

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-634830>

Оригинальное исследование



Безразборный метод формирования банка данных о техническом состоянии топливной системы ДВС технологических машин в режиме реального времени

А.Г. Арженовский, Н.С. Севрюгина, А.С. Апатенко

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Экономическая составляющая эффективного функционирования технологических машин заключается в бесперебойной их работе при выполнении различных задач, в таких отраслях, как строительная, дорожная, сельское хозяйство и пр. Учесть разнообразие условий эксплуатации технологических машин и постоянно меняющиеся режимы нагружения в настоящее время возможно путём применения цифровых технологий, позволяющих создавать массивы данных не только в режиме реального времени, но и для индивидуальной машины. Актуальной является задача создания методов сбора информации о режимах работы машины, факторах, вызывающих изменение эффективности функционирования, разработки алгоритмов принятия решения о поддержании работоспособного состояния всех агрегатов и систем машины, не допуская их отказов и непроизводительных простоев машины в целом.

Цель работы — обеспечение эффективного функционирования единичной технологической машины за счёт управления рисками отказов, путём корректировки периодичности технического обслуживания и периодов ремонтно-восстановительных воздействий, на основании полученных в режиме реального времени данных о техническом состоянии и цифровой обработки информации принятия решения.

Методы. Характер изменения технического состояния агрегатов и систем технологических машин в теории систем чаще всего рассматривается как случайный из-за большой вероятности неопределённости факторного влияния. Предложено рассмотреть задачу управления рисками отказов элементов систем и агрегатов технологических машин, используя базовые положения теории выбросов случайных процессов. В качестве объекта исследования выбран дизельный двигатель технологической машины с примером контроля технического состояния топливной системы.

Результаты. Представлено обоснование целесообразности выполнения технического обслуживания и ремонтно-восстановительных воздействий (ТОиР) технологических машин по потребности. Корректировка периодичности ТОиР проводилась по результатам данных изменения показателей функционирования машины, в частности топливной системы ДВС. Для разработки алгоритма формирования массива данных применены типовые архитектуры сбора и обработки информации с применением цифровых платформ принятия решения об интенсивности изменения параметров, в качестве примера представлены осциллограммы изменения давления при работе системы питания ДВС.

Заключение. Разработан модуль диагностики технического состояния и эффективности работы ДВС единичной технологической машины в режиме реального времени. Предложено внедрение интеллектуальной системы принятия решения с последующей трансформацией в образ цифрового двойника управления рисками отказов и контроля эффективности функционирования машины для различных условий эксплуатации.

Ключевые слова: технологическая машина; эксплуатация; контроль; отказы; цифровизация; данные.

Как цитировать:

Арженовский А.Г., Севрюгина Н.С., Апатенко А.С. Безразборный метод формирования банка данных о техническом состоянии топливной системы ДВС технологических машин в режиме реального времени // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 6. С. 808–818.
DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-634830>

Рукопись получена: 03.08.2024

Рукопись одобрена: 22.12.2024

Опубликована online: 08.01.2025

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-634830>

Original Study Article

An in-place method of forming a database on the technical condition of the internal combustion engine fuel system of technological machines in real time

Alexey G. Argenovskiy, Nadezhda S. Sevryugina, Alexey S. Apatenko

Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The economic component of the effective functioning of technological machines consists in their uninterrupted operation when performing various tasks in such industries as construction, road, agriculture, etc. It is currently possible to take into account the variety of operating conditions of technological machines and constantly changing loading modes by using digital technologies that allow creating an array of databases not only in real time, but also for an individual machine. A relevant task is to create methods for collecting information about the operating modes of the machine, the factors causing changes in the efficiency of operation, the development of algorithms for making decisions about maintaining the working condition of all units and systems of the machine, preventing their failures and non-production downtime of the machine as a whole.

OBJECTIVE: Ensuring the effective functioning of a single technological machine by managing the risks of failures, by adjusting the frequency of maintenance and periods of repair-and-restoration activities based on the real-time data on the technical condition and digital processing of decision-making information.

METHODS: The nature of changes in the technical condition of units and systems of technological machines in the theory of systems is most often considered as random due to the high probability of uncertainty of factorial influence. It is proposed to consider the problem of failure risk management of system elements and units of technological machines using the basic provisions of the excursion theory. The object of the study is a diesel engine of a technological machine with an example of monitoring the technical condition of the fuel system.

RESULTS: The justification of the expediency of performing maintenance and repair-and-restoration activities (MaR) of technological machines as required is presented. The adjustment of the MaR frequency was carried out based on the data of changes in the performance of the machine, in particular the internal combustion engine fuel system. To develop an algorithm for the formation of a data array, typical architectures for collecting and processing information using digital platforms for decision-making on the intensity of parameter changes are used, as an example, oscillograms of pressure changes during the operation of the internal combustion engine fuel system are presented.

CONCLUSIONS: A module for diagnosing the technical condition and efficiency of the internal combustion engine of a single technological machine in real time has been developed. It is proposed to introduce an intelligent decision-making system with subsequent transformation into the form of a digital twin of failure risk management and control of the efficiency of the machine for various operating conditions.

Keywords: technological machine; operation; control; failures; digitalization; data.

To cite this article:

Argenovskiy AG, Sevryugina NS, Apatenko AS. An in-place method of forming a data bank on the technical condition of the internal combustion engine fuel system of technological machines in real time. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(6):808–818. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-634830>

Received: 03.08.2024

Accepted: 22.12.2024

Published online: 08.01.2025

ВВЕДЕНИЕ

Проблема поддержания работоспособности технологических машин при различных условиях эксплуатации остаётся актуальной как для производителей, так и для эксплуатантов [1, 2]. Добиться эффективного функционирования машин на всём периоде срока службы можно путём обеспечения качественного выполнения всех видов обслуживания и ремонтных воздействий, что в свою очередь ведёт к дополнительным экономическим издержкам, простоям машины и трудозатратам специалистов сервиса и ремонтных служб [3, 4].

