

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.651

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-84-91>



Автоматизированная система регулирования давления пара пароплазменного горелочного устройства систем отопления сельскохозяйственных предприятий

Д.Д. Медведев¹, В.И. Грищенко²

^{1,2} Донской государственный технический университет; г. Ростов-на-Дону, Россия

¹ 19medvedev97@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3047-711X>

² vig84@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1422-2811>

Аннотация. Обеспечение регулируемого и устойчивого давления пара в пароплазменном горелочном устройстве является одной из приоритетных задач проектирования системы отопления сельскохозяйственных предприятий. Существующие методы регулирования, основанные на использовании типовых регуляторов ПИД-типа, не позволяют достичь высокого КПД отопительной установки. Исследования проведены с целью разработки компьютерной модели автоматизированной системы регулирования давления пара пароплазменного горелочного устройства мощностью до 1 МВт и определения оптимальных коэффициентов регулятора, обеспечивающих стабилизацию давления пара. Компьютерная модель автоматизированной системы регулирования давления пара пароплазменного горелочного устройства, разработанная в программе Matlab/Simulink, включает в себя радиально-плунжерный насос, распределительный узел, пароплазменный генератор и систему управления на основе пропорционально-интегрального регулятора. Проведено моделирование динамических процессов в системе при фиксированных частотах вращения вала 100, 200, 300 и 477 об/мин и диапазоне давления пара 0...23 бар. Исследовано влияние параметров ПИ-регулятора на переходные процессы и устойчивость работы. В результате вычислительных экспериментов определены оптимальные коэффициенты ПИ-регулятора, обеспечивающие минимальное время переходного процесса (не более 7 сек.) и отклонение давления не выше 4% от заданного значения. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного метода регулирования и возможность его практической реализации в системах автоматического управления жидкотопливными горелками на сельскохозяйственных предприятиях.

Ключевые слова: автоматизированная система регулирования давления пара; радиально-плунжерный насос; пароплазменное горелочное устройство; пароплазменный генератор; компьютерная модель; давление пара; ПИ-регулятор

Для цитирования: Медведев Д.Д., Грищенко В.И. Автоматизированная система регулирования давления пара пароплазменного горелочного устройства систем отопления сельскохозяйственных предприятий // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 2. С. 84-91. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-84-91>

ORIGINAL ARTICLE

Automated steam pressure control system for steam-plasma burners in heating systems of agricultural enterprises

D.D. Medvedev¹, V.I. Grishchenko²

^{1,2} Don State Technical University; Rostov-on-Don, Russia

¹ 19medvedev97@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3047-711X>

² vig84@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1422-2811>

Abstract. Ensuring regulated and stable steam pressure in a steam-plasma burner device is a priority objective in the design of heating systems for agricultural enterprises. Existing control methods based on standard PID-type controllers do not provide high efficiency of the heating system. The research aimed to develop a computer model of an automated steam pressure control system for a steam-plasma burner device with a capacity

of up to 1 MW and to determine the optimal controller coefficients ensuring steam pressure stabilization. The computer model of the automated steam pressure control system for the steam-plasma burner device, developed in the Matlab/Simulink environment, includes a radial piston pump, a distribution unit, a steam-plasma generator, and a control system based on a proportional-integral controller. Dynamic processes in the system were simulated at fixed shaft rotation speeds of 100, 200, 300, and 477 rpm and a steam pressure range of 0 to 23 bar. The authors examined the influence of the PI controller parameters on transient processes and operational stability. Computational experiments resulted in determining optimal PI controller coefficients, providing a minimum transient time (no more than 7 seconds) and a pressure deviation not exceeding 4% of the setpoint value. The obtained results confirm the effectiveness of the proposed control method and the feasibility of its practical implementation in automatic control systems for liquid-fuel burners used at agricultural enterprises.

Keywords: automated steam pressure control system; radial piston pump; steam-plasma burner device; steam-plasma generator; steam pressure; computer model; PI controller (proportional-integral controller)

For citation: Medvedev D.D., Grishchenko V.I. Automated steam pressure control system for steam-plasma burners in heating systems of agricultural enterprises. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(2):84-91 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-84-91>

Введение

Энергоэффективность и экологическая безопасность систем теплоснабжения сельскохозяйственных предприятий способствует устойчивому развитию агропромышленного комплекса [1, 2]. Традиционные источники отличаются высокой стоимостью и значительными выбросами загрязняющих веществ при сжигании жидкого топлива [3, 4]. В качестве альтернативы перспективны технологии с использованием пароплазменных горелочных устройств, позволяющих достигать высоких температурных режимов, эффективно утилизировать различные виды топлива и минимизировать вредное воздействие на окружающую среду [5-7]. Форсунки жидкотопливных горелок, как правило, калибруются по давлению на производстве. В пароплазменных горелочных устройствах для обеспечения стабильности процесса целесообразно применять системы управления по давлению.

