

Научная статья
УДК 629.113, 621.87
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-316-333>
EDN: RDLMBO



УГЛУБЛЕННОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ФОРСУНОК АККУМУЛЯТОРНОЙ СИСТЕМЫ ВПРЫСКА ТОПЛИВА СИЛОВОГО АГРЕГАТА АВТОМОБИЛЯ

Б.В. Журавский¹ ✉, **С.И. Цехош²**

¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия

²Тюменский государственный университет,
г. Тюмень, Россия

✉ ответственный автор
ra9teo@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. На эффективность и надёжность силовых агрегатов автомобилей с дизельным двигателем значительное влияние оказывает техническое состояние электрогидравлических форсунок системы впрыска топлива. Для своевременного выявления и устранения возникающих в процессе эксплуатации неисправностей форсунок необходимо периодически проводить контрольно-диагностические работы. Диагностирование демонтированных с силового агрегата форсунок при помощи специальных стендов характеризуется наибольшей точностью, при этом определяется только общее техническое состояние форсунок, без конкретизации неисправностей. Углубленное диагностирование с локализацией неисправностей позволит принимать оптимальные решения о технических воздействиях при ремонте форсунок. Целью работы является оценка возможности повышения глубины поиска неисправностей при стендовом диагностировании форсунок путём анализа характера зависимостей диагностических параметров от величины давления тестовой жидкости на входе в жидкостный аккумулятор стенда при постоянной длительности управляющих импульсов.

Материалы и методы. Математическая модель электрогидравлической форсунки представлена в виде системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику происходящих в форсунке процессов. При проведении численных экспериментов осуществлялось изменение в определённых диапазонах значений давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор, структурных параметров: зазора в сопряжениях «плунжер мультипликатора – втулка», «направляющая часть иглы – корпус распылителя», неплотности управляющего клапана и уплотнительного кольца. Длительность электрических управляющих импульсов оставалась постоянной.

Результаты. Приведены графики полученных зависимостей диагностических параметров: цикловой подачи, среднего расхода тестовой жидкости в обратную линию и продолжительности запаздывания окончания впрыска от давления тестовой жидкости при различных значениях структурных параметров.

Обсуждение и заключение. В результате проведённых исследований были выявлены отличия в характере зависимостей некоторых из рассмотренных диагностических параметров от давления на входе в аккумулятор при наличии отклонений отдельных структурных параметров. Полученная при диагностировании дополнительная информация позволит выявлять наличие отклонений отдельных структурных параметров, что увеличит глубину поиска неисправностей. В работе приведена блок-схема предлагаемого диагностического алгоритма.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: силовой агрегат автомобиля, дизельный двигатель, аккумуляторная система впрыска, электрогидравлическая форсунка, математическая модель, техническое состояние, неисправность, диагностирование, глубина поиска неисправности, структурный параметр, диагностический параметр, диагностический алгоритм

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность рецензентам данной работы.

© Журавский Б.В., Цехош С.И., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Статья поступила в редакцию 23.12.2025; одобрена после рецензирования 10.02.2026; принята к публикации 17.04.2026.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Журавский Б.В., Цехош С.И. Углубленное диагностирование электрогидравлических форсунок аккумуляторной системы впрыска топлива силового агрегата автомобиля // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 2. С. 316-333. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-316-333>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-316-333>

EDN: RDLMBO

IN-DEPTH DIAGNOSTICS OF ELECTROHYDRAULIC INJECTORS FOR BATTERY-POWERED FUEL INJECTION SYSTEM OF VEHICLE POWERTRAIN

Boris V. Zhuravsky¹ ✉, Sofia I. Tsekhosh²

¹The Siberian State Automobile and Highway University
Omsk, Russia

²Tyumen State University
Tyumen, Russia

✉ corresponding author
ra9meo@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The technical condition of electro-hydraulic injectors of the fuel injection system has a significant impact on the efficiency and reliability of power units in diesel vehicles. To promptly detect and eliminate any injector failures during operation, it is necessary to follow periodical control and diagnostics procedures. Diagnosing injectors removed from the power unit with special stands is characterized by the highest accuracy, though it allows checking general technical condition of the injectors, without specifying particular faults. In-depth diagnostics with fault localization will affect optimal decisions to be made regarding technical measures during injector repair. The research objective is to evaluate the possibility of increased in-depth failure detection during bench diagnostics of injectors by analyzing the nature of relations between diagnostic parameters and the values of test fluid pressure at the bench liquid accumulator inlet with constant time of control pulses.

Materials and methods. A mathematical model of an electrohydraulic injector is presented in the form of a system of differential equations describing the dynamics of the processes in the injector. During numerical experiments, the pressure of the test liquid at the battery inlet and the following structural parameters were changed within specific ranges: multiplier plunger - sleeve gap, needle guide - nozzle, and the leakage of the control valve and that of the sealing ring. The time of the electrical control pulses remained constant.

Results. The graphs demonstrating relations between the diagnostic parameters (cyclic delivery, average flow rate of test fluid in the return line and delay time in the end of injection) and the pressure of the test fluid have been presented for different values of the structural parameters.

Discussion and conclusion. As a result of the conducted research, differences were revealed in the nature of the relations between some diagnostic parameters and the accumulator inlet pressure with deviations in particular structural parameters. The additional information obtained during diagnostics will allow us to identify deviations in certain structural parameters, which will increase the level of detecting failures. The paper presents a block diagram of the proposed diagnostic algorithm.

KEYWORDS: automotive powertrain, diesel engine, battery injection system, electrohydraulic injector, mathematical model, technical condition, failure, diagnostics, failure detection level, structural parameter, diagnostic parameter, diagnostic algorithm

ACKNOWLEDGEMENT: the authors express gratitude to the reviewers of this paper.

© Zhuravsky Boris V., Tsekhosh Sofia I., 2026



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

The article was submitted: December 23, 2025; approved after reviewing: February 10, 2026; accepted for publication: April 17, 2026.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Zhuravsky B.V., Tsekhosh S.I. In-depth diagnostics of electrohydraulic injectors for battery-powered fuel injection system of vehicle powertrain. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (2): 316-333. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-316-333>

ВВЕДЕНИЕ

Значительное влияние на работу силового агрегата автомобиля с дизельным двигателем внутреннего сгорания оказывает техническое состояние электрогидравлических форсунок (ЭГФ), входящих в состав аккумуляторной системы впрыска топлива АСВТ [1, 2, 3]. В процессе эксплуатации происходит ухудшение технического состояния ЭГФ [4, 5, 6]. Для своевременного выявления и устранения возникающих неисправностей необходимо регулярно проводить диагностирование ЭГФ [7]. Выявление изменений технического состояния ЭГФ на ранней стадии позволяет своевременно устранить проблему и предотвратить серьезные последствия для силового агрегата [1].

Вопросам диагностирования ЭГФ АСВТ посвящено большое число работ [1, 2, 3, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Диагностирование ЭГФ может проводиться без их демонтажа с силового агрегата, а также после их демонтажа при помощи специальных диагностических стендов [13, 16, 17]. Стендовое диагностирование ЭГФ позволяет с наибольшей точностью определять их техническое состояние [9].

Диагностические стенды позволяют в автоматизированном режиме с высокой точностью определять значения ряда диагностических параметров: цикловой подачи, среднего расхода тестовой жидкости в обратную линию, продолжительности запаздывания начала впрыска, продолжительности запаздывания и окончания впрыска, минимального давления срабатывания и др. [10, 16].

При стандартном стендовом диагностировании ЭГФ реализуются тестовые режимы, параметры которых устанавливаются согласно тест-планам [9, 16, 17]. Определение значений диагностических параметров и их сравнение с номинальными и предельно-допустимыми значениями происходит только на определённых режимах работы форсунки, для каждого из которых задано сочетание значения давления тестовой жидкости на входе в форсунку и продолжительность управляющих импульсов [16].

Как показывает опыт эксплуатации, достаточно большое число неисправностей ЭГФ связано с изменением определённых структурных параметров: с увеличением зазоров в сопряжениях «направляющая часть иглы – корпус распылителя», «втулка – плунжер мультипликатора»; нарушением гидроплотности запорного элемента управляющего клапана и уплотнительного кольца втулки (корпуса клапана) [5, 6].

На рисунке 1 приведена схема, показывающая влияние рассматриваемых структурных параметров на диагностические параметры [9, 10].

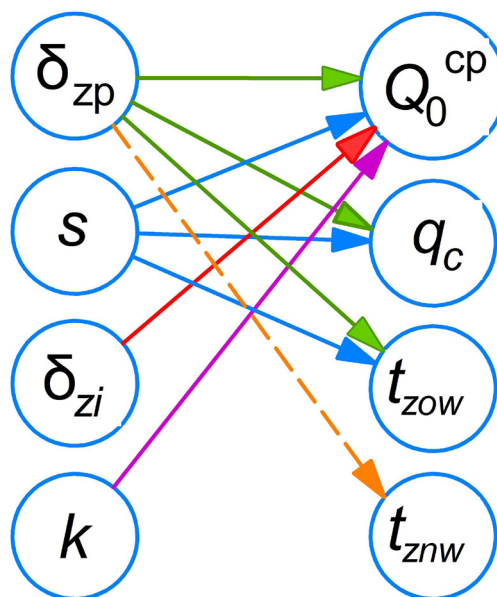


Рисунок 1 – Связь структурных и диагностических параметров электрогидравлической форсунки
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Relationship between structural and diagnostic parameters of electrohydraulic injector
Source: compiled by the authors.