Производитель, закладывая проектную надёжность технологических машин в требования по их эксплуатации, устанавливает нормальные условия эксплуатации гарантированной наработки и ресурса всех конструктивных элементов [5].

Научно-практические исследования показывают, что конструктор при проектировании машин, должен обеспечить заданные функциональные характеристики, гарантировать поддержание работоспособности машины в период эксплуатации, все это достигается через такие свойства, как технологичность, ремонтпригодность, лёгкость и пр. [6].

Ремонтные воздействия при восстановлении работоспособности машин в сервисных центрах требуют не только высококвалифицированных исполнителей, знающих технологический процесс выполнения работ, но и специального оборудования, приспособлений и площадок для их выполнения. Теоретическая составляющая ремонтно-восстановительного производства требует также проработки вопросов затратности работ и обоснования исчерпанности ресурсного потенциала заменяемых агрегатов [7, 8].

Учсть разнообразие условий эксплуатации технологических машин и постоянно меняющиеся режимы нагружения в настоящее время возможно путём применения цифровых технологий, позволяющих создавать массивы данных не только в режиме реального времени, но и для индивидуальной машины [9, 10].

Актуальной задачей является создание методов сбора информации о режимах работы машины, факторах, вызывающих изменение эффективности функционирования, разработки алгоритмов принятия решения о поддержании работоспособного состояния всех агрегатов и систем машины, не допуская их отказов и непроизводительных простоев машины в целом.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Обеспечение эффективного функционирования единичной технологической машины за счёт управления рисками отказов, путём корректировки периодичности технического обслуживания и периодов ремонтно-восстановительных воздействий, на основании

полученных в режиме реального времени данных о техническом состоянии и цифровой обработки информации принятия решения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Базовые положения теории выбросов случайных процессов позволяют решать задачи управления рисками, в нашем случае потери работоспособности технологических машин из-за отказов элементов их агрегатов. При использовании данной теории выполняется оценка вероятности безотказной работы системы в условиях неопределённости; рассчитывается момент первого выброса процесса за пределы области работоспособности [11].

В случае с агрегатами технологических машин условиями неопределённости принято считать различные режимы нагружения и меняющиеся в постоянном режиме факторы как внешнего, так и внутреннего влияния на техническое состояние машины. В данных исследованиях применены положения гауссовского случайного процесса, т.к. для него тип функции распределения случайных величин, входящих в каноническое разложение, не меняется [12].

Если принять область работоспособности, соответствующую значению проектной надёжности, заложенной производителем, во временном периоде, то выброс процесса за его пределы будет характеризоваться потерей работоспособности системы. В таком случае, следует решить задачу управления рисками подобных выбросов для различных элементов агрегатов машины, одним из механизмов управления рисками является выполнение ремонтно-восстановительных работ.

Теория вопроса предполагает классическую методику выполнения ремонтно-восстановительных работ технологических машин путём замены по достижению заложенного производителем периода срока службы, или исчерпания ресурса [13]. В настоящее время все большее научно-практическое значение стала приобретать методика модульно-блочной замены агрегатов. Базовые теоретические разработки направлены на разработку подходящих схем технологических процессов по признаку профилактической или корректирующей замены системы, обеспечивающей эту работу.

Практика ремонтно-восстановительных работ показывает, что эксплуатирующие предприятия в систему поддержания работоспособного состояния машин включают профилактическое обслуживание и текущий ремонт, по потребности. Текущий ремонт чаще всего включает замену только вышедшего из строя элемента, не затрагивая остальные комплектующие агрегатов. Данный вид ремонта не позволяет вернуть состояние агрегата до уровня проектной надёжности, а возвращает в состояние доремонтного уровня ресурсной наработки.

В силу того, что в настоящее время все большее внимание уделяется прогнозным моделям состояния

технологических машин, назначение которых не допустить потерь из-за непроизводительных простоев, то требуются научно-обоснованные корректировки методик ремонтно-восстановительного воздействия [14–15].

Представляется, что для повышения ремонтной эффективности компонентную замену следует проводить тогда, когда неисправность не может быть устранена или, когда в совокупном количестве отказов компонентов агрегата достигает определённого порога, не восстанавливаемого ресурса.

Расчётные методики можно интерпретировать следующим образом, проектная надёжность характеризует процесс функционирования системы $X(t)$ в заданном периоде времени как некое значение положительного выброса, фиксированного уровня C (рис. 1).

Технологическая машина, как сложная техническая система, в течение всего срока службы будет находиться в нескольких состояниях работоспособности: от максимальных значений параметров на начальном периоде эксплуатации, до минимально допустимых значений при полной выработке ресурса, с промежуточными значениями параметров в периоды корректировки значений при проведении плановых обслуживаний и ремонтно-восстановительных воздействий.

Изменение условий функционирования системы под влиянием случайных процессов вызывает переход технического состояния за пределы области работоспособности, т.е. момент выброса, который можно предвидеть путём сбора данных по показателям датчиков [16].

В теории выбросов управление рисками дополняется положениями нестационарного пуассоновского потока, что позволяет потерю функционирования отдельного компонента зафиксировать в поток без последствий, контролируя достижение состояния элемента конечного

параметра по признаку работоспособности в отдельном отрезке времени.

Это позволит избежать риски отказов системы и предсказывать период выполнения ремонтно-восстановительных работ.

Для двигателей внутреннего сгорания модель восстановления работоспособности имеет достаточно сложную структуру, в которой выделяются конструктивные модули в соответствии с механизмами и системами.

Процесс ремонта двигателя включает операции по демонтажу отдельных элементов. При этом ключевую роль в этом играет знание ремонтником последовательности технологических операций. В тоже время ремонтник должен пересматривать последовательность выполнения работ в зависимости от поставленной задачи, т.е. от конкретного элемента, подлежащего замене. При использовании цифровых технологий, данный процесс переводится в управляемый формат с контролем из системной памяти, сгенерировав алгоритм матрицы разборки, т.е. перевод на уровень гибкого процесса.

