УДК 681.5:66.011.56:543
DOI: 10.26102/2310-6018/2026.57.6.019

Система автоматизированного контроля и управления параметрами ионизированной паровой среды

А.И. Степулёв[1], Е.Ю. Дульский[2]✉, П.Ю. Иванов[2], А.С. Ковшин[2], В.П. Медведев[1]

[1]ООО «АИС-ТЕХ», Иркутск, Российская Федерация
[2]Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Российская Федерация

Резюме. В статье рассматривается задача построения системы автоматизированного контроля и управления параметрами ионизированной паровой среды. Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения стабильности физико-химических характеристик таких сред при их использовании в промышленных и лабораторных установках. Показано, что формирование такой среды целесообразно рассматривать как управляемый процесс, состояние которого определяется совокупностью измеряемых физико-химических параметров. Предложена структурно-функциональная схема системы, включающая объект управления, измерительный контур, блок обработки данных и исполнительный контур, реализующий коррекцию режима по замкнутой обратной связи. Принцип действия системы основан на непрерывном мониторинге ключевых параметров и автоматической подстройке режимов парогенерации для поддержания заданных характеристик. Для формализованного описания состояния среды использован вектор контролируемых параметров, включающий окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), температуру, pH и электропроводность, а также введен интегральный критерий отклонения от целевого режима. В качестве первого этапа исследований выполнена первичная апробация измерительного канала окислительно-восстановительного потенциала. Эксперименты проводились на лабораторном стенде, имитирующем реальные условия парогенерации. Установлено, что при интенсивной парогенерации во всех контрольных точках фиксируются отрицательные значения ОВП, а сам параметр демонстрирует пространственно-временную чувствительность к режиму формирования среды. Полученные результаты подтверждают возможность использования ОВП в качестве базового параметра обратной связи при последующем построении многоканальной системы автоматизированного контроля и управления параметрами ионизированной паровой среды. Дальнейшие исследования будут направлены на интеграцию всех измерительных каналов и разработку алгоритмов многопараметрического управления.

Ключевые слова: ионизированная паровая среда, автоматизированный контроль, автоматизированное управление, окислительно-восстановительный потенциал, обратная связь, вектор состояния среды, структурно-функциональная схема, алгоритм управления.

Для цитирования: Степулев А.И., Дульский Е.Ю., Иванов П.Ю., Ковшин А.С., Медведев В.П. Система автоматизированного контроля и управления параметрами ионизированной паровой среды. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2026;14(6). URL: https://moitvivt.ru/ru/journal/article?id=2351 DOI: 10.26102/2310-6018/2026.57.6.019

Automated monitoring and control system for the parameters of an ionized steam environment

A.I. Stepulev[1], E.Yu. Dulskiy[2]✉, P.Yu. Ivanov[2], A.S. Kovshin[2], V.P. Medvedev[1]

[1]AIS-TECH LLC, Irkutsk, the Russian Federation
[2]Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

© Степулев А.И., Дульский Е.Ю., Иванов П.Ю., Ковшин А.С., Медведев В.П., 2026

Abstract. This paper addresses the development of an automated system for monitoring and controlling the parameters of an ionized vapor medium. The relevance of the work stems from the need to ensure stable physicochemical characteristics of such media in industrial and laboratory applications. It is shown that the formation of an ionized vapor medium should be considered a controllable process, whose state is determined by a set of measurable physicochemical parameters. A structural and functional scheme of the system is proposed, comprising a control plant, a measurement circuit, a data processing unit, and an actuating circuit that implements mode correction via closed-loop feedback. The system operates by continuously monitoring key parameters and automatically adjusting vapor generation modes to maintain specified characteristics. To formalize the state of the medium, a vector of controlled parameters is introduced, including oxidation-reduction potential (ORP), temperature, pH, and electrical conductivity, along with an integral criterion for deviation from the target regime. As a first research stage, initial validation of the ORP measurement channel was performed. Experiments were conducted on a laboratory bench simulating real vapor generation conditions. It was found that during intensive vapor generation, negative ORP values are recorded at all control points, and this parameter demonstrates spatiotemporal sensitivity to the vapor formation regime. The obtained results confirm the feasibility of using ORP as a basic feedback parameter for the subsequent construction of a multichannel automated system for monitoring and controlling ionized vapor medium parameters. Future research will focus on integrating all measurement channels and developing multiparameter control algorithms.

Keywords: ionized steam environment, automated monitoring, automated control, oxidation-reduction potential, feedback, environment state vector, structural and functional diagram, control algorithm.