Структурные параметры: зазор в сопряжении «втулка – плунжер мультипликатора» δ_{zp} , величина неплотности управляющего клапана s одновременно оказывают влияние на несколько диагностических параметров: на цикловую подачу q_c , на средний расход в обратную линию Q_0^{cp} и на продолжительность за-

паздывания окончания впрыска t_{zov} . Изменение зазора δ_{zp} также влияет на диагностический параметр – продолжительность запаздывания начала впрыска t_{zov} , однако чувствительность данного диагностического параметра мала [10], что затрудняет его практическое применение.

Структурные параметры: зазор в сопряжении «направляющая часть иглы – корпус распылителя» δ_{zi} , величина неплотности уплотнительного кольца k влияют одновременно на диагностический параметр – средний расход в обратную линию Q_0^{cp} .

Следует отметить, что увеличение среднего расхода в обратную линию Q_0^{cp} происходит при возрастании значений всех рассмотренных структурных параметров. Цикловая подача q_c возрастает при увеличении значения зазора в сопряжении «втулка – плунжер мультипликатора» δ_{zp} , а также при увеличении значения неплотности управляющего клапана s . Аналогичное влияние оказывают структурные параметры δ_{zp} и s на диагностический параметр t_{zov} . Это все приводит к возникновению неопределённости при диагностировании, информация только о наличии превышения предельно-допустимого значения отдельными диагностическими параметрами не позволяет выявлять конкретные причины данных отклонений. При реализации существующей технологии стендового диагностирования ЭГФ диагностические параметры рассматриваются в качестве интегральных, определяется только общее техническое состояние форсунок, без конкретизации неисправностей [9].

При выявлении в процессе стендового диагностирования отклонений в работе ЭГФ производится её полная разборка и дефектовка всех деталей и узлов. Полная разборка и дефектовка ЭГФ характеризуются высокой трудоёмкостью. Снизить трудоёмкость дефектовки ЭГФ можно путем осуществления предварительного углубленного диагностирования [9] с локализацией неисправностей.

В работах [9, 15] рассматривается метод повышения глубины поиска неисправностей, сущность которого заключается в анализе значений совокупности измеряемых диагностических параметров и выявлении неисправностей по наличию или отсутствию отклонений определённых диагностических параметров из рассматриваемой совокупности. Предварительно в данных работах для каждого рассмотренного структурного параметра определялся набор связанных с ним диагностических

параметров. Данный метод повышения глубины поиска неисправностей при диагностировании ЭГФ имеет определённые ограничения, так как отклонение отдельных структурных параметров оказывает одинаковое влияние на вид совокупности изменяющихся при этом диагностических параметров (см. рисунок 1). При изменении величин зазора δ_{zp} и неплотности s , а также при изменении величин зазора δ_{zi} и неплотности k получаются практически одинаковые совокупности изменяющихся диагностических параметров, это вносит неопределённость и ограничивает глубину поиска неисправностей. Для уменьшения неопределённости при диагностировании с целью локализации конкретных неисправностей необходима дополнительная информация.

Разработка методов и способов повышения глубины поиска неисправностей при диагностировании ЭГФ является достаточно актуальной и практически значимой.

При диагностировании ЭГФ на стендах имеется техническая возможность задавать параметры тестовых режимов: величину давления тестовой жидкости и продолжительность управляющих импульсов. Можно реализовать такой тестовый режим, при котором диагностические параметры будут измеряться при изменении давления тестовой жидкости в определённом диапазоне при фиксированной продолжительности управляющих импульсов либо при постоянном давлении и варьируемой длительности управляющих импульсов. Анализ полученных зависимостей диагностических параметров от параметров тестовых режимов может дать дополнительную информацию, снижающую неопределённость и позволяющую проводить углубленное диагностирование ЭГФ.

Целью данной статьи является оценка возможности повышения глубины поиска неисправностей при стендовом диагностировании ЭГФ путём анализа характера зависимостей диагностических параметров от величины давления тестовой жидкости на входе в жидкостный аккумулятор стенда при постоянной длительности управляющих импульсов.

Задачи исследования:

1. Установить и проанализировать зависимости цикловой подачи тестовой жидкости от давления в аккумуляторе при разных значениях неплотности управляющего клапана, зазора в сопряжении «втулка – плунжер мультипликатора».

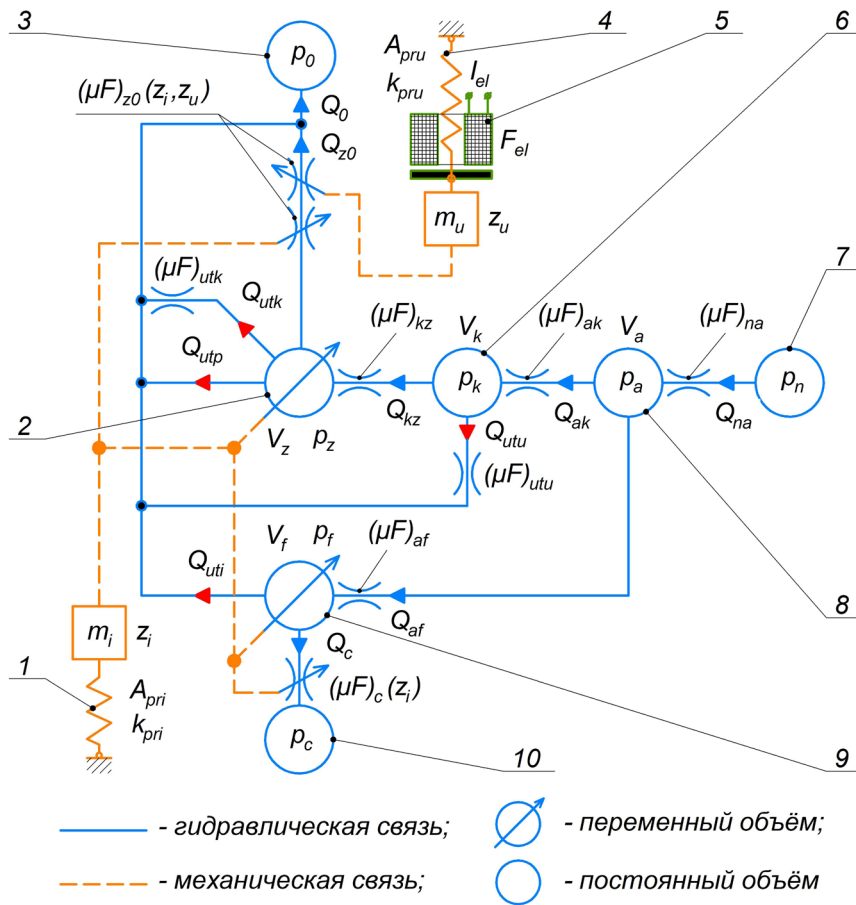


Рисунок 2 – Расчётная комбинированная схема электрогидравлической форсунки
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 - Combined calculation diagram of electrohydraulic injector
 Source: compiled by the authors.

2. Выявить и проанализировать зависимости среднего расхода в обратную линию от давления в аккумуляторе при разных значениях неплотности управляющего клапана, зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора», неплотности уплотнительного кольца, зазора в сопряжении «направляющая часть иглы – корпус распылителя».

3. Установить и проанализировать зависимости продолжительности запаздывания окончания впрыска от давления в аккумуляторе при разных значениях неплотности управляющего клапана, зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На рисунке 2 представлена расчётная комбинированная схема ЭГФ с электромагнитным приводом управляющего клапана, подключенной к жидкостному аккумулятору, обратной линии и камере впрыска измерительной системы

диагностического стенда. Тестовая жидкость под определённым давлением из жидкостного аккумулятора подаётся на вход форсунки, из полости слива форсунки жидкость поступает в обратную линию. На обмотку электромагнита подаются электрические управляющие импульсы заданной длительности, впрыск тестовой жидкости через распылитель форсунки осуществляется в камеру впрыска стенда.

На рисунке 2 представлены следующие обозначения: 1 – пружина иглы; 2 – управляющая полость; 3 – обратная линия; 4 – пружина управляющего клапана; 5 – электромагнит; 6 – промежуточная полость; 7 – топливный насос высокого давления (ТНВД); 8 – жидкостный аккумулятор; 9 – подыгольная полость; 10 – камера впрыска; p_0 – атмосферное давление, Па; p_n – давление на выходе ТНВД, Па; p_a – давление в топливном аккумуляторе, Па; p_k – давление в промежуточной полости форсунки, Па; p_z – давление в управляющей полости, Па; p_f – давление в подыгольной полости, Па; p_c –

давление в камере впрыска диагностического стенда в момент впрыска тестовой жидкости, Па; z_i – перемещение иглы, м; z_u – перемещение якоря электромагнита управляющего клапана, м; V_a – объём топливного аккумулятора, м³; V_k – объём промежуточной полости форсунки, м³; V_z – объём управляющей полости, м³; V_f – объём подыгольной полости, м³; Q_o – общий расход тестовой жидкости в обратную линию, м³/с; Q_{z0} – расход тестовой жидкости через канал, соединяющий управляющую полость и обратную линию, м³/с; Q_{na} – расход тестовой жидкости из ТНВД в топливный аккумулятор, м³/с; Q_{ak} – расход тестовой жидкости из топливного аккумулятора в промежуточную полость форсунки, м³/с; Q_{kz} – расход тестовой жидкости через канал, соединяющий промежуточную и управляющую полости, м³/с; Q_{af} – расход тестовой жидкости из аккумулятора в подыгольную полость форсунки, м³/с; Q_c – расход тестовой жидкости из подыгольной полости форсунки в камеру впрыска диагностического стенда, м³/с; Q_{uti} – расход тестовой жидкости через зазор сопряжения «направляющая часть иглы – корпус распылителя», м³/с; Q_{utp} – расход тестовой жидкости через зазор сопряжения «плунжер мультипликатора – втулка», м³/с; Q_{utk} – расход тестовой жидкости через неплотности управляющего клапана, м³/с; Q_{utu} – расход тестовой жидкости через неплотности уплотнительного кольца, м³/с;