Очевидно, что предложенная модель включения цифровых технологий оптимизирующей маршрутизации компонентов для минимизации затрат при ремонтно-восстановительных заменах элементов двигателя внутреннего сгорания позволяет решать ряд следующих задач:

- управление процессом восстановления;
- снижение непроизводительных и трудовых затрат на ремонтно-восстановительные работы;
- обеспечение прогнозирования при составлении плана закупок запасных частей и компонентов многоразового использования;
- прогнозное контролирование технического состояния двигателя внутреннего сгорания по ресурсным

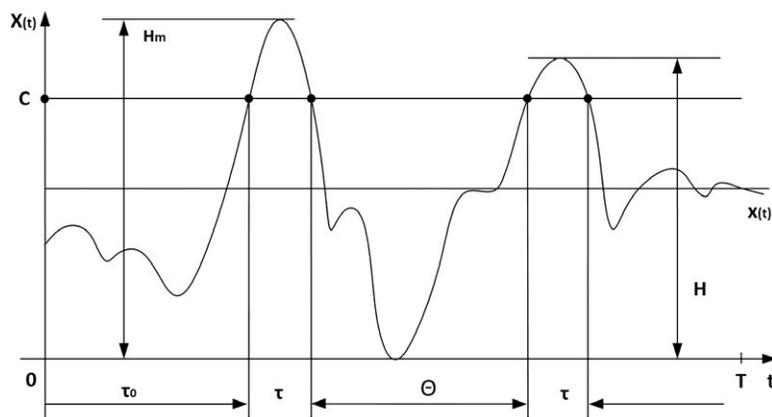


Рис. 1. Выбросы случайного процесса: H — локальный максимум процесса $X(t)$; H_m — абсолютный максимум функции системы $X(t)$; τ_0 — момент времени первого выброса; τ — длительность положительного выброса (период работы агрегатов в нормальном режиме функционирования); θ — длительность отрицательного выброса (работа неисправной системы в режиме снижения эффективности функционирования).

Fig. 1. Excursions of a random process: H — the local maximum of the process $X(t)$; H_m — the absolute maximum of the system function $X(t)$; τ_0 — the time of the first excursion; τ — the duration of the positive excursion (the period of normal operation of the units); θ — the duration of the negative excursion (operation of a faulty system in the mode of operation efficiency decreasing).

показателям и остаточному сроку службы на компонентном уровне.

При разработке алгоритма оптимизации последовательности демонтажа и маршрутизации компонентной замены ключевым фактором выделяется цель снижения затрат. Это позволяет принимать решение в режиме реального времени на основе данных о физическом состоянии деталей, характере износа, потенциале восстановления с учетом прошедшего срока службы, а также анализа полученных показаний датчиков.

Предлагаемая модель требует наличие большого массива данных, но в начальном периоде диагностика технического состояния и эффективности работы ДВС (ДТСиЭР ДВС) для единичной машины приходится ограничиваться нормативной усреднённой информацией с постепенным добором данных, их цифровой интерпретации по управляющим воздействиям с обоснованием принимаемого решения. В последующие же периоды интеллектуальная система на основе цифрового двойника будет находиться в режиме постоянного глубокого обучения, за счёт 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 дальнейшей корректировкой регулировочных характеристик на ДВС, изменяя режимы нагружения, периодичность обслуживания/ремонта, и не допуская снижения эксплуатационной эффективности или отказов.

Следует отметить, что для различных моделей ДВС характерна общность признаков изменения физического состояния элементной базы, что принято в качестве допущения при составлении механизма ДТСиЭР ДВС. Так как ДВС является сложной технической системой, состоящей из механизмов и систем, то практические исследования решено провести на примере топливной системы дизельного двигателя, при этом составлен алгоритм для оценки технического состояния и составления методики контроля по совокупности теоретико-практических моделей.

Работа топливной системы дизельного двигателя характеризуется изменением давления, наличием в системе зон повышенного давления, это и даёт результат эффективной работы ДВС в целом.

Общеизвестно, что, осциллографы позволяют визуализировать показания контрольно-измерительных приборов и зафиксировать изменения величин [17].

Учитывая конструктивное и функциональное подобие топливных систем периоды изменения давления при её работе выделены в «реперные зоны», что представлено в «теоретической» осциллограмме (рис. 2), так:

- «1» зона оценки эффективности работы ТНВД, начало подачи топлива по топливопроводу;
- «2–3» зона оценки начала открытия нагнетательного клапана;
- «4» зона падения давления при поднятии иглы форсунки;
- «5» зона оценка эффективности увеличения давления в результате работы плунжера в ходе нагнетания;