For citation: Stepulev A.I., Dulskiy E.Yu., Ivanov P.Yu., Kovshin A.S., Medvedev V.P. Automated monitoring and control system for the parametersof an ionized steam environment. *Modeling, Optimization and Information Technology.* 2026;14(6). (In Russ.). URL: https://moitvivt.ru/ru/journal/article?id=2351 DOI: 10.26102/2310-6018/2026.57.6.019

Введение

Формирование ионизированной паровой среды представляет интерес как для прикладных оздоровительных систем, так и для задач инженерного исследования многопараметрических газопаровых сред с управляемыми физико-химическими характеристиками [1, 2]. В отличие от обычных паровых режимов, в подобных системах существенное значение приобретают не только температура и интенсивность парообразования, но и параметры, характеризующие состояние среды и продуктов конденсации, включая окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), кислотно-щелочные свойства, электропроводность и временную динамику выхода на режим [3, 4]. Это требует перехода от эмпирического формирования среды к ее формализованному описанию как объекта автоматизированного контроля и управления [5, 6].

Анализ существующих работ показывает, что в исследованиях, посвященных аэроионизации, гидроаэроионизации и ионизированным паровым средам, основное внимание уделялось либо физико-химическим особенностям среды, либо вопросам устройства отдельных генераторов и ионизаторов [1, 7]. При этом значительно меньше разработаны подходы, в которых ионизированная паровая среда рассматривается как динамический объект управления с обратной связью по измеряемым параметрам состояния [5, 8]. На практике это приводит к тому, что формирование целевого режима часто осуществляется по заранее заданным установкам без учета фактического текущего состояния среды, а воспроизводимость получаемых характеристик оказывается недостаточной [9, 10].

Особую сложность представляет выбор информативных параметров, пригодных для использования в контуре автоматизированного управления [8, 9]. Для ионизированной паровой среды такой параметр должен, с одной стороны, быть

чувствительным к изменению режима генерации и ионизации, а с другой – допускать инструментальное измерение и использование в алгоритме обратной связи. В этом отношении ОВП может рассматриваться как один из интегральных показателей состояния среды, отражающих совокупное изменение ее физико-химических характеристик [8, 10]. Однако его применение в качестве управляющего критерия требует включения в более широкий контур анализа, учитывающий также температуру, pH, электропроводность и временные параметры процесса [3, 4].

Таким образом, актуальной является задача разработки системы автоматизированного контроля и управления параметрами ионизированной паровой среды, обеспечивающей формирование и поддержание целевого состояния среды на основе измеряемых характеристик и алгоритмической коррекции режима работы установки. Решение данной задачи соответствует современным направлениям развития автоматизированных систем управления технологическими процессами, в которых объект управления описывается вектором параметров состояния, а качество управления определяется точностью выхода на заданный режим и устойчивостью его поддержания [11, 12].

Целью настоящей работы является разработка системы автоматизированного контроля и управления параметрами ионизированной паровой среды на основе обратной связи по ОВП и сопутствующим физико-химическим параметрам. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи: формирование набора информативных параметров состояния ионизированной паровой среды; разработка структурно-функциональной схемы системы контроля и управления; построение формализованного описания состояния среды и критерия отклонения от целевого режима; разработка алгоритма управления по контуру обратной связи; экспериментальная проверка работоспособности предложенного подхода.

Материалы и методы

Объектом исследования является процесс формирования ионизированной паровой среды в технической установке, включающей узлы генерации пара, ионизирующего воздействия и подачи среды в рабочую зону. В рассматриваемом случае управляемым объектом выступает не только тепловой режим установки, но и совокупность физико-химических характеристик формируемой среды, изменяющихся во времени под действием управляющих и возмущающих факторов. К основным внутренним процессам, определяющим состояние объекта, относятся нагрев исходной воды, образование паровой фазы, воздействие ионизирующего узла на формируемую среду, ее транспортировка и последующее изменение параметров в рабочем объеме.

Система автоматизированного контроля и управления включает объект управления, измерительный контур, блок обработки данных и исполнительный контур. Измерительный контур обеспечивает регистрацию информативных параметров среды, блок обработки выполняет их анализ и сопоставление с целевыми значениями, а исполнительный контур реализует корректирующее управляющее воздействие на режимы генерации и ионизации пара. Структурно-функциональная схема предлагаемой системы представлена на Рисунке 1.

