-2585, Art. No. 740525-740863, 17 p.
3. Evdonin E.S., Dushkin P.V., Kuzmin A.I. *Trudy NAMI*, 2020, no. 4(283), pp. 101-108, doi 10.51187/0135-3152-2020-4-101-108.
4. Evdonin E.S., Dushkin P.V., Kuzmin A.I., Khovrenok S.S., Kremnev V.V. *Trudy NAMI*, 2021, no. 4(287), pp. 12-21, doi 10.51187/0135-3152-2021-4-12-21.
5. Larin A.G., Shershnev A.A., Sholom P.O., Rogachev D.V., Dushkin P.V. *Avtomobil' Doroga. Infrastruktura*, 2021, no. 4(30).
6. Prishvin S.A., Safronov P.V., Savastenko E.A. *Ispytaniya dvigateley vnutrennego sgoraniya* (Testing of internal combustion engines), Moscow, Moskovskiy avtomobil'no-dorozhnyy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet (MADI), 2023, vol. 1, 276 p.
7. Denisenko V.V. *Komp'yuternoye upravleniye tekhnologicheskimi protsessami, eksperimentami, oborudovaniyem* (Computer control of technological processes, experiments, and equipment), Moscow, Goryachaya liniya - Telekom, 2013, 606 p., ISBN 978-5-9912-0060-8.
8. Karushkin V, *Avtomatizatsiya i proizvodstvo*, 2023, no. 1(53), available at: https://aip.com.ru/article/ispytatelnyy_stend_teplovoykh_dizelnykh_dvigatelay?ysclid=mkz5hqm624562227 (01.10.2025).
9. Sidortsev A., Oparina I. *Avtomatizatsiya i proizvodstvo*, 2023, no. 1(53), available at: https://aip.com.ru/article/vybor_datchika_temperatury (01.10.2025)..
10. Sinyavsky V. V. et al. *Teoriya rabochikh protsessov. Kharakteristiki DVS* (Theory of working processes. Characteristics of internal combustion engines): Moscow, MADI, 2023, 148 p.
11. Castiglione T., Pizzonia F., Bova S. A Novel Cooling System Control Strategy for Internal Combustion Engines, *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 2016, vol. 9, no. 2, pp. 294-302.
12. Abdul Jalal R.I. Engine thermal management with model predictive control, doctoral thesis, Loughborough University, 2016.

Рецензент: А.Ю. Дунин, д-р техн. наук, доц., МАДИ

Информация об авторах

Душкин Павел Витальевич, канд. техн. наук, доц., МАДИ.

Селезнёв Алексей Сергеевич, студент, МАДИ.

Information about the authors

Dushkin Pavel L., Candidate of Sciences (Technical), associate professor, MADI.

Seleznev Alexey S., student, MADI.

Статья поступила в редакцию 30.01.2026; одобрена после рецензирования 18.02.2026; принята к публикации 23.03.2026.

The article was submitted 30.01.2026; approved after reviewing 18.02.2026; accepted for publication 23.03.2026.