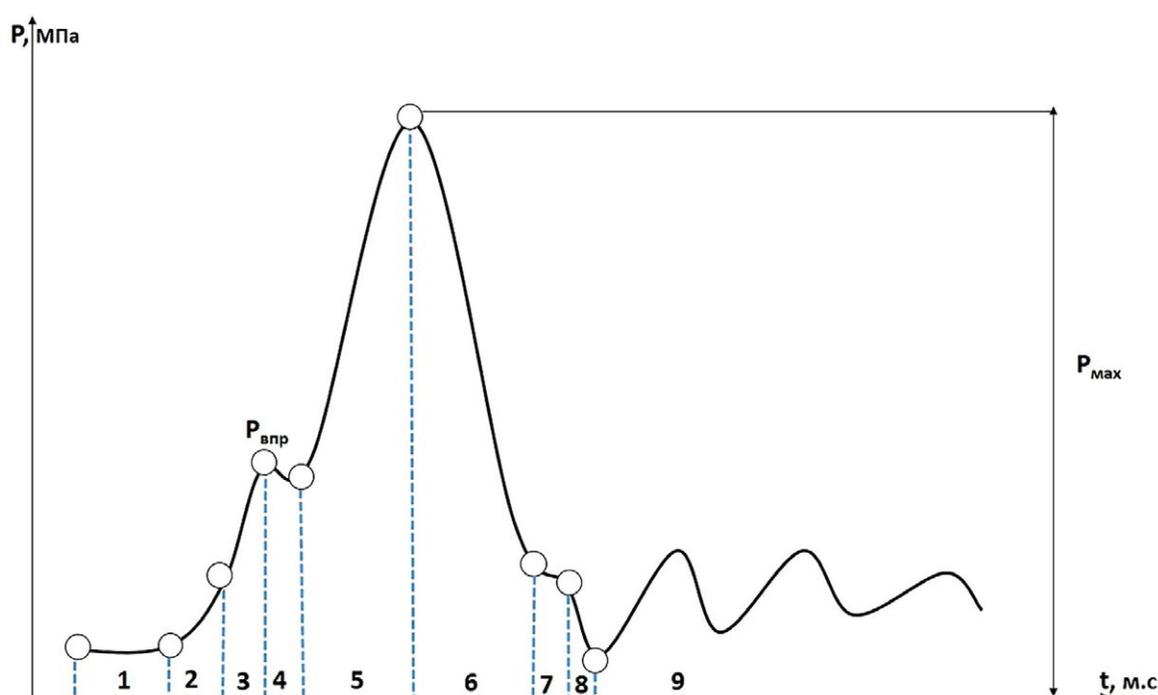


Рис. 2. «Теоретическая» осциллограмма изменения давления в топливопроводе системы питания ДВС.

Fig. 2. "Theoretical" oscillogram of pressure changes in the fuel line of the internal combustion engine power fuel system.

- «6» зона оценки периода эффективности работы топливного насоса по подаче топлива, период прекращения подачи;
- «7» зона оценки периода эффективности работы иглы форсунки, падение давления при ее закрытии;
- «8» зона оценки периода эффективности работы нагнетательного клапана насоса, падение давления при его закрытии;
- «9» зона оценки периода эффективности работы ТНВД, период затухающих колебаний давления, под влиянием отражённых волн.

В ходе контроля изменения работы топливной системы ДВС требовалось оценить состояние отдельных элементов, в частности работу ТНВД и форсунки в целом.

Аналитические исследования должны базироваться на большом массиве данных, в данном случае изменения показателей работы топливной системы ДВС в зависимости от внешних и внутренних факторов, в связи с этим дополнительно выделены характерные зоны:

- I. увеличение давления в системе, до момента включения в работу форсунки, с условием $t_1 \leq t \leq t_3$;
- II. период впрыска топлива в цилиндр ДВС, с условием $t_4 \leq t \leq t_7$;
- III. период падения давления после закрытия иглы распылителя до момента закрытия нагнетательного клапана насоса, с условием $t_8 \leq t \leq t_9$.

При составлении банка данных нормированных значений оценки технического состояния топливной системы следует учитывать показания изменения давления в каждой зоне мониторинга, что обусловило построение «эталонной» осциллограммы (рис. 3), по которой в дальнейшем можно оценивать характер изменений и принимать решение о видах обслуживающих воздействий.

Согласованность осциллограмм «теоретической» и «эталонной» (см. рис. 2–3): I — зоны 1–3; II — зоны 4–7;

III — зоны 8–9, на основании чего составлена расчётная модель получения частных коэффициентов для различных двигателей, в соответствии с номинальными значениями параметров технического состояния компонентов топливной системы [17]:

$$p_T(t) = \begin{cases} a_I t^3 + b_I t^2 + c_I t + d_I & t_1 \leq t \leq t_3 \\ a_{II} t^3 + b_{II} t^2 + c_{II} t + d_{II} & \text{при } t_4 \leq t \leq t_7 \\ a_{III} t^3 + b_{III} t^2 + c_{III} t + d_{III} & t_8 \leq t \leq t_9 \end{cases} \quad (1)$$

где a, b, c, d — корректирующие коэффициенты регрессий для соответствующих зон, определяемых для различных конструкций ДВС, работающих в заданных условиях эксплуатации; t — периоды изменения давления, м. с.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальные исследования при ДТСИЭР ДВС проводились путём установки контрольно-диагностических элементов в реперных точках [17]. Индуктивные датчики частоты вращения коленчатого вала и фиксации положения поршня первого цилиндра в верхней мёртвой точке (ВМТ) помещены в технологическом отверстии кожуха маховика, для двигателя А-41 (рис. 4, а). Следует отметить, что для установки комплекта датчиков на ДВС СМД-62 потребовалось выполнить сверление технологического отверстия, позиционированное в соответствии с меткой положения поршня первого цилиндра в ВМТ, т.е. в крышке верхнего окна кожуха маховика коленчатого вала (рис. 4, б).

Контроль изменения давления в топливопроводе осуществлялся путём установки датчика давления в месте подачи топлива по трубопроводу к форсунке первого цилиндра (рис. 4, с).

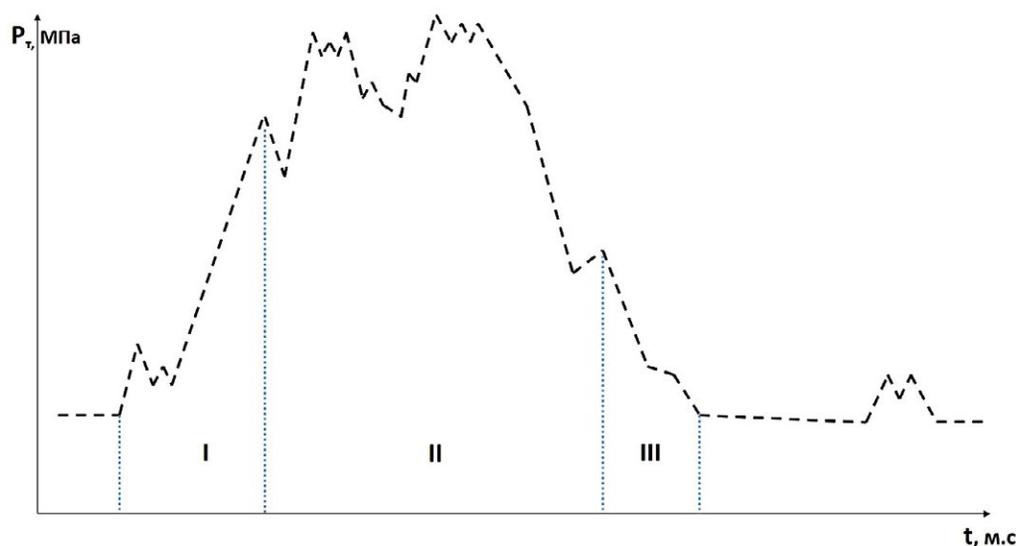


Рис. 3. «Эталонная» осциллограмма работы топливной системы ДВС.