$(\mu F)_c(z)$ – эффективное проходное сечение распылителя форсунки, м²; $(\mu F)_{z0}(z_p, z_u)$ – эффективное проходное сечение канала, соединяющего управляющую полость форсунки с обратной линией, м²; $(\mu F)_{kz}$ – эффективное проходное сечение канала, соединяющего промежуточную и управляющую полости форсунки, м²; $(\mu F)_{ak}$ – эффективное проходное сечение канала, соединяющего топливный аккумулятор и промежуточную полость форсунки, м²; $(\mu F)_{na}$ – эффективное проходное сечение канала, соединяющего ТНВД и топливный аккумулятор, м²; $(\mu F)_{utk}$ – эффективное проходное сечение неплотности управляющего клапана, м²; $(\mu F)_{utu}$ – эффективное проходное сечение неплотности уплотнительного кольца, м²; Arg_i – усилие предварительной затяжки пружины иглы, Н; k_{pri} – коэффициент жёсткости пружины иглы, Н/м; A_{pru} – усилие предварительной затяжки пружины управляющего клапана, Н; k_{pru} – коэффициент жёсткости пружины клапана, Н/м; I_{el} – сила электрического тока, протекающего через обмотку электромагнита клапана, А; F_{el} – сила, развиваемая электромагнитом привода клапана, Н; m_i – масса подвижных элементов, перемещающихся совместно с иглой, кг; m_u – масса подвижных элементов привода управляющего клапана, кг.

Формирование утечек тестовой жидкости из управляющей, промежуточной и подыгольной полостей ЭГФ показано на рисунках 3 и 4.

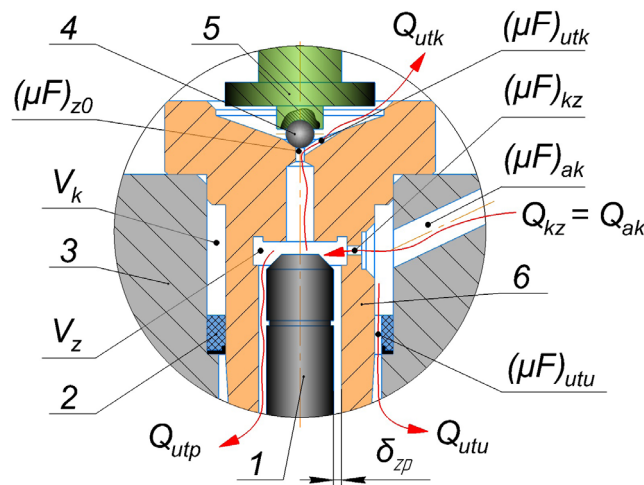


Рисунок 3 – Формирование утечек топлива из управляющей и промежуточной полостей электрогидравлической форсунки: 1 – плунжер мультипликатора; 2 – уплотнительное кольцо; 3 – корпус; 4 – сферический запорный элемент; 5 – толкатель якоря; 6 – втулка
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Fuel leakage generation in the control and intermediate chambers of electrohydraulic injector
1 – multiplier plunger; 2 – sealing ring; 3 – body; 4 – spherical shut-off element; 5 – anchor pusher; 6 – bushing
Source: compiled by the authors.

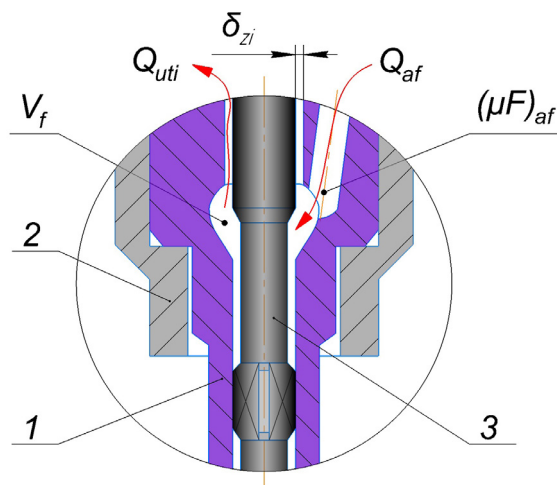


Рисунок 4 – Формирование утечек топлива из подыгольной полости электрогидравлической форсунки: 1 – корпус распылителя; 2 – гайка распылителя; 3 – игла
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Fuel leakage generation underneath the needle of electro-hydraulic injector
 1 – sprayer body; 2 – sprayer nut; 3 – needle
 Source: compiled by the authors.

Математическая модель ЭГФ может быть представлена в виде системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику происходящих в форсунке процессов¹ [18, 19].

$$\begin{cases}
 \frac{dC_i}{dt} = \frac{\sigma_1}{m_i} (p_f f_i - p_z f_p - A_{pri} - k_{pri} z_i - F_{ki}); \\
 \frac{dz_i}{dt} = \sigma_1 C_i; \\
 \frac{dp_f}{dt} = \frac{1}{\alpha V_f} \left(Q_{af} - Q_c - Q_{uti} - \sigma_1 f_{in} \frac{dz_i}{dt} \right); \\
 \frac{dp_z}{dt} = \frac{1}{\alpha V_z} \left(Q_{kz} - Q_{z0} - Q_{utp} - Q_{utk} + \sigma_1 f_{pn} \frac{dz_i}{dt} \right); \\
 \frac{dp_k}{dt} = \frac{1}{\alpha V_k} (Q_{ak} - Q_{kz} - Q_{utu}); \\
 \frac{dp_a}{dt} = \frac{1}{\alpha V_a} (Q_{na} - Q_{ak} - Q_{af}); \\
 \frac{dC_u}{dt} = \frac{p_z f_{cir} + F_{el} - A_{pru} - k_{pru} z_u - F_{ku}}{m_u}; \\
 \frac{dz_u}{dt} = C_u,
 \end{cases} \quad (1)$$

где C_i – скорость перемещения иглы (плунжера мультипликатора), м/с; σ_1 – ступенчатая управляющая функция, накладывающая ограничение на перемещение иглы; F_{ki} – сила, возникающая в контакте плунжера мультипликатора с верхним упором, Н; F_{ku} – сила,

возникающая в контакте подвижных элементов клапана с верхним и нижним упорами, Н; f_i – площадь поперечного сечения иглы, м²; f_{in} – площадь поперечного сечения направляющей иглы, м²; f_p – площадь поперечного сечения плунжера мультипликатора, м²; f_{pn} – площадь поперечного сечения направляющей плунжера, м²; f_{cir} – площадь поперечного сечения сферического запорного элемента клапана по линии контакта с конусной поверхностью седла, м².

При построении математической модели были приняты допущения: волновые явления в жидкости и силы трения в сопряжениях «плунжер мультипликатора – втулка», «направляющая часть иглы – корпус распылителя» не учитываются; коэффициент сжимаемости тестовой жидкости, плотность, вязкость постоянны; зазоры в сопряжениях деталей концентрические; соударение иглы с нижним упором является абсолютно неупругим, верхний упор плунжера мультипликатора, а также нижний и верхний упоры подвижных элементов управляющего клапана представлены в виде условных вязкоупругих элементов.

$$\sigma_1 = \begin{cases} 0, & \text{если } z_i = 0 \text{ и } p_f f_i - p_z f_p - A_{pri} < 0; \\ 1, & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (2)$$

¹ Астахов И.В., Трусов В.И., Хачиян А.С., Голубков Л.Н. Подача и распыливание топлива в дизелях. М.: Машиностроение, 1971. С.164.

$$f_i = \begin{cases} f_{ni} - f_{sk}, & \text{при } z_i = 0; \\ f_{ni}, & \text{при } z_i > 0, \end{cases} \quad (3)$$

где f_{sk} – площадь сечения иглы по поясу контакта запорного конуса, м².

$$f_p = \begin{cases} f_{ni}, & \text{при } z_i < z_{i_max}; \\ f_{ni} - f_{np}, & \text{при } z_i = z_{i_max}, \end{cases} \quad (4)$$

где f_{np} – площадь поперечного сечения хвостовика плунжера мультипликатора, м²; z_{i_max} – максимальное перемещение иглы, м.

$$F_{ki} = \begin{cases} k_{wi}(z_i - z_{i_max}) + b_{wi}C_i, & \text{при } z_i > z_{i_max}; \\ 0, & \text{при } z_i \leq z_{i_max}, \end{cases} \quad (5)$$

где k_{wi} – коэффициент жёсткости условного упругого элемента верхнего упора плунжера мультипликатора, Н/м; b_{wi} – условный коэффициент сопротивления для материала упора, (Н·с)/м.

$$F_{ku} = \begin{cases} k_{nu}z_u + b_{nu}C_u, & \text{при } z_u < 0; \\ k_{wu}(z_u - z_{u_max}) + b_{wu}C_u, & \text{при } z_u > z_{u_max}; \\ 0, & \text{при } 0 \leq z_u \leq z_{u_max}, \end{cases} \quad (6)$$

где k_{nu} , k_{wu} – коэффициенты жёсткости условных упругих элементов соответственно нижнего и верхнего упоров, подвижных элементов клапана, Н/м; b_{nu} , b_{wu} – условные коэффициенты сопротивления для материала соответственно нижнего и верхнего упоров подвижных элементов клапана, (Н·с)/м; z_{u_max} – максимальное перемещение подвижных элементов клапана, м.