Важнейшим элементом пароплазменных горелочных устройств является узел подачи воды, от стабильности и точности работы которого зависят эффективность и надежность процесса горения [8]. Ключевым компонентом этого узла служит радиально-плунжерный насос подачи воды, обеспечивающий формирование необходимого давления пара, используемого для диспергирования топлива [9]. Стабилизация давления воды необходима для поддержания постоянной скорости потока струи пара на входе в форсунку, что обеспечивает лучшую диспергацию топлива паром, и в конечном счете – высокий КПД всей отопительной установки [10, 11]. Таким образом, обеспечение регулируемого и устойчивого давления пара является одной из приоритетных задач при проектировании системы.

Существующие методы регулирования основаны, как правило, на использовании типовых

регуляторов (ПИД-типа) [12], параметры которых часто настраиваются эмпирически без учета динамических характеристик конкретного насоса и нелинейной природы его работы. Такой подход не позволяет в полной мере компенсировать возмущения и обеспечивать оптимальное качество переходных процессов в системе.

Цель исследований: разработка компьютерной модели автоматизированной системы регулирования давления пара пароплазменного горелочного устройства и определение оптимальных коэффициентов регулятора, обеспечивающих стабилизацию давления пара.

Материалы и методы

Объектом исследований является система подачи воды пароплазменного горелочного устройства мощностью до 1 МВт, в основе которого лежит радиально-плунжерный насос [9] (рис. 1).

Организация потоков в форсунке пароплазменной горелки (рис. 2) предполагает, что по осевому каналу радиально-плунжерным насосом подается диспергирующий агент (перегретый пар) и формируется необходимое давление $P_{пара}$, а по радиальному каналу – топливо ($P_{топлива}$). В зоне смешения на срезе форсунки происходит взаимодействие струй, приводящее к разрушению топливной пленки и образованию мелкодисперсного аэрозоля с давлением $P_{смеси}$. Ключевым фактором, обеспечивающим эффективное распыление и стабилизацию факела, является поддержание заданной скорости истечения пара, что в свою очередь требует стабилизации рабочего давления на входе в форсунку ($P_{пара}$).

Моделирование процессов, происходящих при работе реальных насосов, осложняется нестационарностью потоков рабочей жидкости и нестабильностью реальных воздействий на систему. Для анализа

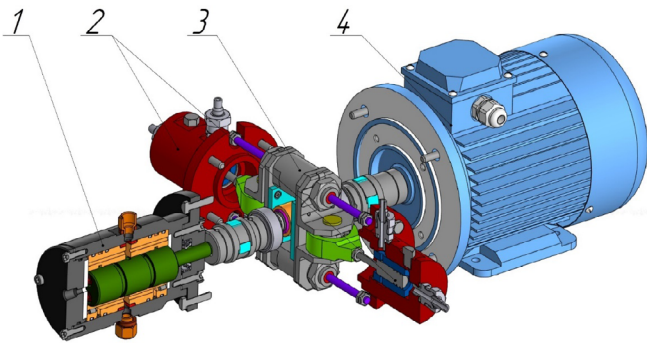


Рис. 1. Радиально-плунжерный насос подачи воды пароплазменной горелки:

- 1 – распределительный узел; 2 – качающий узел;
- 3 – кулачковый механизм; 4 – электродвигатель

Fig. 1. Radial piston pump for water supply to a steam plasma burner:

- 1 – distribution unit; 2 – pumping unit;
- 3 – cam mechanism; 4 – electric motor

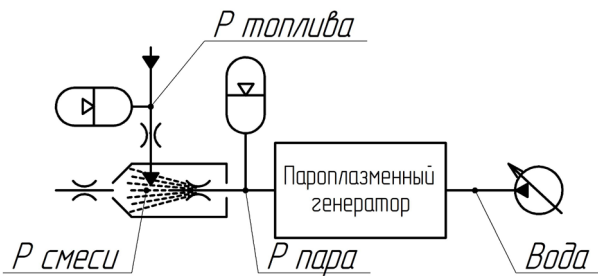


Рис. 2. Схема организации потоков в форсунке пароплазменной горелки

Fig. 2. Flow pattern in a steam-plasma burner nozzle

и проектирования системы подачи воды, обеспечивающей требуемые параметры пара на входе в форсунку, в программе Matlab/Simulink разработана компьютерная модель (рис. 3). Для упрощения математической модели были приняты следующие допущения:

- характеристики рабочей жидкости (плотность, вязкость, коэффициент расхода и т.п.) постоянны во всех режимах работы насоса;
- коэффициенты расходов, объемный модуль упругости жидкости постоянны;
- трубопроводы и гидравлические каналы насоса – абсолютно жесткие;
- потери давления ввиду коротких и избыточных по диаметру местных и линейных гидравлических сопротивлений не учитываются.

Исходные данные узла подачи воды представлены в таблице.

Для регулирования давления пара пароплазменных горелочных устройств системы, представляющей собой инерционный объект с пульсациями, выбран ПИ-регулятор с фильтрацией входного сигнала [13]. Для настройки ПИ-регулятора использовали встроенное в MATLAB/Simulink приложение PID Tuner (рис. 4), представляющее собой инструмент параметрического синтеза линейных регуляторов, осуществляющий на основе линеаризованной математической модели объекта управления автоматический подбор коэффициентов методом частотной оптимизации.