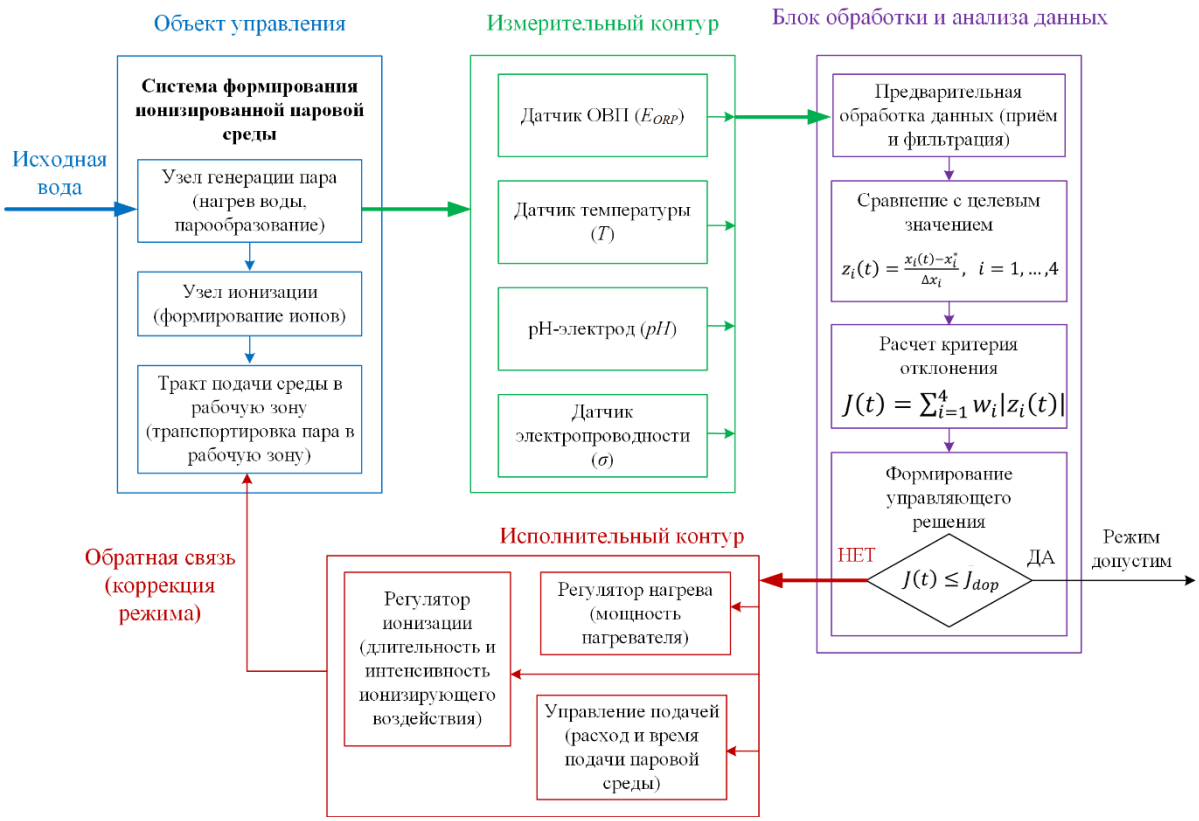


Рисунок 1 – Структурно-функциональная схема системы автоматизированного контроля и управления параметрами ионизированной паровой среды
Figure 1 – Structural and functional diagram of the automated monitoring and control system for the parameters of an ionized steam environment

Как показано на Рисунке 1, система реализует замкнутый контур управления, в котором результаты измерения параметров среды используются для формирования корректирующего воздействия на узлы генерации и ионизации пара [5, 6]. В качестве контролируемых параметров в работе рассматриваются окислительно-восстановительный потенциал, температура, pH конденсируемой пробы парового потока и электропроводность. Выбор данного набора обусловлен их инструментальной измеримостью, чувствительностью к изменению режима работы установки и пригодностью для использования в контуре обратной связи.

Состояние ионизированной паровой среды описывается вектором:

$$X(t) = [E_{ORP}(t), T(t), pH(t), \sigma(t)], \quad (1)$$

где $X(t)$ – вектор состояния ионизированной паровой среды в момент времени t; $E_{ORP}(t)$ – ОВП; $T(t)$ – температура; $pH(t)$ – кислотно-щелочная характеристика конденсируемой пробы, формирующейся при оперативном отборе парового потока; $\sigma(t)$ – электропроводность. Выбор именно такого описания обусловлен тем, что указанные параметры, с одной стороны, доступны инструментальному контролю, а с другой – позволяют судить о текущем состоянии среды как о многопараметрическом объекте.

Для формализованной оценки состояния среды контролируемые параметры представляются в нормированном виде:

$$z_i(t) = \frac{x_i(t)-x_i^*}{\Delta x_i}, \quad i = 1,\dots,4, \quad (2)$$

где $x_i(t)$ – текущее значение i-го параметра среды; x_i^* – целевое значение соответствующего параметра; Δx_i – допустимое отклонение; $Z_i(t)$ – нормированное отклонение параметра от целевого режима.

Интегральный критерий отклонения среды от целевого режима определяется выражением:

$$J(t) = \sum_{i=1}^{4} w_i |z_i(t)|, \quad (3)$$

где $J(t)$ – обобщенная оценка отклонения состояния среды от заданного режима; w_i – весовые коэффициенты значимости контролируемых параметров.