Объёмный расход тестовой жидкости определяется по формуле [18]:

$$Q = \text{sign}(p_j - p_i) \mu F \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_j - p_i|}, \quad (7)$$

где p_j – давление в объеме, сообщающемся с рассматриваемым, Па; p_i – давление в рассматриваемом объеме, Па; μF – эффективное проходное сечение канала, соединяющего объёмы, м²; ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Эффективное проходное сечение распылителя форсунки определяется с помощью полиномиальной зависимости [18]:

$$\mu F_c = \mu F_{c_max} \left(2,64 \left(\frac{z_i}{z_{i_max}} \right) - 2,37 \left(\frac{z_i}{z_{i_max}} \right)^2 + 0,73 \left(\frac{z_i}{z_{i_max}} \right)^3 \right), \quad (8)$$

где $(\mu F)_c$ – текущее эффективное проходное сечение распылителя, м²; $(\mu F)_{c_max}$ – максимальное эффективное проходное сечение распылителя, м².

Эффективное проходное сечение канала, соединяющего управляющую полость со сливной полостью форсунки [18]:

$$(\mu F)_{z0} = \min \begin{cases} \mu_{z0} f_{z0}; \\ \mu_{zd} \pi d_{zd}(z_{i_max} - z_i); \\ 0,5 \mu_{dk} \pi z_u (d_{sp} + z_u \sin(0,5\alpha)) \sin(\alpha_u), \end{cases} \quad (9)$$

где μ_{z0} – коэффициент расхода для канала, соединяющего полость управления со сливной полостью; f_{z0} – площадь проходного сечения канала, соединяющего полость управления со сливной полостью, м²; μ_{zd} – коэффициент расхода для проходного сечения между хвостовиком плунжера и входным отверстием, расположенным перед каналом, соединяющего полость управления

со сливной полостью; d_{zd} – диаметр входного отверстия, м; μ_{dk} – коэффициент расхода для проходного сечения между поверхностями сферического запорного элемента и седла клапана; d_{sp} – диаметр сферического запорного элемента, м; α_u – угол конуса седла клапана, рад [7].

Эффективное проходное сечение неплотности управляющего клапана [9]:

$$(\mu F)_{utk} = \mu_{z0} f_{z0} \left(\frac{s}{100} \right), \quad (10)$$

где s – величина неплотности управляющего клапана [9], %.

Эффективное проходное сечение неплотности уплотнительного кольца

$$(\mu F)_{utu} = \mu F_{kz} \left(\frac{k}{100} \right), \quad (11)$$

где k – величина неплотности уплотнительного кольца – доля в процентном отношении эффективного проходного сечения неплотности уплотнительного кольца от эффективного проходного сечения канала, соединяющего промежуточную и управляющую полости, %.

Расход тестовой жидкости через зазор сопряжения «направляющая часть иглы – корпус распылителя» [9]:

$$Q_{uti} = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi d_{ni} \delta_{zi}^3 (p_f - p_0)}{6 \nu \rho l_{ni}} + \pi d_{ni} \delta_{zi} C_i \right), \quad (12)$$

где d_{ni} – диаметр направляющей иглы, м; δ_{zi} – величина зазора в сопряжении «направляющая часть иглы – корпус распылителя», м; ν – кинематическая вязкость тестовой жидкости, м²/с; l_{ni} – длина сопряжения «направляющая часть иглы – корпус распылителя», м.

Расход тестовой жидкости через зазор сопряжения «плунжер мультипликатора – втулка» [9]:

$$Q_{utp} = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi d_{np} \delta_{zp}^3 (p_z - p_0)}{6 \nu \rho l_{np}} - \pi d_{np} \delta_{zp} C_i \right), \quad (13)$$

где d_{np} – диаметр направляющей плунжера, м; δ_{zp} – величина зазора в сопряжении «плунжер мультипликатора – втулка», м; l_{np} – длина сопряжения «плунжер мультипликатора – втулка», м.

Сила, действующая на якорь электромагнита управляющего клапана, [16]:

$$F_{el} = \frac{(I_{el} w_{el})^2 \mu_0 \mu S_{ps}}{2(\delta_m - z_u)^2}, \quad (14)$$

где w_{el} – количество витков в обмотке электромагнита; μ_0 – магнитная постоянная, Гн·м⁻¹; μ – относительная магнитная проницаемость тестовой жидкости; S_{ps} – площадь сердечника с учётом отверстия для установки пружины, м²; δ_m – величина начального зазора между якорем и сердечником, м.

Цикловая подача тестовой жидкости ЭГФ находится по известной формуле

$$q_c = \int_0^T Q_c(t) dt, \quad (15)$$

где T – конечная точка интервала интегрирования при решении системы дифференциальных уравнений (1), с.

Средний общий расход тестовой жидкости из сливной полости ЭГФ в обратную линию [9]:

$$Q_0^{cp} = \frac{\int_0^T Q_0(t) dt + \int_T^{T_{per}} Q_0(T) dt}{T_{per}}, \quad (16)$$

где T_{per} – промежуток времени, соответствующий периоду следования управляющих импульсов, с.

Мгновенный общий расход тестовой жидкости из сливной полости ЭГФ в обратную линию

$$Q_0 = Q_{utk} + Q_{utp} + Q_{utu} + Q_{uti}. \quad (17)$$

При определении продолжительности запаздывания окончания впрыска t_{zov} было принято допущение о равенстве данного промежутка времени и продолжительности запаздывания окончания посадки иглы t_{zpi} , которая определялась как время, прошедшее от окончания электрического управляющего импульса до касания иглой нижнего упора [10].

Значение зазора в сопряжениях «плунжер мультипликатора – втулка», «направляющая часть иглы – корпус распылителя» варьировалось в диапазоне от 3 до 8 мкм с шагом 1 мкм. Значение неплотности управляющего клапана и уплотнительного кольца варьировалось в диапазоне от 0 до 20% с шагом 4% [7]. Давление тестовой жидкости на входе в аккумулятор изменялось в диапазоне от 30 до 150 МПа, с шагом 10 МПа. Значение продолжительности электрических управляющих импульсов при проведении вычислительных экспериментов не изменялось и было принято равным $t_{upr} = 700$ мкс.

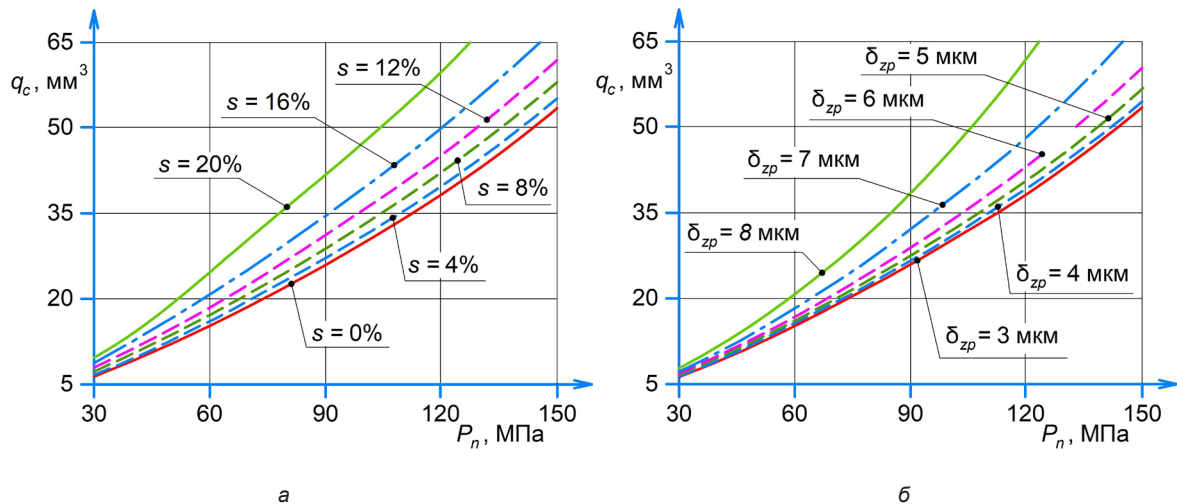


Рисунок 5 – Графики зависимостей цикловой подачи форсунки от давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор при разных значениях: а – неплотности управляющего клапана; б – зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора»
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Relations between injector cyclic delivery and accumulator inlet test fluid pressure for different values of: а – control valve leakage; б – clearance in bushing – multiplier plunger connection
Source: compiled by the authors.

В качестве расчётных были приняты параметры форсунки BOSCH 0445110293.

При решении системы дифференциальных уравнений (1) были заданы начальные условия: $C_i(0) = 0$; $z_i(0) = 0$; $P_f(0) = P_n$; $P_z(0) = P_n$; $P_k(0) = P_n$; $P_a(0) = P_n$; $C_u(0) = 0$; $z_u(0) = 0$ [7].

Расчёты проводились при помощи компьютерной математической системы Mathcad 15.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате многократного решения системы дифференциальных уравнений (1) при разных значениях рассмотренных структурных параметров и давлении тестовой жидкости на входе в жидкостный аккумулятор были получены временные зависимости основных фазовых переменных ЭГФ, при этом значения структурных параметров варьировались по отдельности. После дополнительных вычислений найдены значения диагностических параметров.

Было проведено сравнение значений диагностических параметров, приведённых в тест-плане фирмы BOSCH для рассмотренной ЭГФ и полученных расчётным путём при номинальных значениях структурных параметров и определённых сочетаниях давления на входе в аккумулятор и продолжительности управляющих импульсов, характерных для разных режимов работы силового агрегата и заданных в тест-плане. Результаты сравнения показали, что расчётные значения диагностических параметров находятся в допустимых пределах.