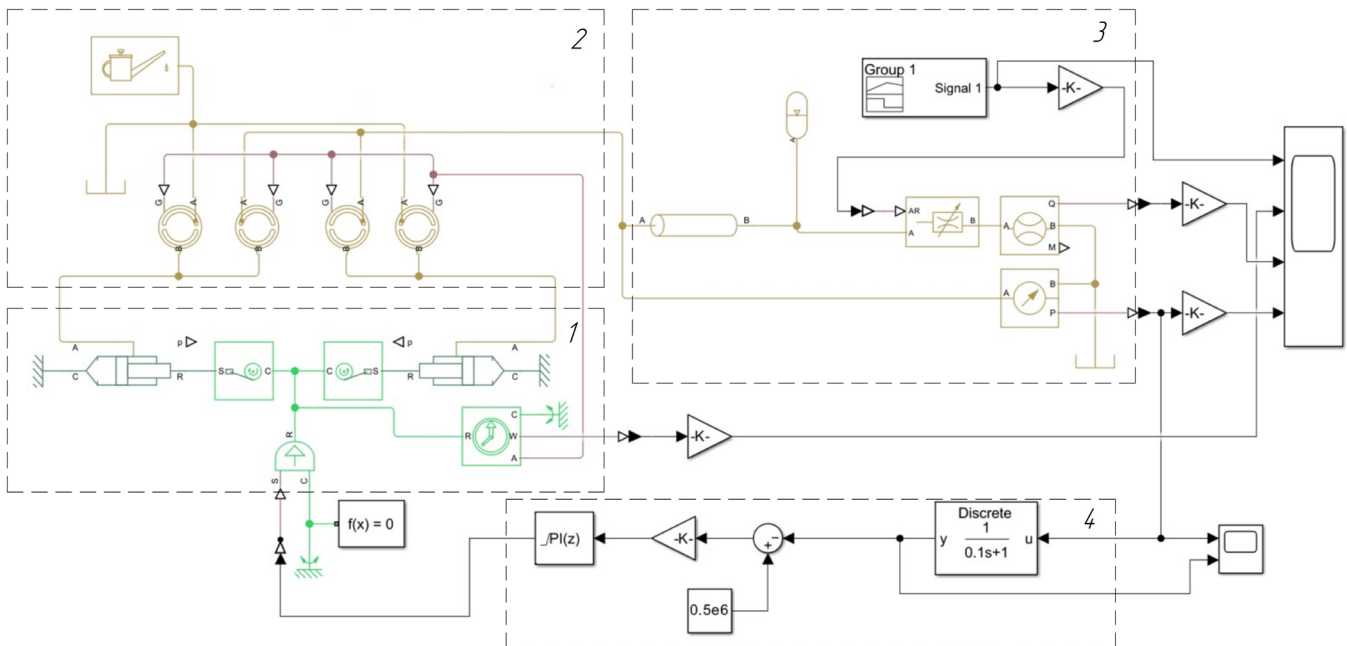


Рис. 3. Автоматизированная система регулирования давления пара пароплазменного горелочного устройства (компьютерная модель):

- 1 – узел насоса; 2 – распределительный узел; 3 – пароплазменный генератор; 4 – система управления

Fig. 3. Automated steam pressure control system for a steam plasma burner (computer model):

- 1 – pump unit; 2 – distribution unit; 3 – steam plasma generator; 4 – control system

Алгоритм настройки базируется на формировании желаемой частотной характеристики разомкнутой системы путем вариации целевой полосы пропускания и минимального запаса устойчивости по фазе, что позволяет достичь компромисса между быстродействием, робастностью и качеством переходных процессов.

Представленная на рисунке 3 модель включает в себя четыре основных функциональных узла.

Качающий узел насоса 1 представляет собой два гидравлических цилиндра одностороннего действия. Привод осуществляется от источника угловой скорости (имитация электродвигателя) через кривошипно-шатунный механизм, преобразующий вращательное движение вала в возвратно-поступательное движение поршней насоса.

Оригинальный распределительный узел 2 (вращающийся золотник) насоса содержит четыре канала переменного сечения, попарно связывающие полости гидроцилиндров с линией всасывания (источник жидкости под атмосферным давлением) и линией нагнетания.

Модель пароплазменного генератора 3 включает в себя участок трубопровода и газонаполненный гидроаккумулятор, содержащий воду и пар,

имитирующий пароперегреватель. Выходной поток регулируется дросселем переменного сечения, имитирующим сопло форсунки горелки.

Таблица

Исходные данные узла подачи воды

Table

Input data for the water supply assembly

Параметр	Значение
Диаметр отверстия дросселя, м	0,005
Диаметр каналов золотника, м	0,004
Диаметр плунжера, м	0,013
Ход плунжера, м	0,005
Диаметр золотника, м	0,03
Модуль упругости жидкости, МПа	2289
Коэффициент динамической вязкости рабочей жидкости при 60 С°, сСт	0,47
Плотность рабочей жидкости при 60 С°, кг/м³	984
Коэффициент расхода эквивалентного дросселя	0,7
Коэффициент расхода канала золотника	0,6
Объем трубки подачи пара, м³	0,024
Атмосферное давление, Па	100000