При выполнении условия $J(t) \leq J_{dop}$ текущее состояние среды может рассматриваться как допустимо близкое к целевому, а при $J(t) > J_{dop}$ требуется коррекция управляющего воздействия.

Алгоритм работы системы включает последовательное измерение текущих параметров среды, расчет отклонения от целевого режима, вычисление критерия $J(t)$, сравнение его с допустимым порогом и формирование корректирующего управляющего воздействия на исполнительные контуры системы. Основным управляющим параметром в контуре обратной связи принят окислительно-восстановительный потенциал, тогда как температура, pH и электропроводность используются как сопутствующие параметры, уточняющие оценку состояния объекта [11, 12].

Экспериментальная проверка предложенного подхода выполнялась на установке формирования ионизированной паровой среды в нескольких режимах работы (Рисунок 2). В ходе испытаний регистрировались значения ОВП, температуры, pH, а также временные характеристики выхода системы на рабочий режим и удержания параметров в целевом диапазоне. В качестве рабочей жидкости использовалась питьевая негазированная вода; исходные значения ее ОВП и pH определялись до начала испытаний. Полученные данные использовались для оценки динамики среды и проверки работоспособности алгоритма управления.

Рисунок 2 – Процесс измерения ОВП
Figure 2 – Experimental setup for ORP measurement

На первом этапе исследований выполнялась первичная апробация измерительного канала окислительно-восстановительного потенциала и кислотно-щелочной характеристики паровой среды. Измерения ОВП и pH проводились с использованием приборов ORP-169E и HM Digital PH-80 соответственно.

Предварительная калибровка измерительных средств выполнялась с применением набора стандартных растворов в диапазоне от +60 до +300 мВ для канала ОВП и от 4,0 до 10,5 для канала pH. Корректность работы приборов в условиях повышенной температуры дополнительно проверялась с использованием многопараметрического анализатора качества воды «AquaLab EL-10».

Измерения выполнялись в проточном паровом режиме без подачи среды в замкнутый объем. Такое решение было принято для исключения влияния на результаты избыточного конденсата, обладающего собственными значениями ОВП и pH, и для регистрации характеристик именно формируемого потока пара [4]. Контроль осуществлялся в трех точках: непосредственно на выходе из сопла, на выходе из ПВХ-шланга длиной 1 м и на расстоянии 10 см от конца шланга. Температурный режим контролировался тепловизором «Flir E8-XT». При тепловизионных измерениях коэффициент излучения для поверхности корпуса прибора принимался равным 0,93.

Регистрация показаний приборов выполнялась с частотой 1 с веб-камеры в режиме автоматической фотофиксации. Далее полученные изображения обрабатывались программным комплексом, реализованным на языке «Python», что позволяло извлекать численные значения измеряемых параметров и формировать временные ряды для последующего анализа.

Обработка результатов измерений выполнялась в программной среде «Python». Для подготовки массивов данных, расчета описательных статистик и последующего анализа использовались библиотеки «Pandas» и «SciPy». Количественная оценка влияния условий эксперимента на изменение окислительно-восстановительного потенциала проводилась с применением дисперсионного анализа с повторными измерениями.

В модели учитывались три группы факторов. Пространственный фактор характеризовал положение точки контроля относительно зоны генерации пара: выход сопла, выход шланга длиной 1 м и точка, расположенная на расстоянии 10 см от конца шланга. Временной фактор задавался последовательными интервалами регистрации показаний. Технологический фактор отражал режим работы установки и позволял сопоставить участок интенсивной парогенерации с периодом отсутствия выраженного парового потока.

Значимость влияния указанных факторов оценивалась по *F*-критерию Фишера:

$$F = \frac{Q_{\text{фактора}}/f_{\text{фактора}}}{Q_{\text{ост}}/f_{\text{ост}}} = \frac{S^2_{\text{межд}}}{S^2_{\text{внутр}}}, \quad (4)$$

где $Q_{\text{фактора}}$ – сумма квадратов отклонений, обусловленная действием рассматриваемого фактора; $Q_{\text{ост}}$ – остаточная сумма квадратов; $f_{\text{фактора}}$, $f_{\text{ост}}$ – соответствующие степени свободы; $S^2_{\text{межд}}$, $S^2_{\text{внутр}}$ – межгрупповая и внутригрупповая дисперсии. Фактор считался статистически значимым при превышении расчетным значением *F* критического уровня для $\alpha = 0{,}05$.