По полученным данным построены графики зависимостей диагностических параметров от давления тестовой жидкости при различных значениях структурных параметров.

На рисунке 5 приведены графики зависимостей цикловой подачи тестовой жидкости от давления жидкости на входе в аккумулятор при разных значениях неплотности управляющего клапана и зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора».

Из полученных результатов видно, что с увеличением давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор происходит возрастание цикловой подачи ЭГФ. С увеличением значений неплотности управляющего клапана и зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора» темп роста цикловой подачи значительно возрастает. Следует отметить схожий характер полученных зависимостей $q_c = f(P_n)$ при разных значениях неплотности управляющего клапана и зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора», что не позволит определить, изменение какого из рассмотренных структурных параметров ЭГФ повлияло на увеличение цикловой подачи.

На рисунке 6 представлены графики зависимостей среднего расхода в обратную линию от давления тестовой жидкости на входе в жидкостный аккумулятор при разных значениях неплотности управляющего клапана и зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора».

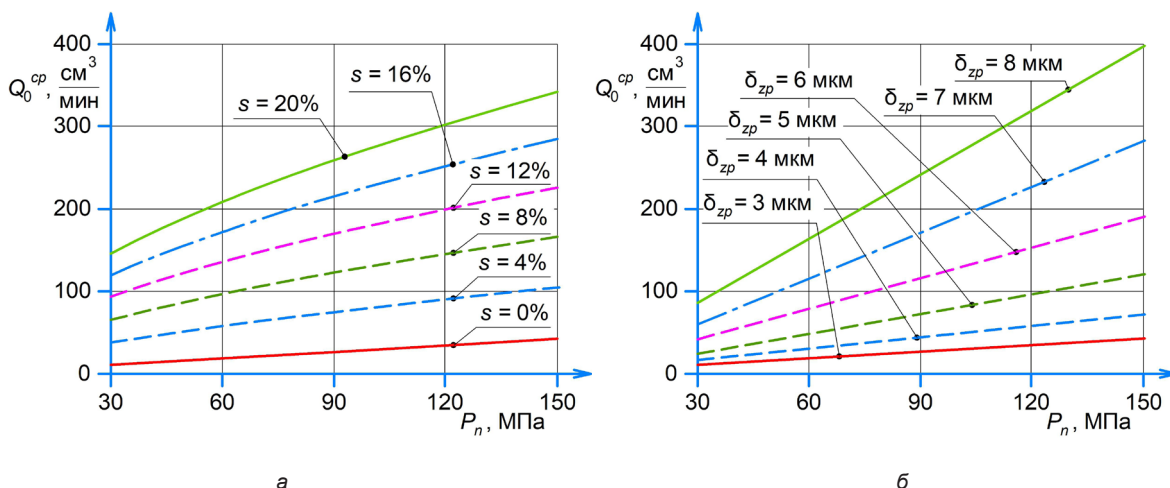


Рисунок 6 – Графики зависимостей среднего расхода в обратную линию от давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор при разных значениях: а – неплотности управляющего клапана; б – зазора в сопряжении «втулка – плунжер мультипликатора»
 Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Relations between average return flow rate and inlet test fluid pressure for different values of: а – control valve leakage; б – clearance in the bushing – plunger connection.
 Source: compiled by the authors.

Из графиков (см. рисунок 6) видно, что с увеличением давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор средний расход в обратную линию возрастает. С увеличением значения неплотности управляющего клапана и зазора в сопряжении «втулка – плунжер мультипликатора» темп роста среднего расхода в обратную линию возрастает. Зависимость расхода $Q_0^{cp} = f(P_n)$ при номинальных значениях рассмотренных структурных параметров ($s = 0\%$, $\delta_{zp} = 3$ мкм) практически линейная. При увеличении значения неплотности управ-

ляющего клапана возрастает нелинейность зависимостей $Q_0^{cp} = f(P_n)$. С увеличением зазора в сопряжении «втулка – плунжер мультипликатора» зависимости $Q_0^{cp} = f(P_n)$ остаются практически линейными во всем заданном диапазоне изменения величины зазора. Для уточнения характера полученных зависимостей были получены графики зависимостей производной среднего расхода по отношению к давлению от давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор при разных значениях структурных параметров s и δ_{zp} (рисунок 7).

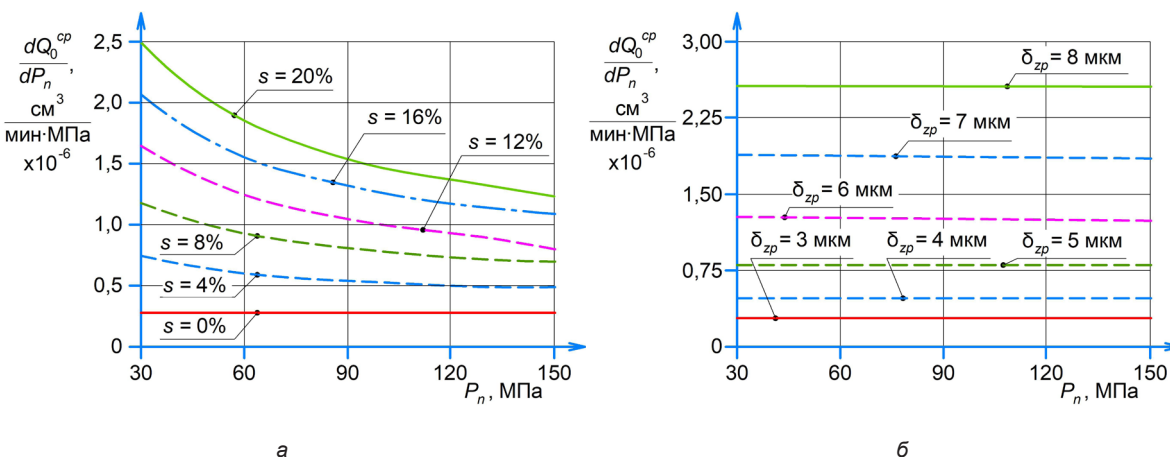


Рисунок 7 – Графики зависимостей производной среднего расхода в обратную линию по отношению к давлению от давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор при разных значениях: а – неплотности управляющего клапана; б – зазора в сопряжении «втулка – плунжер мультипликатора»
 Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Relations between average return flow rate derivative with respect to pressure and accumulator inlet test fluid pressure for different values of: а – control valve leakage; б – clearance in the bushing – plunger interface.
 Source: compiled by the authors.

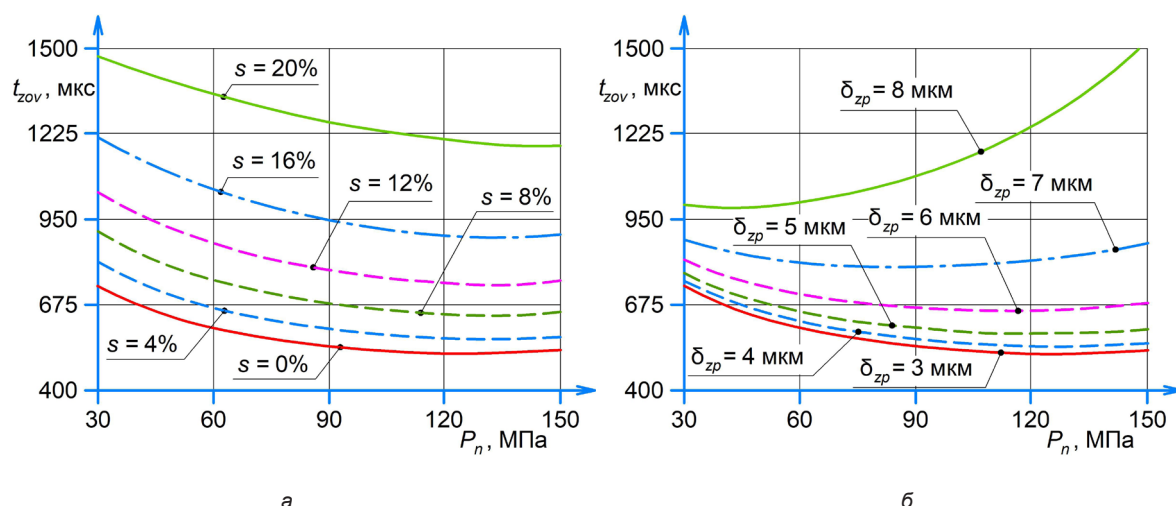


Рисунок 8 – Графики зависимостей запаздывания окончания впрыска от давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор при разных значениях:
 а – неплотности управляющего клапана; б – зазора в сопряжении «штуцер – плунжер мультипликатора»
 Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Relations between injection end delay and accumulator inlet test fluid pressure for different values of:
 а – control valve leakage; б – clearance in the bushing – multiplier plunger connection
 Source: compiled by the authors.

Из полученных результатов видно, что при номинальных значениях рассмотренных структурных параметров ($s = 0\%$, $\delta_{zp} = 3$ мкм) производная функции $Q_0^{cp} = f(P_n)$ в заданном диапазоне изменения давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор является постоянной величиной и не зависит от значения давления P_n , что подтверждает линейность данной зависимости.

При увеличении значения неплотности управляющего клапана возрастает изменение значений производной в заданном диапазоне изменения давления P_n , что подтверждает наличие нелинейности зависимостей $Q_0^{cp} = f(P_n)$ и её нарастание по мере роста значения неплотности s . При всех заданных значениях зазора δ_{zp} производная функции $Q_0^{cp} = f(P_n)$ в заданном диапазоне изменения давления P_n практически не изменяется. Постоянство производной подтверждает линейность рассматриваемых зависимостей при всех заданных значениях зазора δ_{zp} . В данном случае линейность полученных при диагностировании зависимостей $Q_0^{cp} = f(P_n)$ является определяющим признаком, позволяющим различать наличие отклонений структурных параметров s и δ_{zp} при отклонении диагностического параметра Q_0^{cp} .