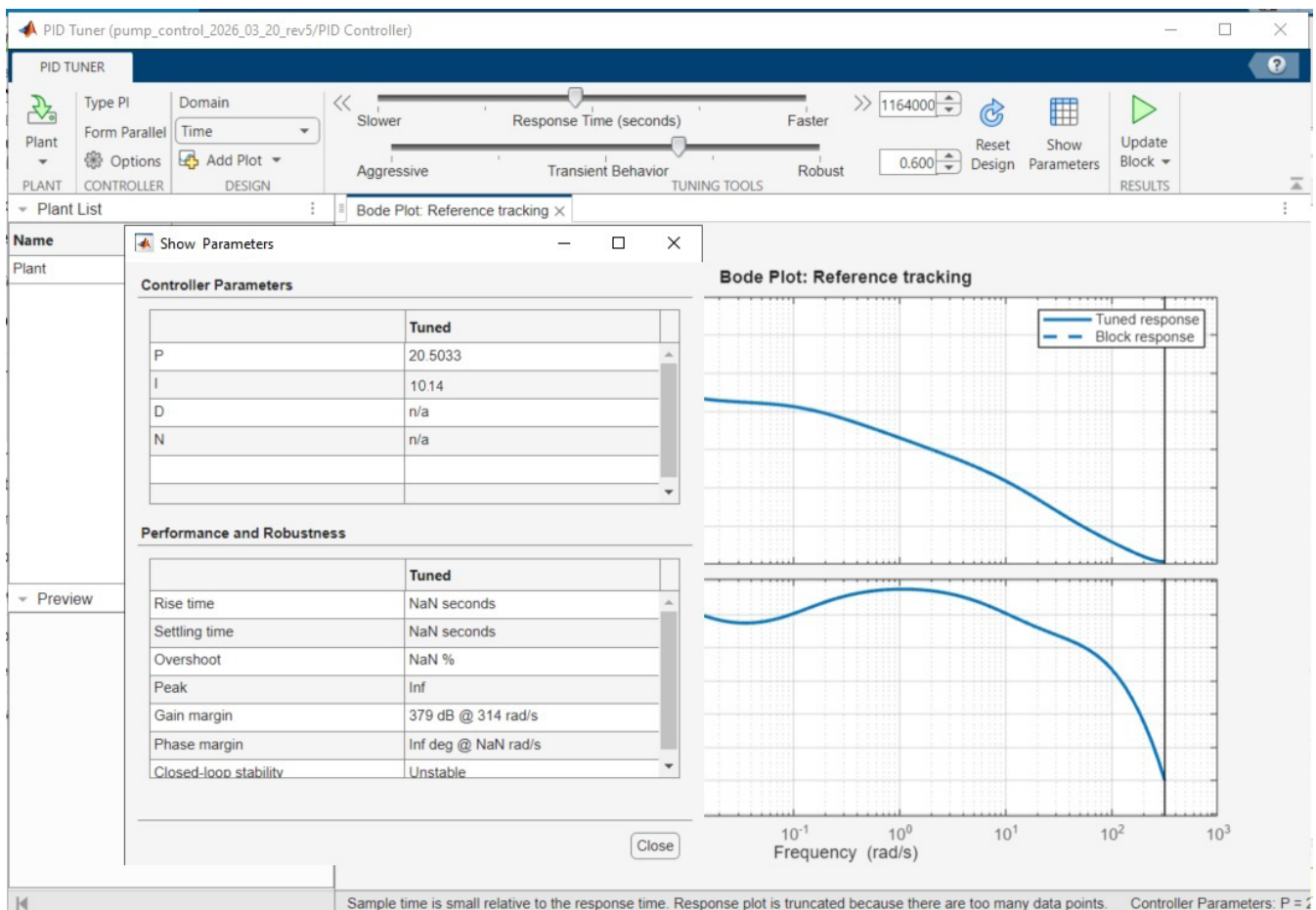


Рис. 4. Окно приложения PID Tuner

Fig. 4. The PID Tuner application window

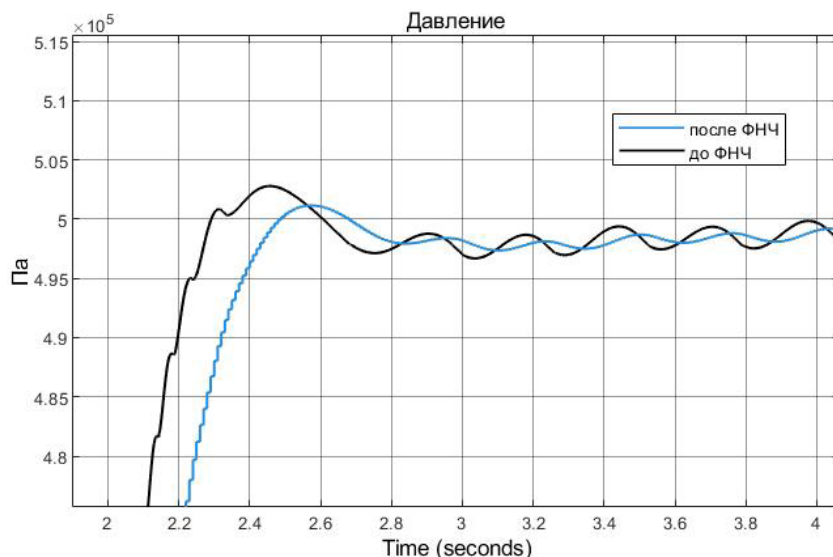


Рис. 5. Сигнал давления до ФНЧ и после него

Fig. 5. Pressure signal before and after the low-pass filter

Система управления 4 реализована для стабилизации давления в системе. Фильтр низких частот (ФНЧ) подавляет высокочастотные пульсации давления, возникающие по причине прерывистого характера работы насоса (рис. 5). Блок константы задает уставку давления. ПИ-регулятор поддерживает давление на нужном уровне.