Для обоснования структуры вектора состояния и назначения весовых коэффициентов в критерии отклонения от целевого режима выполнен корреляционный анализ взаимосвязей между параметрами среды. Рассчитывались коэффициенты парной корреляции Пирсона:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}}, \quad (5)$$

где x_i, y_i – значения сравниваемых параметров; $\bar{x}$, $\bar{y}$ – выборочные средние; n – объём выборки. Статистическая значимость коэффициентов проверялась по t-критерию Стьюдента:

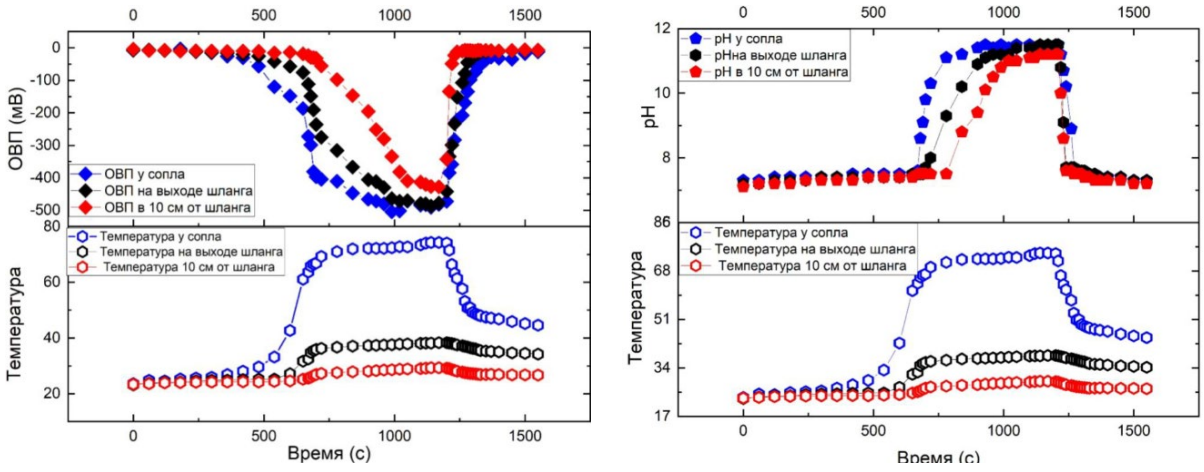
$$t = r\sqrt{(n-2)/(1-r^2)}. \quad (6)$$

При этом сила связи оценивалась по шкале: $|r| \geq 0{,}7$ – сильная; $0{,}5 \leq |r| < 0{,}7$ – умеренная; $|r| < 0{,}5$ – слабая. Корреляционный анализ использовался для выявления степени избыточности информации между каналами измерения и для последующего экспертного назначения весовых коэффициентов в интегральном критерии отклонения от целевого режима. При назначении весов учитывались физическая информативность параметра, его роль в контуре обратной связи, устойчивость измерения и степень дублирования информации с другими параметрами.

Результаты

Результаты первого этапа исследований показали, что канал ОВП обладает достаточной чувствительностью к процессу формирования ионизированной паровой среды и может рассматриваться как перспективный источник обратной связи в составе разрабатываемой системы автоматизированного контроля и управления. В ходе испытаний установлено, что при интенсивной парогенерации во всех трех контрольных точках фиксировались отрицательные значения ОВП, тогда как при отсутствии выраженного парового потока значения параметра смещались в околонулевую область.

Наибольшее по модулю снижение ОВП наблюдалось на выходе из сопла и на выходе из шланга, где значения достигали примерно –480 мВ (Рисунок 3*а*). На расстоянии 10 см от конца шланга минимальное значение составляло около –430 мВ. Таким образом, даже при удалении от источника пар сохранял выраженные восстановительные свойства, что указывает на возможность использования данного параметра для оценки состояния среды не только вблизи зоны генерации, но и в рабочей области воздействия.



а) *б*)

Рисунок 3 – Результаты измерений: *а* – ОВП; *б* – pH
Figure 3 – Measurement results: *a* – ORP; *b* – pH

Наряду с изменением амплитуды ОВП была выявлена временная неоднородность формирования режима. На выходе из шланга характерное изменение ОВП запаздывало по отношению к соплу примерно на 60–100 с, а в точке, расположенной на расстоянии

10 см от конца шланга, дополнительное запаздывание составляло порядка 150–200 с. Полученные данные свидетельствуют о том, что при описании паровой среды как объекта управления необходимо учитывать не только стационарные значения параметров, но и динамику их распространения по тракту подачи.

Сопутствующие измерения pH подтвердили направленное изменение характеристик среды при формировании парового потока. Максимальные значения pH составляли около 11,5 на выходе из сопла и на выходе из шланга и около 11,2 на расстоянии 10 см от конца шланга (Рисунок 3*б*). При этом для pH, как и для ОВП, наблюдалось временное запаздывание достижения максимальных значений между соседними точками контроля. Это дополнительно указывает на наличие инерционности процесса и подтверждает необходимость учета временного фактора в алгоритме управления.

Температурные измерения показали, что на выходе из шланга температура не превышала 40 °C, а на расстоянии 10 см от его конца оставалась не выше 34 °C. Более высокая температура, зарегистрированная вблизи сопла, вероятно, была частично обусловлена тепловым излучением нагретых элементов установки.