Fig. 3. The "reference" oscillogram of the operation of the internal combustion engine fuel system.

Для ДВС, оборудованных газотурбинным нагнетателем, контроль подачи воздуха наддува осуществлялся путём контроля давления, установкой датчика давления во впускном коллекторе (рис. 4, *d*).

Представленный комплект контрольно-измерительных приборов в совокупности с электронным блоком преобразования аналоговых сигналов позволяет проводить мониторинг состояния элементов ДВС в режиме реального времени, своевременно выявляя отклонения от нормированных значений и корректируя график регулировочных работ при обслуживании или предотвращая отказ путём проведения ремонтно-восстановительных работ.

Полученные в ходе экспериментальных исследований результаты позволили выделить характерные зоны, указывающие на неисправности топливной аппаратуры высокого давления и косвенно провести оценку износа механизмов ДВС.

Результаты экспериментальных исследований представлены на инфограммах изменения давления из-за неисправностей топливной аппаратуры ДВС (рис. 5).

Аналитические исследования путём применения экспертной оценки предполагали выполнение наложения осциллограмм и установление зон «выброса процесса», т.е. отклонение от нормированного значения, сопоставления с допустимыми значениями и принятия решения о состоянии элементов [18].

Применение цифровых технологий обработки информации и разработанный алгоритм выполнения оценки

с обоснованием принятия решения позволил перевести этап аналитической обработки данных в автоматизированный режим [19].

В качестве примера представлена инфограмма фрагмента снятия показаний в совмещённой осциллограмме изменения ЭДС используемых датчиков к функции времени (рис. 6) [17].

По результатам оценки выделены различные дефекты, фрагмент исследований представлен на осциллограммах рис. 5, где можно зафиксировать следующие дефекты:

- рис. 5, а) в зонах 2–3 (выделены на теоретической осциллограмме, см. рис. 2) изменение давление, его понижение указывает на износ нагнетательного клапана;
- рис. 5, б) в зонах 4–5 (выделены на теоретической осциллограмме, см. рис. 2) изменение давление, его понижение указывает износ плунжерной пары;
- рис. 5, с) суммарный износ нагнетательного клапана и плунжерной пары;
- рис. 5, d) в зоне 4 (выделено на теоретической осциллограмме, см. рис. 2) уменьшение давления в период начала подъёма иглы распылителя указывает на ослабление усилия поднятия пружины.

В примере в качестве основного фактора принято снижение давление подачи топлива в системе, в тоже время давление может и повышаться, что характеризует заклинивание отдельных элементов, что препятствует свободному прохождению топливу по каналам, в свою очередь не рассмотрен пример изменения давления

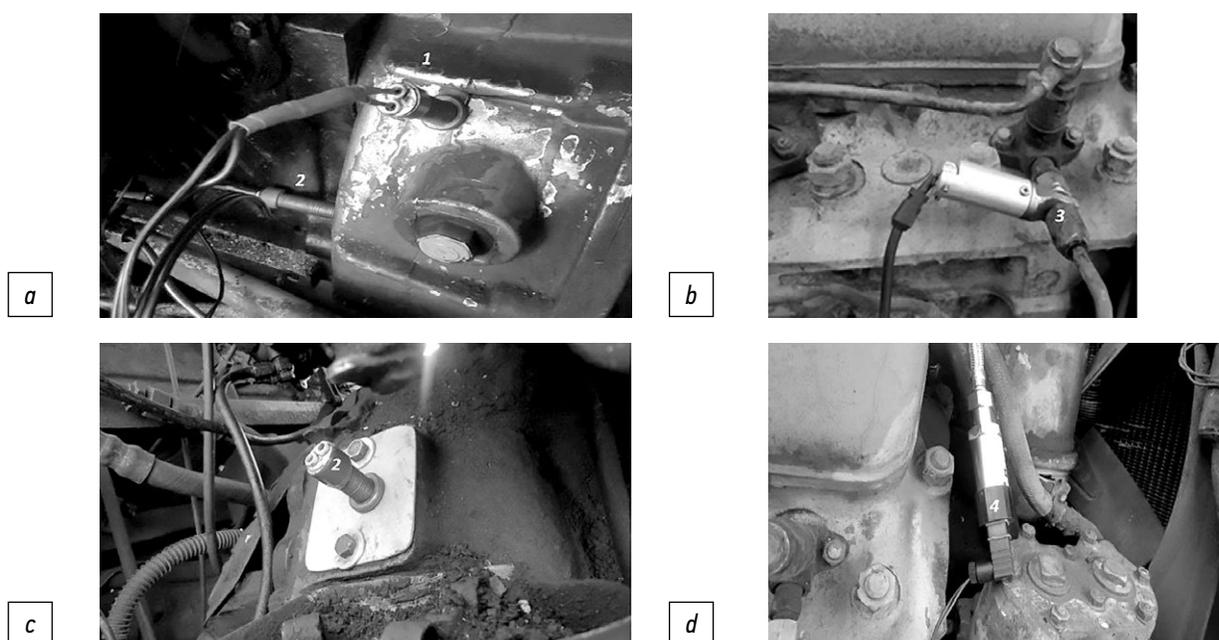


Рис. 4. Крепление датчиков: *a* — кожух ДВС А-41; *b* — кожух ДВС СМД-62; *c* — топливопровод форсунки 1-го цилиндра; *d* — впускной коллектор; 1 — датчик частоты вращения маховика на кожухе ДВС; 2 — датчик фиксации положения поршня в ВМТ; 3 — датчик давления в топливопроводе; 4 — датчик давления наддува воздуха.