На рисунке 8 представлены графики зависимостей запаздывания окончания впрыска от давления тестовой жидкости на входе в жидкостный аккумулятор при разных значениях неплотности управляющего клапана и зазора в сопряжении «штуцер – плунжер мультипликатора».

Из полученных графиков (см. рисунок 8) видно, что зависимости продолжительности запаздывания окончания впрыска от давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор для всех значений неплотности управляющего клапана и зазора в сопряжении «штуцер – плунжер мультипликатора» нелинейные. С увеличением давления P_n продолжительность t_{zov} сначала уменьшается, а затем возрастает. У полученных зависимостей $t_{zov} = f(P_n)$ имеются точки минимума, при этом по мере изменения значений структурных параметров s и δ_{zp} происходит изменение положения этих точек, т.е. изменяется давление P_n , при котором достигается минимальное значение функции $t_{zov} = f(P_n)$. Были получены графики зависимости давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор P_n^{\min} , соответствующего минимальному значению функции $t_{zov} = f(P_n)$, от величины неплотности управляющего клапана и от значения зазора в сопряжении «штуцер – плунжер мультипликатора» (рисунок 9).

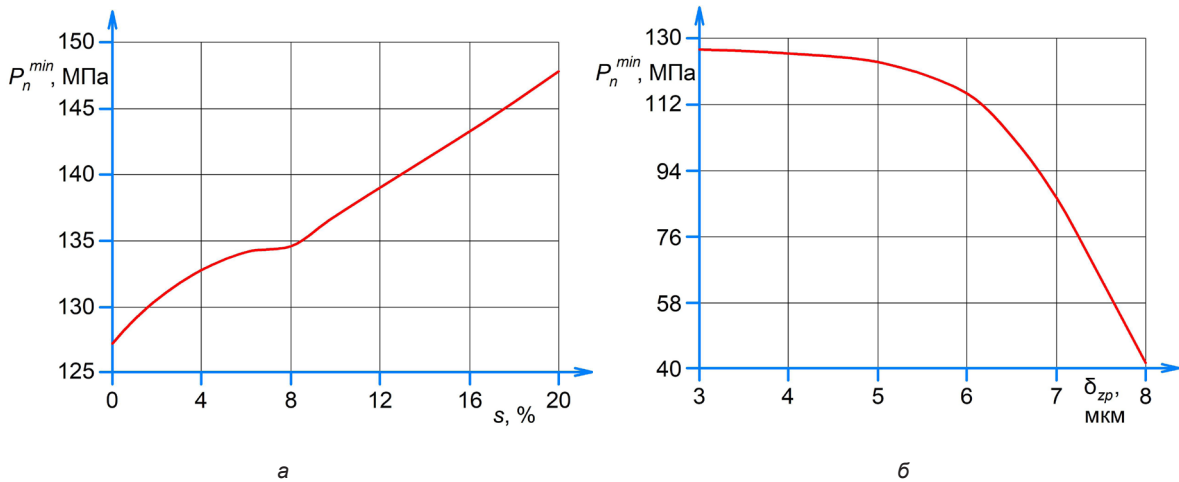


Рисунок 9 – Графики зависимостей давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор, соответствующего минимальному значению запаздывания окончания впрыска, от: а – величины неплотности управляющего клапана; б – значения зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора»
 Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Relations between accumulator inlet test fluid pressure, corresponding to the minimum value of injection end delay, and: a – control valve leakage value; b – clearance in bushing – multiplier plunger connection
 Source: compiled by the authors.

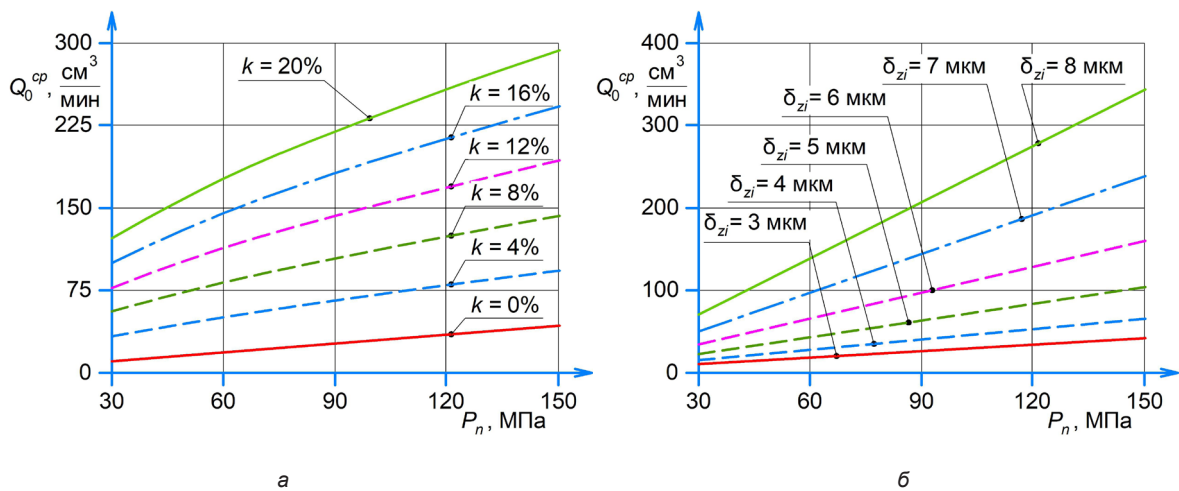


Рисунок 10 – Графики зависимостей среднего расхода в обратную линию от давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор при разных значениях: а – величины неплотности уплотнительного кольца; б – зазора в сопряжении «корпус распылителя – направляющая часть иглы»
 Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Relations between average flow rate in the return line and accumulator inlet test fluid pressure for different values of: a – sealing ring leakage; b – gap in body – needle guide part connection
 Source: compiled by the authors.

Из полученных результатов видно, что при увеличении значения неплотности управляющего клапана происходит возрастание, а при увеличении значения зазора в сопряжении «штулка – плунжер мультипликатора» – снижение давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор, при котором функция $t_{zov} = f(P_n)$ принимает минимальное значение. При наличии отклонения от номинального значения структурного параметра s значение давления P_n^{\min} больше, а при наличии отклонения параметра δ_{zp} – меньше значения давления $P_{n_nom}^{\min}$ при отсутствии отклонений данных структурных параметров. В данном случае знак отклонения фактического значения давления P_n^{\min} относительно его номинального значения $P_{n_nom}^{\min}$ может являться отличительным признаком, позволяющим определить, вариация какого именно структурного параметра s или δ_{zp} повлияла на изменение диагностического параметра t_{zov} .

Проведённые расчётные исследования показали, что изменение в заданных диапазонах структурных параметров: неплотности уплотнительного кольца и зазора в сопряжении «направляющая часть иглы – корпус распылителя» не оказывает влияние на характер зависимостей $q_c = f(P_n)$ и $t_{zov} = f(P_n)$.

На рисунке 10 представлены графики зависимостей среднего расхода в обратную линию от давления тестовой жидкости на входе в жидкостный аккумулятор при разных значениях неплотности уплотнительного кольца и зазора в сопряжении «направляющая часть иглы – корпус распылителя».

Из графиков (см. рисунок 10) видно, что по мере роста давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор возрастает средний расход жидкости в обратную линию. При увеличении значения структурных параметров: k и δ_{zi} интенсивность возрастания расхода Q_0^{cp} растёт. Зависимость $Q_0^{cp} = f(P_n)$ при номинальных значениях рассмотренных структурных параметров ($k = 0\%$, $\delta_{zi} = 3$ мкм) практически линейная. При увеличении значения неплотности уплотнительного кольца возрастает нелинейность зависимостей $Q_0^{cp} = f(P_n)$. С увеличением зазора в сопряжении «направляющая часть иглы – корпус распылителя» зависимости $Q_0^{cp} = f(P_n)$ остаются практически линейными во всем заданном диапазоне изменения величины зазора. Для уточнения характера полученных зависимостей были получены графики зависимостей производной среднего расхода по отношению к давлению от давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор при разных значениях структурных параметров k и δ_{zi} (рисунок 11).

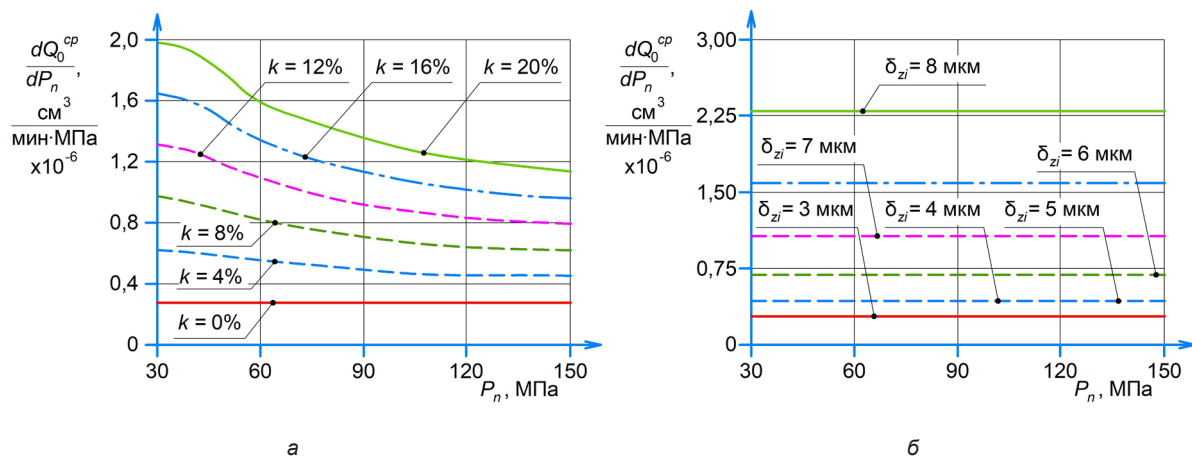


Рисунок 11 – Графики зависимостей производной среднего расхода в обратную линию по отношению к давлению от давления тестовой жидкости на входе в топливный аккумулятор при разных значениях: а – величины неплотности уплотнительного кольца; б – зазора в сопряжении «корпус распылителя – направляющая часть иглы»
Источник: составлено авторами.