Результаты дисперсионного анализа изменения ОВП представлены в Таблице 1. Установлено статистически значимое влияние всех трех факторов. Наибольший вклад в изменение потенциала вносит режим парогенерации (52,1 % объясненной вариации, $F = 142{,}3$; $p < 0{,}001$), что подтверждает управляемость процесса. Фактор расстояния от сопла объясняет 28,4 % вариации ($F = 38{,}7$; $p < 0{,}001$), количественно подтверждая пространственную неоднородность среды. Значимо и взаимодействие факторов $A \times B$ (расстояние × время): $F = 12{,}4$ ($p = 0{,}003$), что свидетельствует о наличии транспортного запаздывания в системе.

Таблица 1 – Результаты дисперсионного анализа изменения ОВП
Table 1 – Results of dispersion analysis of ORP changes

Источник вариации	**Степени свободы**	***F*-наблюдаемое**	***p*-уровень**	**Доля вариации, %**
Фактор *A* (расстояние)	2	38,7	<0,001	28,4
Фактор *B* (время)	9	10,1	0,002	7,3
Фактор *C* (режим)	1	142,3	<0,001	52,1
Взаимодействие *A*×*B*	18	12,4	0,003	5,8
Остаточная	60	–	–	6,4

Остальные взаимодействия факторов в рамках данного этапа анализа не достигли статистической значимости и в таблице не приводятся.

Матрица парных корреляций параметров среды (Таблица 2) выявляет сильную отрицательную связь между ОВП и pH ($r = –0{,}89$; $p < 0{,}001$), что физически соответствует проявлению восстановительных свойств ионизированного пара. Температура также демонстрирует выраженную отрицательную связь с ОВП ($r = –0{,}76$; $p < 0{,}001$), что отражает влияние теплового режима на формирование свойств среды. Следует отметить, что на данном этапе первичная экспериментальная апробация была сосредоточена преимущественно на канале ОВП, а также на сопутствующих измерениях pH и температуры. Электропроводность включена в состав вектора состояния как потенциально информативный параметр полной многоканальной системы управления и подлежит отдельной расширенной экспериментальной верификации на последующих этапах исследований.

Таблица 2 – Матрица парных корреляций параметров среды
Table 2 – Matrix of pairwise correlations of environmental parameters

Параметр	ОВП	pH	T	σ
ОВП	1,00	–0,89**	–0,76*	0,31
pH	–	1,00	0,42*	0,48*
T	–	–	1,00	0,23
σ	–	–	–	1,00

*$p < 0,05$; ** $p < 0,01$

На основании корреляционной матрицы и с учетом функциональной роли параметров в системе управления весовые коэффициенты для интегрального критерия отклонения от целевого режима назначены экспертным образом: w_1 (ОВП) = 0,40; w_2 (pH) = 0,25; w_3 (температура) = 0,25; w_4 (электропроводность) = 0,10. Повышенный вес ОВП обусловлен тем, что именно этот параметр рассматривается в работе как основной канал обратной связи, непосредственно отражающий изменение физико-химического состояния ионизированной паровой среды. Значения pH и температуры используются как сопутствующие параметры, уточняющие состояние среды и динамику выхода на режим. Электропроводность включена в состав вектора состояния как дополнительный индикатор, однако на данном этапе ей присвоен меньший вес вследствие ограниченного объема экспериментальной апробации по данному каналу.

В совокупности полученные результаты позволяют рассматривать ОВП как основной параметр первичной апробации, а pH и температуру – как сопутствующие характеристики, уточняющие картину формирования среды.

Отдельно были проверены параметры конденсата, полученного после отбора паровой фазы и последующего охлаждения. Через 2 ч после отбора его характеристики составили pH = 7,5 ± 0,1 и ОВП = +50 ± 11 мВ. Эти значения заметно отличаются от параметров, фиксируемых непосредственно в проточном паровом режиме, и значительно ближе к характеристикам исходной жидкости.

Полученный результат показывает, что оценка остывшего конденсата не может использоваться как полноценная замена оперативному контролю парового потока. Для системы автоматизированного управления наибольшую информативность имеют параметры, регистрируемые непосредственно в процессе генерации, транспортировки и подачи ионизированной паровой среды. Именно в этот период проявляются выраженные изменения ОВП и pH, а также пространственно-временная неоднородность формирования режима.

По итогам первого этапа исследований ОВП может быть принят в качестве базового параметра обратной связи. При этом алгоритм управления должен учитывать не только текущее значение данного показателя, но и положение точки контроля, временное запаздывание отклика и сопутствующие изменения pH и температуры.