Результаты и их обсуждение

В результате произведенных вычислений получены зависимости производительности насоса в диапазоне давления 0...25 бар при фиксированных частотах вращения вала 100, 200, 300 и 477 об/мин (рис. 6).

При частоте вращения вала 477 об/мин с ростом давления пара до 25 бар производительность насоса понизилась на 18% (рис. 6). При меньших частотах вращения вала и в том же диапазоне давления пара производительность насоса снизилась менее чем на 10%. Чувствительность подачи воды от давления на выходе насоса объясняется повышающими внутренними перетечками в нем при повышении давления. В связи с этим возникла необходимость разработки автоматизированной системы регулирования давления пара на основе ПИ-регулятора.

Осциллограммы частоты вращения вала насоса, подачи и давления пара на форсунке при изменяющейся нагрузке от времени без применения регулятора по давлению и с ПИ-регулятором представлены на рисунках 7-9.

При изменяющейся нагрузке в форсунке без участия регулятора выход на режим происходит за 9 сек. (рис. 7), колебание давления и подачи пара достигает 35%. В системе с регулятором выход на режим осуществляется за 2,5 сек., давление

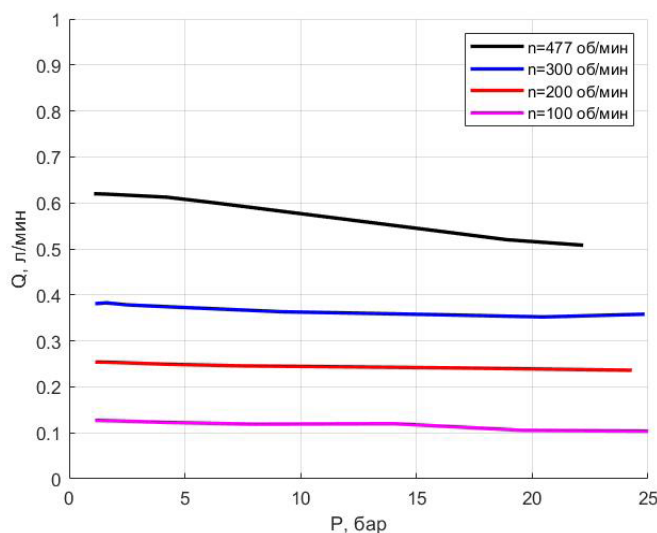


Рис. 6. Зависимость подачи (Q , л/мин) от давления (P , бар) радиально-плунжерного насоса
Fig. 6. Relationship between pump displacement (Q , l/min) and the pressure (P , bar) of a radial piston pump

поддерживается на уровне уставки в 5 бар с отклонением менее 4%.

При уставке давления 10 бар в системе без регулятора выход на режим происходит за 10 сек., давление изменяется в пределах 18% от заданного (рис. 8). С регулятором выход на режим достигается за 4 сек., давление поддерживается на уровне уставки в 10 бар с отклонением менее 2,5%.

При уставке давления 15 бар в системе без регулятора выход на режим происходит за 10 сек. (рис. 9), давление изменяется в пределах 25% от заданного; с регулятором выход на режим – за 6,2 сек., давление поддерживается на уровне уставки в 15 бар с отклонением менее 2,5%.