Figure 11 – Relations between return line average flow rate derivative with respect to pressure and accumulator inlet test fluid pressure for different values of: а – sealing ring leakage; б – gap in nozzle body – needle guide part connection
Source: compiled by the authors.

Из полученных результатов видно, что при номинальных значениях рассмотренных структурных параметров ($k = 0\%$, $\delta_{zi} = 3$ мкм) производная функции $Q_0^{cp} = f(P_n)$ в заданном диапазоне изменения давления P_n является постоянной величиной, что подтверждает линейный характер данной зависимости.

При увеличении значения неплотности управляющего клапана нарастает изменение значения производной по мере роста давления P_n , что подтверждает наличие и возрастание нелинейности зависимостей $Q_0^{cp} = f(P_n)$. При всех заданных значениях зазора δ_{zi} производная функции $Q_0^{cp} = f(P_n)$ в заданном диапазоне изменения давления P_n практически не изменяется, это подтверждает линейность рассматриваемых зависимостей. В данном случае характер полученных при диагностировании зависимостей $Q_0^{cp} = f(P_n)$ является определяющим признаком, позволяющим различать наличие отклонений структурных параметров k и δ_{zi} при выявлении отклонения диагностического параметра Q_0^{cp} .

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых исследований установлены и проанализированы зависимости цикловой подачи ЭГФ, среднего расхода тестовой жидкости в обратную линию, продолжительности запаздывания окончания впрыска от давления в аккумуляторе при разных значениях рассмотренных структурных параметров. С увеличением давления тестовой жидкости на входе в жидкостный аккумулятор при неизменной продолжительности управляющих импульсов возрастают цикловая подача и средний расход в обратную линию, изменяется продолжительность запаздывания окончания впрыска. Были выявлены отличия в характере зависимостей некоторых из рассмотренных диагностических параметров от давления P_n при наличии отклонения отдельных структурных параметров.

С увеличением значений неплотности управляющего клапана и зазора в сопряжении «штуцер – плунжер мультипликатора» интенсивность роста диагностических параметров q_c и Q_0^{cp} при увеличении давления P_n возрастает, при этом зависимости $q_c = f(P_n)$ имеют схожий характер. При наличии неплотности s зависимость $Q_0^{cp} = f(P_n)$ имеет нелинейный характер, при увеличенном зазоре δ_{zp} зависимость $Q_0^{cp} = f(P_n)$ является практически линейной. По мере роста давления P_n происходит

изменение продолжительности запаздывания окончания впрыска. У зависимости $t_{zov} = f(P_n)$ имеется точка минимума, т.е. при определённом давлении тестовой жидкости P_n^{\min} параметр t_{zov} принимает наименьшее значение. При наличии неплотности s или увеличенном зазоре δ_{zp} происходит изменение значения давления P_n^{\min} относительно его начального значения P_n^{\min} при отсутствии отклонений данных структурных параметров. Наличие неплотности s приводит к возрастанию, а увеличенное значение зазора δ_{zp} – к снижению давления P_n^{\min} .

Структурные параметры k и δ_{zi} практически не оказывают влияние на характер зависимостей $q_c = f(P_n)$ и $t_{zov} = f(P_n)$. При наличии неплотности k зависимость $Q_0^{cp} = f(P_n)$ имеет нелинейный характер, при увеличенном зазоре δ_{zi} зависимость $Q_0^{cp} = f(P_n)$ является практически линейной.

Анализ характера полученных при диагностировании ЭГФ на стенде зависимостей диагностических параметров от давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор позволяет получить дополнительную информацию о техническом состоянии её отдельных компонентов, т.е. увеличить глубину поиска неисправностей.

Исходя из результатов исследований, можно предложить рациональную последовательность диагностирования ЭГФ на стенде: на первом этапе проводится определение и анализ значений диагностических параметров на режимах работы, предписанных тест-планом. В случае если значения диагностических параметров превышают допустимые $q_{c,D}$, $Q_0^{cp,D}$, то проводится второй этап диагностирования для выявления конкретных неисправностей. При реализации второго этапа диагностирования определяются и анализируются зависимости диагностических параметров от давления тестовой жидкости на входе в аккумулятор при постоянной длительности управляющих импульсов. С учётом выявленных отклонений диагностических параметров на первом этапе диагностирования и характера полученных на втором этапе диагностирования зависимостей определяется наличие отклонения того или иного структурного параметра, т.е. конкретная неисправность. Блок-схема диагностического алгоритма показана на рисунке 12.

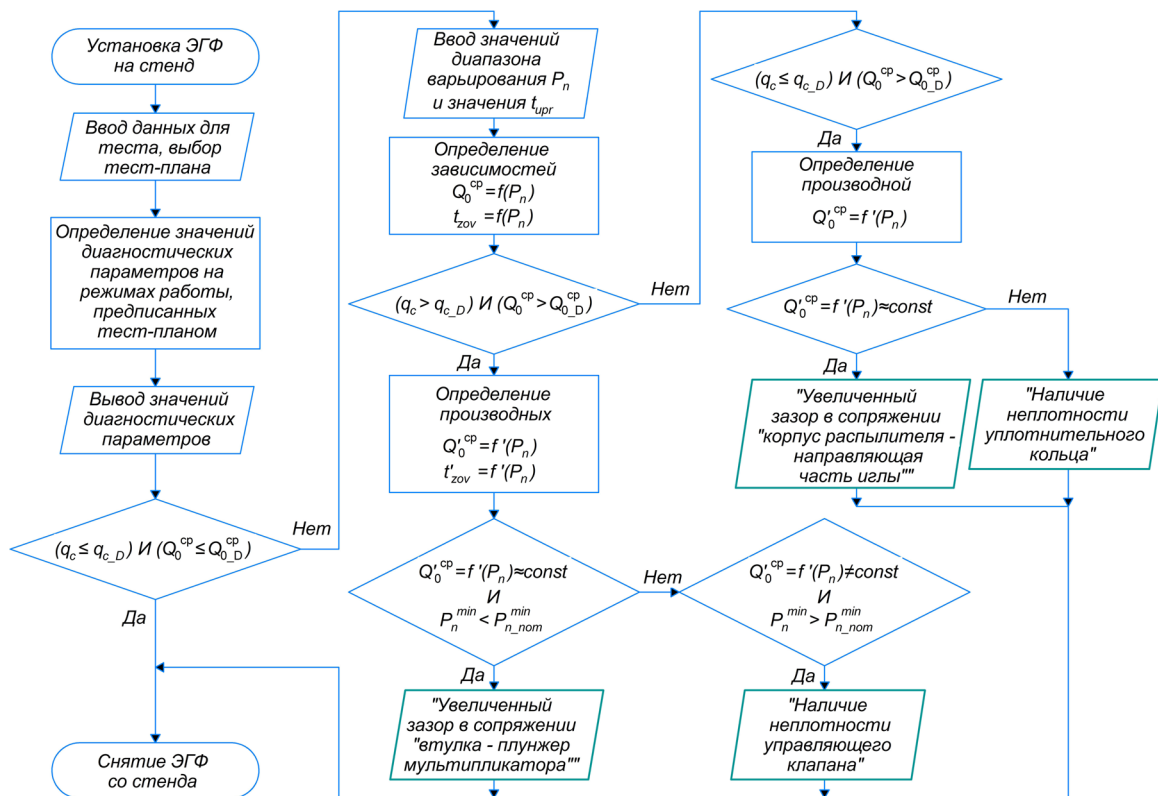


Рисунок 12 – Блок-схема диагностического алгоритма
Источник: составлено авторами.

Figure 12 – Diagnostic algorithm
Source: compiled by the authors.

Полученные во время исследований результаты свидетельствуют о возможности повышения глубины поиска неисправностей при стендовом диагностировании ЭГФ путём анализа характера зависимостей диагностических параметров от величины давления тестовой жидкости на входе в жидкостный аккумулятор стенда при постоянной длительности управляющих импульсов. Результаты подтверждают перспективность проведения дальнейших теоретических и экспериментальных исследований, направленных на совершенствование методов и средств диагностирования ЭГФ с целью повышения глубины поиска неисправностей. При проведении дальнейших исследований целесообразно увеличить число рассматриваемых структурных параметров и оценить возможность локализации неисправностей при наличии отклонений одновременно нескольких структурных параметров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Krogerus T., Hyyönen M., Huhtala K. A Survey of Analysis, Modeling, and Diagnostics of Die-

sel Fuel Injection Systems. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2016; 138 (8): 1-11. DOI: 10.1115/1.4032417

2. Krogerus T., Huhtala K. Diagnostics and Identification of Injection Duration of Common Rail Diesel Injectors. *Open Engineering*. 2018; 8 (1): 1-6. давление в рампе DOI: 10.1515/eng-2018-0001

3. Kluczyk M., Grządziela A. Vibration diagnostics of common rail injectors. *Journal of Marine Engineering & Technology*. 2017; 16 (4): 177-184. DOI: 10.1080/20464177.2017.1387088

4. Jocanovic M. T., Karanovic V. V., Knezevic D. M., Orosnjak M. D. Diesel fuel filtration problems with modern common rail injection systems. *Military Technical Courier*. 2017; 65(4): 968-993.