Fig. 4. Mounting of sensors: *a* — the casing of the A-41 internal combustion engine; *b* — the casing of the SMD-62 internal combustion engine; *c* — the fuel line of the nozzle of the 1st cylinder; *d* — the intake manifold; 1 — the flywheel speed sensor on the casing of the internal combustion engine; 2 — the sensor for fixing the position of the piston in the top dead center; 3 — the pressure sensor in fuel line; 4 — the air boost pressure sensor.

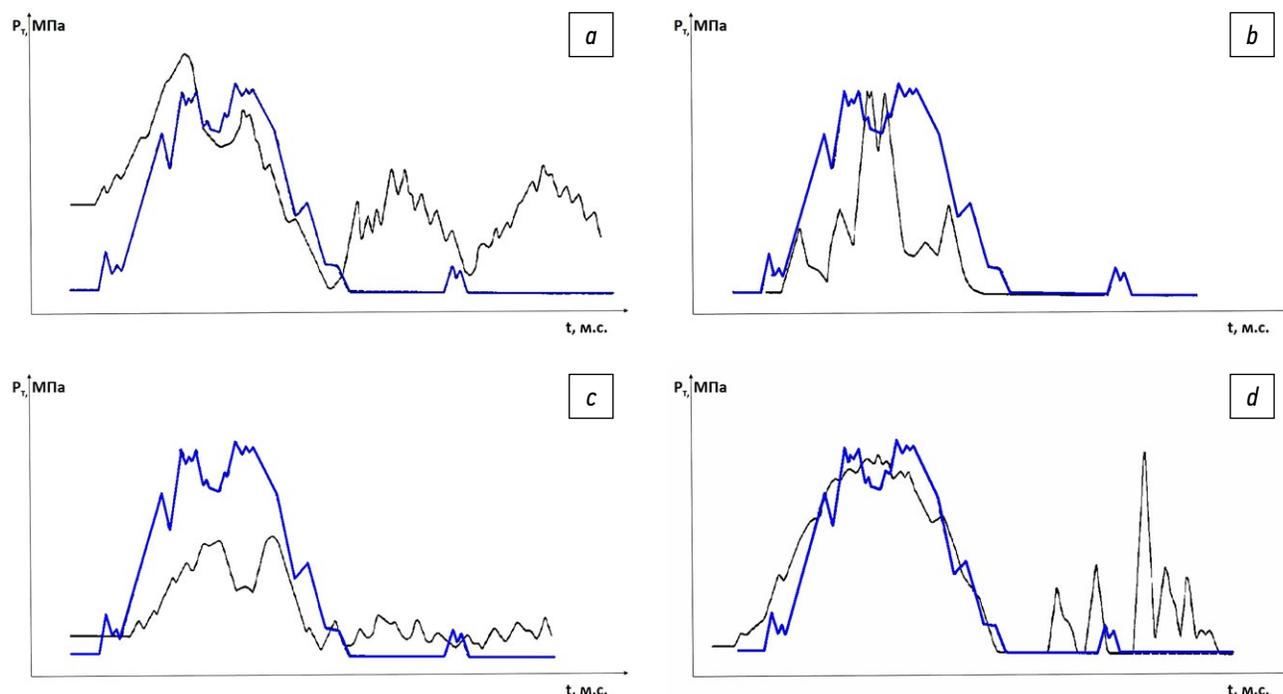


Рис. 5. Инфограммы контроля элементов топливной системы ДВС по показателю изменения давления при: *a* — износе нагнетательного клапана; *b* — износе плунжерной пары; *c* — суммарном износе нагнетательного клапана и плунжерной пары; *d* — фиксации уменьшения давления начала подъёма иглы распылителя форсунки [17].

Fig. 5. Infograms of the control of the elements of the internal combustion engine fuel system by the indicator of pressure change at: *a* — wear of the discharge valve; *b* — wear of the plunger pair; *c* — total wear of the discharge valve and the plunger pair; *d* — decrease in the pressure of the beginning of lifting the nozzle needle.

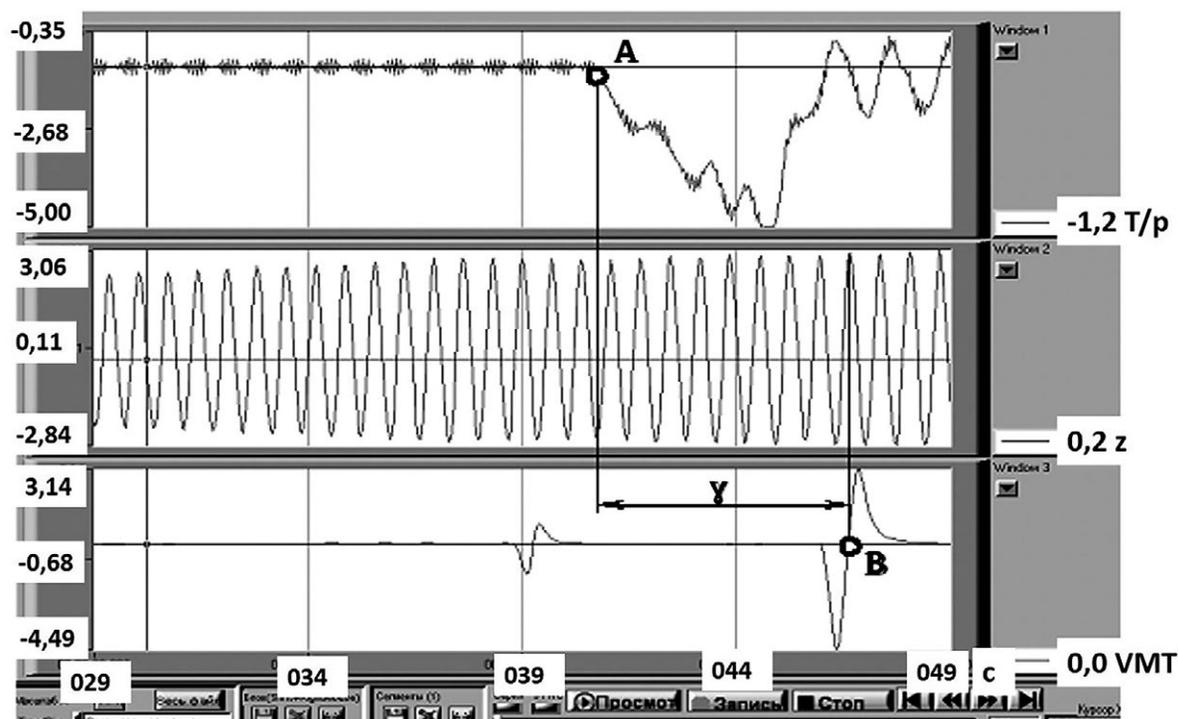


Рис. 6. Результаты цифрового контроля состояния ДВС: точка А — момент начала возрастания давления в топливопроводе; точка В — нахождение поршня 1-го цилиндра в ВМТ такта сжатия; γ — угол опережения подачи топлива определяется расчётным путём.