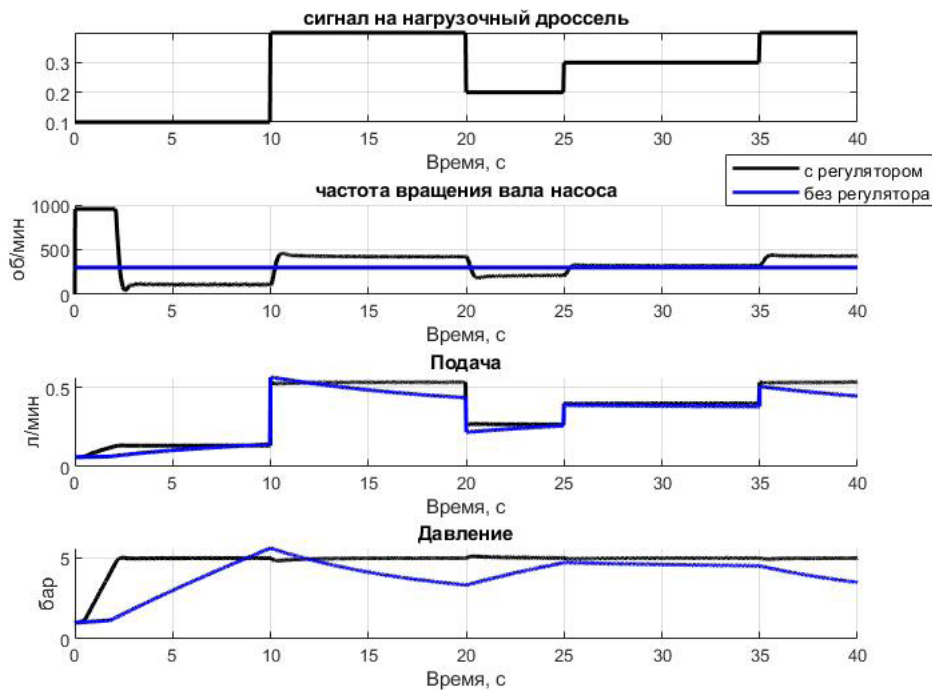


Рис. 7. Зависимости частоты вращения вала насоса, подачи, давления пара при уставке давления 5 бар и изменяющейся нагрузке в форсунке
Fig. 7. Interrelationship of pump shaft speed, pump displacement, steam pressure at 5 bar and variable load in the injection nozzle

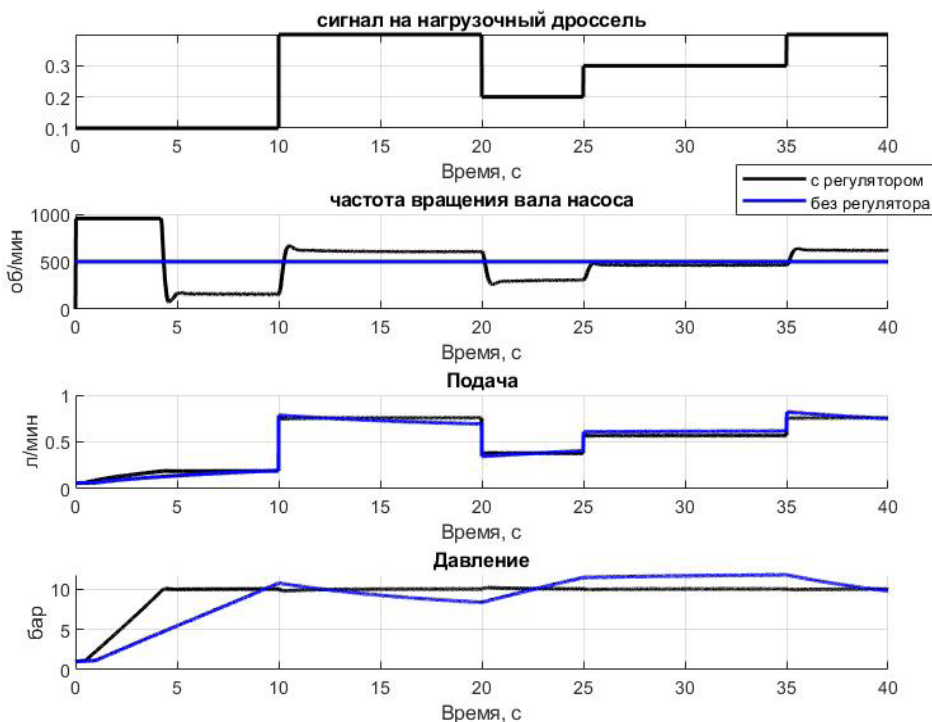


Рис. 8. Зависимости частоты вращения вала насоса, подачи, давления пара при уставке давления 10 бар и изменяющейся нагрузке в форсунке
Fig. 8. Interrelationship of pump shaft speed, pump displacement, steam pressure at 10 bar and variable load in the injection nozzle

Результаты подтверждают, что полученные в ходе настройки ПИ-регулятора в приложения PID Tuner коэффициент пропорционального звена $K_p = 20,5033$ и коэффициент интегрального звена

$K_i = 10,14$ обеспечивают устойчивость замкнутой системы. Целесообразность применения ПИ-регулятора для данного класса технологических объектов доказана.