Полученные данные рассматриваются как результаты первого этапа исследований, направленного на выбор и обоснование информативного параметра обратной связи для последующего построения полной системы автоматизированного контроля и управления параметрами ионизированной паровой среды.

Обсуждение

Полученные результаты первого этапа исследований позволяют рассматривать окислительно-восстановительный потенциал как один из наиболее перспективных параметров для построения контура обратной связи в системе автоматизированного контроля и управления ионизированной паровой средой [8, 9]. Прежде всего, это связано

с тем, что ОВП продемонстрировал выраженную чувствительность к режиму формирования среды и устойчивое отличие от исходного состояния рабочей жидкости. В отличие от параметров, характеризующих только тепловой режим, ОВП отражает интегральное изменение физико-химического состояния потока и потому может быть использован не только как диагностический, но и как управляющий показатель [10].

Существенным результатом является выявленная пространственно-временная неоднородность изменения параметров среды. Зафиксированное запаздывание отклика между соплом, концом шланга и удалённой точкой показывает, что ионизированная паровая среда должна рассматриваться как распределённый динамический объект. Её состояние определяется не только текущим режимом генерации, но и трактом транспортировки, расстоянием до точки контроля и временем распространения потока. Для алгоритма управления это означает необходимость учитывать не только заданные уставки, но и динамику изменения параметров по тракту подачи [11, 12]. В противном случае корректирующее воздействие будет формироваться по состоянию среды, которое уже изменилось к моменту реакции системы, что может снижать точность поддержания целевого режима.

Результаты дисперсионного анализа дополнительно подтверждают этот вывод. Фактор расстояния от сопла объясняет 28,4 % вариации ОВП, поэтому использование одной точки контроля представляется недостаточным для устойчивого управления процессом. Более обоснованным является многоточечный контроль, позволяющий оценивать не только текущее состояние среды, но и характер ее изменения по тракту подачи.

Корреляционный анализ уточняет роль отдельных измерительных каналов. Сильная отрицательная связь между ОВП и pH ($r = –0,89$) показывает, что эти параметры отражают связанные изменения физико-химического состояния среды. Поэтому pH может использоваться как дополнительный или резервный канал оценки при нарушении работы основного канала ОВП. Связь ОВП с температурой также достаточно выражена ($r = –0,76$), однако эти параметры не следует считать взаимозаменяемыми. Температура описывает тепловой режим, тогда как ОВП характеризует интегральное редокс-состояние парового потока. Их совместное использование позволяет полнее описывать состояние объекта управления и уменьшает риск ошибочной интерпретации режима по одному измерительному каналу.

Отдельного внимания требует различие между параметрами проточного пара и характеристиками конденсата после остывания. В процессе формирования среды фиксируются выраженные отрицательные значения ОВП, тогда как после выдержки конденсата показатели смещаются в область, близкую к исходной жидкости. Следовательно, для целей автоматизированного управления предпочтительным является оперативный контроль параметров непосредственно в потоке, а не последующее измерение охлаждённой конденсированной фазы. Это подтверждает необходимость размещения измерительных каналов в зоне генерации, транспортировки или подачи паровой среды, где сохраняется информативность контролируемых параметров.

В то же время представленные результаты следует рассматривать как начальный этап формирования системы автоматизированного контроля и управления. На данном этапе основной акцент был сделан на проверке информативности канала ОВП и на выявлении общих закономерностей изменения параметров среды в пространстве и во времени. Это означает, что полученные данные пока не описывают в полном объеме взаимосвязь всех контролируемых параметров и не позволяют построить окончательную многопараметрическую модель управления. Температура, pH и электропроводность в рамках текущего этапа выступают как сопутствующие характеристики, а их включение

в полноценный алгоритм автоматизированного регулирования требует дальнейшего расширения экспериментальной базы.

Таким образом, проведенная первичная апробация подтверждает корректность выбранного направления разработки. Полученные результаты показывают, что дальнейшее развитие системы должно быть связано с построением многоканального измерительного контура, уточнением критериев оценки состояния среды и разработкой алгоритма коррекции режима с учетом пространственно-временной динамики изменения параметров в различных точках тракта подачи [5, 6].

Заключение

В работе предложен подход к построению системы автоматизированного контроля и управления параметрами ионизированной паровой среды, в которой состояние объекта описывается совокупностью измеряемых физико-химических характеристик, а формирование режима рассматривается как задача управления по обратной связи. Разработана структурно-функциональная схема системы, включающая измерительный контур, блок обработки данных и исполнительный контур, а также предложено формализованное описание состояния среды и критерий отклонения от целевого режима.