5. Chomik Z., Lagowski P. The analysis of mechanical damage of Common Rail injectors. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. 2019; 64 (1): 13-20.

6. Ignaciuk P., Gil L. Damages to injectors in diesel engines. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2014; 8 (21): 58-61. DOI: 10.12913/22998624.1091880

7. Журавский Б.В., Жигадло А.П. Диагностирование электрогидравлических форсунок силового агрегата автомобиля по изменению давления в топливном аккумуляторе в момент впрыска // Вест-

ник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2025. № 2(81). С. 71–85. EDN XHUNBI.

8. Payri F., Luján J., Guardiola C., Rizzoni G. Injection diagnosis through common-rail pressure measurement. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part D-journal of Automobile Engineering*. 2006; 220 (3): 347-357. DOI: 10.1243/09544070JAU-TO34.

9. Журавский Б.В. Влияние структурных параметров электрогидравлической топливной форсунки дизельного двигателя на совокупность диагностических параметров // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 2 (90). С. 230-247. DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-2-230-247 EDN IAPLDF.

10. Журавский Б.В. Совершенствование диагностирования электрогидравлических форсунок дизельных двигателей с аккумуляторной системой впрыска топлива // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 3. С. 589–596. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-3-589-590 EDN HZPVBG.

11. Stoeck T. Analytical methodology for testing common rail fuel injectors in problematic cases. *Diagnostyka*. 2021; 22(3): 47-52. DOI: 10.29354/diag/135999

12. Stoeck T. Article citation info: Diagnostic method for a piezoelectric injector using the Newton-Cotes formula. *Combustion Engines*. 2024; 197(2): 106-111. DOI: 10.19206/CE-177132

13. Yakimov I.V., Krivtsov S.N., Potapov A.S., Svirbutovich O.A. Fuel flow and pressure in common return line as a diagnostic parameter of electro-hydraulic injectors technical state. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019; 632(1): 012058. DOI:10.1088/1757-899X/632/1/012058 EDN ВАККВН.

14. Song E., Ke Y., Yao C., Dong Q., Yang L. Fault Diagnosis Method for High-Pressure Common Rail Injector Based on IFOA-VMD and Hierarchical Dispersion Entropy. *Entropy (Basel)*. 2019; 21 (10): 1-20. DOI: 10.3390/e21100923

15. Неговора А.В., Козеев А.А., Габдрахимов М.М., Махиянов У.А. Модуль для поэтапного диагностирования топливоподающей системы дизелей // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2010. № 3. С. 13–14.

16. Жигадло А.П., Макушев Ю.П. Теоретические исследования и техническое обслуживание форсунок с электрогидравлическим управлением // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, №6(88). С. 842–857. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-6-842-857 EDN WWGTJJ.

17. Crăciun I., Dumitras C. Research on the Maintenance of Common-Rail Injectors. *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. Machine constructions Section*. 2022; 68: 124-136. DOI: 10.2478/bipcm-2022-0028

18. Абаляев А.Ю., Пигарина А.А. Математическая модель гидродинамических процессов в электрогидравлической форсунке // Двигателестроение. 2000. № 1. С. 13–14.

19. Григорьев А.Л., Прохоренко А.А., Рыкова И.В. Анализ устойчивости и сходимости числен-

ных методов интегрирования дифференциальных уравнений электрогидравлической форсунки дизеля // Двигатели внутреннего сгорания. 2013. № 2. С. 3–8.

REFERENCES

1. Krogerus T., Hyvönen M., Huhtala K. A Survey of Analysis, Modeling, and Diagnostics of Diesel Fuel Injection Systems. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2016; 138 (8): 1-11. DOI: 10.1115/1.4032417

2. Krogerus T., Huhtala K. Diagnostics and Identification of Injection Duration of Common Rail Diesel Injectors. *Open Engineering*. 2018; 8 (1): 1-6. DOI: 10.1515/eng-2018-0001

3. Kluczyk M., Grządziela A. Vibration diagnostics of common rail injectors. *Journal of Marine Engineering & Technology*. 2017; 16 (4): 177-184. DOI: 10.1080/20464177.2017.1387088

4. Jocanovic M.T., Karanovic V.V., Knezevic D.M., Orosnjak M.D. Diesel fuel filtration problems with modern common rail injection systems. *Military Technical Courier*. 2017; 65(4): 968-993.

5. Chomik Z., Lagowski P. The analysis of mechanical damage of Common Rail injectors. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. 2019; 64 (1): 13-20.

6. Ignaciuk P., Gil L. Damages to injectors in diesel engines. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2014; 8 (21): 58-61. DOI: 10.12913/22998624.1091880

7. Zhuravsky B.V., Zhigadlo A.P. Diagnosing electro-hydraulic injectors of a car power unit based on changes in pressure in the fuel accumulator at the time of injection. *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta (MADI)*. 2025; (2): 71-85. (In Russ.) EDN XHUNBI.

8. Payri F., Luján J., Guardiola C., Rizzoni G. Injection diagnosis through common-rail pressure measurement. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part D-journal of Automobile Engineering*. 2006; 220 (3): 347-357. DOI: 10.1243/09544070JAU-TO34

9. Zhuravsky B.V. Influence of structural parameters of an electrohydraulic fuel injector of a diesel engine on a set of diagnostic parameters. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (2): 230-247. (In Russ.) DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-2-230-247 EDN IAPLDF.

10. Zhuravsky B.V. Improving the diagnosis of electrohydraulic injectors of diesel engines with a battery fuel injection system. *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*. 2024; (3): C. 589-596. (In Russ.) DOI: 10.24412/2071-6168-2024-3-589-590 EDN HZPVBG.

11. Stoeck T. Analytical methodology for testing common rail fuel injectors in problematic cases. *Diagnostyka*. 2021; 22(3): 47-52. DOI: 10.29354/diag/135999

12. Stoeck T. Article citation info: Diagnostic method for a piezoelectric injector using the Newton-Cotes formula. *Combustion Engines*. 2024; 197(2): 106-111. DOI: 10.19206/CE-177132

13. Yakimov I.V., Krivtsov S.N., Potapov A.S., Svirbutovich O.A. Fuel flow and pressure in common return line as a diagnostic parameter of electro-hydraulic injectors technical state. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019; 632(1): 012058. DOI:10.1088/1757-899X/632/1/012058 EDN BAKKBH.

14. Song E., Ke Y., Yao C., Dong Q., Yang L. Fault Diagnosis Method for High-Pressure Common Rail Injector Based on IFOA-VMD and Hierarchical Dispersion Entropy. *Entropy (Basel)*. 2019; 21 (10): 1-20. DOI: 10.3390/e21100923

15. Negovora A.V., Kozeev A.A., Gabdrahimov M.M., Mahiyarov U.A. Module for element-by-element diagnostics of diesel fuel supply system. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo hozyajstva*. 2010; (3): 13-14. (In Russ.)

16. Zhigadlo A.P., Makushev Yu.P. Theoretical research and maintenance of electro hydraulically controlled injectors. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (6): 842-857. (In Russ.) DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-6-842-857 EDN WWGTJJ.

17. Crăciun I., Dumitras C. Research on the Maintenance of Common-Rail Injectors. *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. Machine constructions Section*. 2022; 68: 124-136. DOI: 10.2478/bipcm-2022-0028

18. Abalyaev A.Yu., Pigarina A.A. Mathematical model of hydrodynamic processes in an electrohydraulic nozzle. *Dvigatellestroenie*. 2000; (1): 13-14. (In Russ.)

19. Grigor'ev A.L., Prohorenko A.A., Rykova I.V. Analysis of stability and convergence of numerical methods for integrating differential equations of an electrohydraulic diesel injector. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*. 2013; (2): 3-8. (In Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД СОАВТОРОВ

Журавский Б.В. Вклад в работу заключается в общей организации, разработке методологии, проведении аналитических исследований.

Цехош С.И. Вклад в общую работу заключается в анализе, интерпретации и визуализации данных, валидации, подготовке и оформлении текста статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Zhuravsky B.V. Contribution to the overall work includes the general organization of research, development of methodology, and conducting analytical research.

Tsekhosh S.I. Contribution to the overall work includes analysis, data interpretation and visualization, validation, writing the manuscript.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Журавский Борис Викторович – доц. кафедры «Автомобильный транспорт» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4516-2607>,

SPIN-код: 9160-2781,

e-mail: ra9meo@mail.ru

Цехош София Ивановна – канд. техн. наук, доц. Академического департамента (УИОТ) Тюменского государственного университета (625003, г. Тюмень, ул. Володарского, д.6).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4904-4173>,

SPIN-код: 3450-0029,

e-mail: sofia.tsekhosh@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhuravsky Boris V. – Associate Professor at the Automotive Transport Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4516-2607>,

SPIN-code: 9160-2781,

e-mail: ra9meo@mail.ru

Tsekhosh Sofia I. – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor at the Academic Department (UIOT) of Tyumen State University (6, Volodarsky St., Tyumen, 625003).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4904-4173>,

SPIN-code: 3450-0029,

e-mail: sofia.tsekhosh@yandex.ru