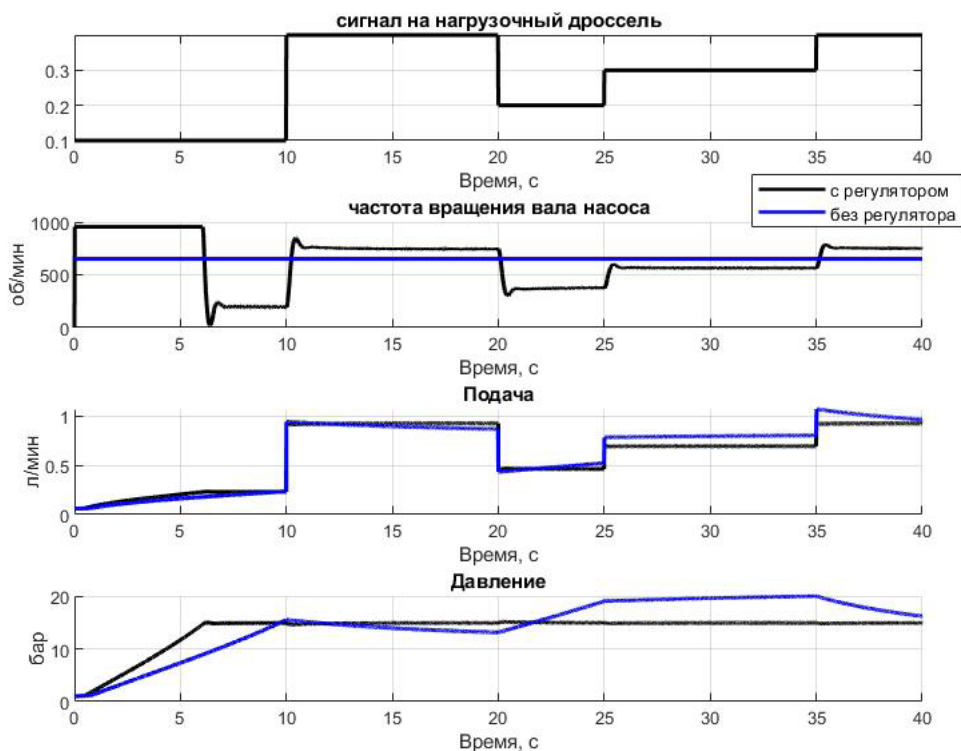


Рис. 9. Зависимости частоты вращения вала насоса, подачи, давления пара при уставке давления 15 бар и изменяющейся нагрузке в форсунке.

Fig. 9. Interrelationship of pump shaft speed, pump displacement, steam pressure at 15 bar and variable load in the injection nozzle

Выводы

Разработанная компьютерная модель радиально-плунжерного насоса подачи воды и системы управления позволяет анализировать динамические характеристики и оценивать устойчивость работы узла подачи воды в условиях, характерных для пароплазменного горелочного устройства мощностью до 1 МВт.

Установленные на основе моделирования оптимальные коэффициенты ПИ-регулятора (коэффициент пропорционального звена $K_p = 20,5033$

и коэффициент интегрального звена $K_i = 10,14$) обеспечивают высокую скорость выхода системы на установившийся режим (5 бар – 2,5 сек., 10 бар – 4 сек., 15 бар – 6,2 сек.) и точность поддержания заданного давления (5 бар – 4%, 10 бар – 2,5%, 15 бар – 2,5%).

Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного подхода к стабилизации давления пара и могут быть использованы при дальнейшей оптимизации систем автоматического управления жидкотопливными горелками.

Список источников

1. Yunli G., Chang Ch., Ju Na. Statistical analysis of fuel combustion and emissions considering the adverse effects of investment economic environment: Exploring alternatives amid oil prices Swings, digital economy, and local market inflation. *Heliyon*. 2024;10(18): e37207. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37207>
2. Osman A.I., Chen L., Yang M. et al. Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2023;21(2):741-764. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01532-8>
3. Грищенко В.И., Медведев Д.Д., Цымбалов Д.С., Яценко О.В. Теоретическое и экспериментальное исследование токсичности дымовых газов жидкотопливного горелочного устройства с двухфакторной активацией внутрикамерных процессов // Обеспечение безопасности: производственной, пожарной, экологической: Материалы I Всероссийской (Национальной) научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 12-13 декабря 2023 г. Ростов-на-Дону, 2023. С. 251-253. EDN: RSJKUQ

References

1. Yunli G., Chang Ch., Ju Na. Statistical analysis of fuel combustion and emissions considering the adverse effects of investment economic environment: Exploring alternatives amid oil prices Swings, digital economy, and local market inflation. *Heliyon*. 2024;10(18): e37207. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37207>
2. Osman A.I., Chen L., Yang M. et al. Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2023;21(2):741-764. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01532-8>
3. Grishchenko V.I., Medvedev D.D., Tsymbalov D.S., Yatsenko O.V. Theoretical and experimental study of the toxicity of flue gases from a liquid fuel burner device with two-factor activation of intra-chamber processes. *Obespechenie bezopasnosti: proizvodstvennoy, pozharnoy, ekologicheskoy* [Ensuring safety: industrial, fire, environmental aspects]: Proceedings of the First All-Russian (National) Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, December 12-13, 2023. Rostov-on-Don, 2023. Pp. 251-253. (In Russ.)