Результаты первого этапа исследований показали, что окислительно-восстановительный потенциал обладает достаточной чувствительностью к процессу формирования ионизированной паровой среды и может рассматриваться как базовый параметр для последующего построения канала обратной связи. Установлено, что изменение ОВП носит направленный характер, зависит от режима работы установки и сохраняет информативность в различных точках тракта подачи. Одновременно выявлена пространственно–временная неоднородность формирования среды, что подтверждает необходимость учета динамики процесса при разработке алгоритма управления. Статистическая обработка экспериментальных данных методами дисперсионного и корреляционного анализа позволила количественно обосновать вклад технологических факторов в формирование свойств среды, выявить взаимосвязи между контролируемыми параметрами и обосновать структуру многопараметрического критерия управления.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что они создают основу для перехода от эмпирического задания режима работы установки к автоматизированному управлению по фактическому состоянию среды. Дальнейшие исследования целесообразно направить на расширение экспериментальной базы, включение в контур управления дополнительных параметров, в том числе температуры, pH и электропроводности, а также на разработку полной многопараметрической модели автоматизированного регулирования ионизированной паровой среды.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Минх А.А. *Ионизация воздуха и её гигиеническое значение.* Москва: Медгиз; 1958. 187 с.
2. Скипетров В.П. *Аэроионы и жизнь.* Саранск: Красный Октябрь; 2011. 136 с.
3. Архипова Е.В., Жигалин А.Д., Федорук Н.А. и др. Контроль аэроионного состава атмосферы урбанизированных территорий. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология.* 2020;(1):28–31. https://doi.org/10.31857/S0869780920010020

Arkhipova E.V., Zhigalin A.D., Fedoruk N.A., et al. Control of aero-ionic composition of the urban atmosphere. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya.* 2020;(1):28–31. (In Russ.). https://doi.org/10.31857/S0869780920010020
4. Абдалиев У.К., Джаманбаева А.С. Особенности электризации воды в процессе кавитации. *Вестник Ошского государственного университета.* 2014;(2):170–173.
5. Dorf R.C., Bishop R.H. *Modern Control Systems.* Boston: Pearson; 2017. 1025 p.
6. Seborg D.E., Edgar Th.F., Mellichamp D.A., et al. *Process Dynamics and Control.* Hoboken: John Wiley & Sons; 2016. 512 p.
7. Васильев Л.Л. *Теория и практика лечения ионизированным воздухом.* Ленинград: Издательство Ленинградского университета; 1953. 192 с.
8. Wang X., Wu Y., Chen N., et al. Characterization of oxidation-reduction potential variations in biological wastewater treatment processes: A study from mechanism to application. *Processes.* 2022;10(12):2607. https://doi.org/10.3390/pr10122607
9. Nelson J., Coleman R., Chacón-Rodríguez L., et al. Advanced monitoring and control of redox potential in wine fermentation across scales. *Fermentation.* 2023;9(1):7. https://doi.org/10.3390/fermentation9010007
10. Lee Y., Lee I., Kim H.-J., et al. Smart strategic management for the cold plasma process using ORP monitoring and total organic carbon correlation. *Processes.* 2024;12(3):471. https://doi.org/10.3390/pr12030471
11. Åström K.J., Murray R.M. *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers.* Princeton: Princeton University Press; 2008. 396 p.
12. Ljung L. *System Identification: Theory for the User.* Prentice Hall; 1999. 609 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Степулёв Александр Иванович, главный инженер, ООО «АИС-ТЕХ», Иркутск, Российская Федерация.
e-mail: aisirk65@yandex.ru

Aleksandr I. Stepulev, Chief Engineer, AIS-TECH LLC, Irkutsk, the Russian Federation.

Дульский Евгений Юрьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электроэнергетика транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Российская Федерация.
e-mail: e.dulskiy@mail.ru
ORCID: 0000-0002-6637-3104

Evgeny Yu. Dulsky, Doctor of Engineering Sciences, Docent, Professor at the Department of Transport Power Engineering, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation.

Иванов Павел Юрьевич, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры «Транспортное машиностроение», Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Российская Федерация.
e-mail: savl.ivanov@mail.ru
ORCID: 0000-0001-6836-5928

Pavel Yu. Ivanov, Doctor of Engineering Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of Transport Mechanical Engineering, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation.

Ковшин Андрей Сергеевич, инженер центра перспективных цифровых инженерных технологий «ЦИФРА», Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Российская Федерация.
e-mail: andrik893@mail.ru

Andrey S. Kovshin, Engineer of the CIFRA Center for Advanced Digital Engineering Technologies, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation.

Медведев Виталий Петрович, генеральный директор ООО «АИС-ТЕХ», Иркутск, Российская Федерация.
e-mail: medvedew-80@yandex.ru

Vitaly P. Medvedev, General Director of AIS-TECH LLS, Irkutsk, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 27.04.2026; одобрена после рецензирования 10.06.2026; принята к публикации 21.06.2026.

The article was submitted 27.04.2026; approved after reviewing 10.06.2026; accepted for publication 21.06.2026.