Fig. 6. The results of digital monitoring of the state of the internal combustion engine: point A — the moment of the beginning of an increase in pressure in the fuel line; point B — the position of the piston of the first cylinder at the top dead center of the compression stroke; γ — the angle of advance of the fuel supply is determined by calculation.

в зоне «9», что косвенно может характеризовать пропускную способность топливопроводов, потери давления на участках сопротивления в местах прокладки, перегибов, соединений и пр. [17, 20].

Безразборный метод контроля технического состояния топливной системы ДВС позволил получить набор данных и провести корректировку периодичности технического обслуживания. Полученные данные анализировались путём сравнения с нормированными значениями, что позволило своевременно выявить ряд отклонений, предотвратить отказ работы системы и ДВС в целом и не допустить непроизводительных простоев технологических машин. Даны рекомендации по следующим видам работ: регулировке топливной аппаратуры, ремонту с заменой неисправных элементов [21].

Сценарий цифровой обработки данных имеет несколько вариантов:

- идентификация отклонений на основе экспертного анализа;
- 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 появления ошибочного решения [22].

ОБСУЖДЕНИЕ

Разработан модуль диагностики технического состояния и эффективности работы ДВС единичной технологической машины в режиме реального времени. На примере системы питания дизельного двигателя представлен метод сбора данных, включающий подготовительные этапы теоретического обоснования нормированных показателей штатного функционирования, на примере построения осциллограмм изменения давления. Сбор данных изменения давления с учетом режимов нагружения ДВС и их обработка позволили выявить износ деталей, дать предложение по выполнению регулировочных, обслуживающих и ремонтных воздействий, предотвратив отказ системы. Следует учесть, что исследования будут продолжены путём контроля тепловых нагрузок, вибрационного и шумового фона, получения массива данных которых позволит давать более точные рекомендации о состоянии системы машины, в рассматриваемом случае, систем и механизмов ДВС. Предложено внедрение интеллектуальной системы принятия решения с последующей трансформацией в образ цифрового двойника управления рисками отказов и контроля эффективности функционирования машины для различных условий эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ функционирования технологических машин показал, что эксплуатация в различных условиях нагружения вызывает риски отказов систем ведущую к непроизводительным простоям машины. Оценка технического состояния технологических машин по осреднённым показателям приводит к необоснованным затратам на плановые обслуживания и восстановительные работы. Представлено обоснование перехода от планового выполнения технического обслуживания и ремонтно-восстановительных воздействий (ТОиР) к обслуживанию единичной технологической машины по потребности, что обеспечивается контролем технического состояния машины в режиме реального времени путем установки модулей цифрового контроля рисков отказов. Для разработки алгоритма формирования массива данных применены типовые архитектуры сбора и обработки информации с применением цифровых платформ принятия решения об интенсивности изменения параметров. Корректировка периодичности ТОиР проводилась по результатам данных изменения показателей функционирования машины, в частности топливной системы ДВС.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. А.Г. Арженовский — концептуализация, валидация, исследование, обработка данных, написание — первоначальный проект статьи; А.С. Апатенко — проверка, визуализация и написание — обзор и редактирование текста; Н.С. Севрюгина — методология, формальный анализ, обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, написание и редактирование статьи. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведённым исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. A.G. Argenovskiy — conceptualization, validation, research, data processing, writing — initial draft of the manuscript; A.S. Apatenko — verification, visualization and writing — review and editing of the text; N.S. Sevryugina — methodology, formal analysis, literature review, collection and analysis of the literary sources, writing and editing the manuscript. All authors made a substantial

contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- Pastukhov AG, Timashov EP, Bakharev DN. Generalized assessment of the main factors in the design of machinery and technologies in agroengineering. *Innovations in agriculture: problems and prospects*. 2021;1(29):17-26. (In Russ.)
- Kutuzov VV. Efficiency of operation of construction and road vehicles, taking into account changes in their technical condition. *Technology of wheeled and tracked vehicles*. 2015;3(19):57-64. (In Russ.)
- Dalsky N. Restoration of agricultural machinery — a new life of aggregates! *Our agriculture*. 2023;13(309):64-67. (In Russ.)
- Kosenko EA, Baurova NI, Zorin VA. Service Properties of Composites with Various Types of Hybrid Matrices. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020;13:1526-1530. doi: 10.1134/S0036029520130169
- Lebedev AT, Arzhenovskiy AG, Chayka YeA, et al. Methodology for Assessing the Efficiency of Measures for the Operational Management of the Technical Systems' Reliability. In: XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021": *Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry. Volume 1, Rostov-on-Don, 24-26.02.2021*. Berlin: Springer Verlag; 2022;242:13-20. doi: 10.1007/978-3-030-81619-3_2
- Kravchenko IN, Erofeev MN, Zorin VA. Methodology for calculating optimal volumes and nomenclature of spare parts of machines and technological equipment for the production of building materials. *Repair. Recovery. Modernization*. 2008;11:33-36. (In Russ.)
- Golubev IG, Sevryugina NS, Apatenko AS, et al. Modernizing Machines to Extend Their Life. *Russian Engineering Research*. 2023;43(3):258-263. doi: 10.3103/s1068798x23040111 EDN: TZDWX0
- Leonov OA, Temasova GN. Building a functional model of the process "Maintenance and repair of agricultural machinery" from the perspective of the requirements of international standards for quality management systems. *Bulletin of FGOU VPO "MGAIU named after V.P. Goryachkin"*. 2009;7(38):35-40. (In Russ.)
- Starostin IA, Lavrov AV, Eshchin AV, et al. The state and prospects of development of the agricultural tractor fleet in the context of digital transformation of agriculture. *Tractors and agricultural machinery*. 2023;90(4):387-394. (In Russ.) doi: 10.17816/0321-4443-567790
- Golubev IG, Bykov VV, Golubev MI. Promising directions of using digital solutions in the technical service of machines in the forest complex. In: *Annual national NTC of teaching staff, postgraduates and students of the Mytishchi branch of the Bauman Moscow State Technical University based on the results of research for 2020: Collection of abstracts, Mytishchi, Moscow region, 01-03.02.2021*. Krasnoyarsk: NITs; 2021;42-44. (In Russ.)
- Kalashnikov PV. Mathematical model of risk control arising from the functioning of complex technical systems for critical purposes in conditions of uncertainty of information about the values of parameters and the phase state. *International Journal of Advanced Studies*. 2022;12(3):22-39. doi: 10.12731/2227-930X-2022-12-3-22-39
- Zhiyao Zhang, Xiaohui Chen, Enrico Zio, et al. Multi-task learning boosted predictions of the remaining useful life of aero-engines under scenarios of working-condition shift. *Reliability Engineering & System Safety*. 2023;237. doi: 10.1016/j.ress.2023.109350
- Komarov VA. Criteria for the limiting state of machine units: theoretical background. *Tractors and agricultural machinery*. 2005;2:28-30. (In Russ.)
- Bugrimov VA, Kondratiev AV, Sarbaev VI. Modeling of the inventory management system of a service station. *The world of transport and technological machines*. 2017;4(59):9-16.
- Apatenko AS, Vladimirova NI. Analysis of systems of repair and preventive maintenance of technological machines. *Bulletin of the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "V.P. Goryachkin Moscow State Agroengineering University"*. 2013;1(57):72-76. (In Russ.)
- Sevryugina NS. Integration of the probability theory of random processes in the information and analytical complex for monitoring the performance of road vehicles. In: *Interstroyemeh — 2015: materials of the ISTC, Kazan, 09-11.09.2015*. KGASU. Kazan: KGASU; 2015:188-192. (In Russ.)
- Arzhenovskiy AG, Asaturyan SV. *Improvement of methods and means for determining energy and fuel-economic indicators of tractor engines — Zernograd: Azov-Black Sea Engineering Institute — branch of the Federal State budgetary educational institution of Higher education "Don State Agrarian University" in Zernograd*. Zernograd; 2013. (In Russ.)
- Leonov OA, Shkaruba NJ. Calculation of landing tolerance based on the parametric connection failure model. *Problems of mechanical engineering and automation*. 2020;4:14-20. (In Russ.)
- Sevryugina NS, Ruzanov EV, Matveenkov MA, et al. Embedded multiplex digital monitoring system for environmental management machines. In: *Scientific and information support for innovative development of the agro-industrial complex : materials XI MNPk, 05-07.06.2019*. Pravdinsky: Rosinformagrotech; 2019:378-383. (In Russ.)
- Kulmanakov SP, Tyutikov SA. Assessment of the effect of fuel pressure pulsation in the Common Rail system on the economic and environmental performance of diesel. *Tractors and agricultural machinery*. 2023;90(3):201-206. (In Russ.) doi: 10.17816/0321-4443-241226
- Lebedev AT, Arzhenovskiy A, Zhurba VV, et al. Operational Management of Reliability of Technical Systems in the Agro-Industrial Complex. In: XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021": *Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry. Rostov-on-Don, 24-26.02.2021*. Berlin: Springer Verlag; 2022:79-87. doi: 10.1007/978-3-030-81619-3_9
- Shimokhin AV, Kirasirov OM. Mechanism for improving the management of the maintenance and repair process using neural network technology. *Tractors and agricultural machinery*. 2023;90(6):561-573. (In Russ.) doi: 10.17816/0321-4443-546006

ОБ АВТОРАХ

*** Севрюгина Надежда Савельевна,**

д-р техн. наук, доцент,
профессор кафедры технического сервиса машин
и оборудования;

адрес: Россия, 127422, Москва,

Тимирязевская ул., д. 49;

ORCID: 0000-0002-3494-1437;

eLibrary SPIN: 4444-0443;

e-mail: nssevr@yandex.ru

Арженовский Алексей Григорьевич,

д-р техн. наук, доцент,
и. о. директора Института механики и энергетики
имени В.П. Горячкина;

ORCID: 0000-0002-3569-8934;

eLibrary SPIN: 5549-4841;

e-mail: arzhenovski@rgau-msha.ru

Апатенко Алексей Сергеевич,

д-р техн. наук, доцент,
заведующий кафедрой технического сервиса машин
и оборудования;

ORCID: 0000-0002-2492-9274;

eLibrary SPIN: 7553-2715;

e-mail: a.apatenko@rgau-msha.ru

AUTHORS' INFO

*** Nadezhda S. Sevryugina,**

Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Professor of the Technical Service of Machinery and Equipment
Department;

address: 49 Timiryazevskaya str, Moscow, Russia, 127422;

ORCID: 0000-0002-3494-1437;

eLibrary SPIN: 4444-0443;

e-mail: nssevr@yandex.ru

Alexey G. Arzhenovsky,

Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Acting Director of the Institute of Mechanics and Power
Engineering named after V.P. Goryachkin;

ORCID: 0000-0002-3569-8934;

eLibrary SPIN: 5549-4841;

e-mail: arzhenovski@rgau-msha.ru

Alexey S. Apatenko,

Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Head of the Technical Service of Machinery and Equipment
Department;

ORCID: 0000-0002-2492-9274;

eLibrary SPIN: 7553-2715;

e-mail: a.apatenko@rgau-msha.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author