4. Bolegenova S., Askarova A., Georgiev A. et al. The use of plasma technologies to optimize fuel combustion processes and reduce emissions of harmful substances. *Energy*. 2023;277:127635. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127635>
5. Nagar V., Kaushal R. A review of recent advancement in plasma gasification: A promising solution for waste management and energy production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;77:405-419. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.180>
6. Пароплазменное горелочное устройство с внутрицикловой газификацией топлива: Патент № 2769172 C1 Российская Федерация, МПК F23C99/00. № 2021116039 / В.М. Шипилов, В.Л. Артеменко, С.Г. Никольский, Б.Ч. Месхи: заявл. 03.06.2021; Опубл. 29.03.2022. EDN: EKQVDE
7. Электрический индукционный пароперегреватель: Патент на полезную модель № 231993 U1 Российская Федерация, МПК H05B6/10 / В.М. Шипилов, Х.М. Махьянов, В.Л. Артеменко; заявл. 16.12.2024; Опубл. 20.02.2025. EDN: GVOZNF
8. Медведев Д.Д., Грищенко В.И., Ивлиев Е.А., Сидоренко В.С. Математическое моделирование гидравлического плунжерного насоса малого расхода // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 12. С. 335-342. EDN: HXRGTX
9. Beskopylny A.N., Medvedev D., Grishchenko V., Ivliev E. Development of a small-working-volume plunger hydraulic pump with improved performance characteristics. *Actuators*. 2025;14(1):34. <https://doi.org/10.3390/act14010034>
10. Бараниченко В.В., Грищенко В.И., Цымбалов Д.С., Яценко О.В. Косвенное определение дисперсности распыленного топлива по геометрии зоны пятна смачивания // Инженерный вестник Дона. 2023. № 12 (108). С. 593-601. EDN: EMHIEY
11. Романова М.Н., Лебедев А.Е., Ватагин А.А., Лебедев Д.В. Определение гидродинамических характеристик однородных и двух несмешивающихся жидкостей // Инженерный вестник Дона. 2019. № 2 (53). С. 66. EDN: UIEZWD
12. Mitov A., Slavov T., Kralej J. Comparison of advanced multivariable control techniques for axial-piston pump. *Processes*. 2024;12(9):1797. EDN: NWWUHM
13. Bin Roslan M.N., Bingi K., Devan P.A.M., Ibrahim R. Design and development of complex-order pi-pd controllers: Case studies on pressure and flow process control. *Applied System Innovation*. 2024;7(3):33. EDN: WWYTNA
4. Bolegenova S., Askarova A., Georgiev A. et al. The use of plasma technologies to optimize fuel combustion processes and reduce emissions of harmful substances. *Energy*. 2023;277:127635. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127635>
5. Nagar V., Kaushal R. A review of recent advancement in plasma gasification: A promising solution for waste management and energy production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;77:405-419. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.180>
6. Shipilov V.M., Artemenko V.L., Nikolsky S.G., Meskhi B. Ch. Steam plasma burner device with in-cycle gasification of fuel: Patent, No. 2769172 C1 Russian Federation, IPC F23C99/00. No. 2021116039: applied on 03.06.2021: issued on 29.03.2022. (In Russ.)
7. Shipilov V.M., Makhyanov Kh.M., Artemenko V.L. Electric induction steam superheater: Patent for utility model No. 231993 U1 Russian Federation, IPC H05B6/10. Applied on 16.12.2024: issued on 20.02.2025. (In Russ.)
8. Medvedev D.D., Grishchenko V.I., Ivliev E.A., Sidorenko V.S. Mathematical modelling of a low-flow hydraulic plunger pump. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskije nauki*. 2023;12:335-342. (In Russ.)
9. Beskopylny A.N., Medvedev D., Grishchenko V., Ivliev E. Development of a small-working-volume plunger hydraulic pump with improved performance characteristics. *Actuators*. 2025;14(1):34. <https://doi.org/10.3390/act14010034>
10. Baranichenko V.V. et al. Indirect determination of the dispersity of atomized fuel from the geometry of the wetting spot zone. *Engineering Journal of Don*. 2023;12 (108):50. (In Russ.)
11. Romanova M.N., Lebedev A.E., Vatagin A.A., Lebedev D.V. Determination of the hydrodynamic characteristics of homogeneous and two immiscible liquids. *Engineering Journal of Don*. 2019;2(53):66.
12. Mitov A., Slavov T., Kralej J. Comparison of advanced multivariable control techniques for axial-piston pump. *Processes*. 2024;12(9):1797.
13. Bin Roslan M.N., Bingi K., Devan P.A.M., Ibrahim R. Design and development of complex-order pi-pd controllers: Case studies on pressure and flow process control. *Applied System Innovation*. 2024;7(3):33.

Информация об авторах

- ¹Медведев Денис Дмитриевич, инженер, преподаватель;
19medvedev97@mail.ru;
<https://orcid.org/0000-0003-3047-711X>
- ²Грищенко Вячеслав Игоревич, канд. техн. наук,
заведующий кафедрой; vig84@yandex.ru;
<https://orcid.org/0000-0003-1422-2811>
- ^{1,2}Донской государственный технический университет,
344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону,
пл. Гагарина, 1

Вклад авторов

Д.Д. Медведев – проведение исследований, сбор и обработка данных, формальный анализ, подготовка черновика рукописи, визуализация;
В.И. Грищенко – руководство исследованиями, концептуализация, методология, научное редактирование и доработка окончательной версии рукописи.

Статья поступила 13.10.2025, после рецензирования и доработки 24.03.2026, принята к публикации 26.03.2026

Author Information

- Denis D. Medvedev¹, engineer, lecturer;
19medvedev97@mail.ru[✉];
<https://orcid.org/0000-0003-3047-711X>
- Vyacheslav I. Grishchenko², CSc (Eng), Head of Department;
vig84@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1422-2811>
- ^{1,2}Don State Technical University; 344003, Russia, Rostov-on-Don,
Gagarin Sq. 1

Author Contribution

D.D. Medvedev – investigation, data curation, formal analysis, writing – original draft, visualization;
V.I. Grishchenko – research supervision, conceptualization, methodology, writing – review and editing of the manuscript.

Received 13.10.2025; Revised 24.03.2026; Accepted 26.03.2026