

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17911290>

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ПРОГНОЗНОГО УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД

**Ортиков Элбек Элмирза угли**

*PhD, доцент Ташкентского государственного технического университета*

*Email: [ortigovbek2018@gmail.com](mailto:ortigovbek2018@gmail.com), Тел: +998 90 1092908*

*ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9049-2953>*

**Аннотация:** В статье рассматриваются методы интеллектуального синтеза и оптимизации регуляторов для систем прогнозного управления расходом технологических жидких и газообразных сред. Показано, что использование предиктивных моделей, основанных на нейросетевых и нечетких алгоритмах, позволяет существенно повысить точность регулирования, уменьшить время переходных процессов и минимизировать суммарную стоимость ошибки управления. Выполнен сравнительный анализ работы традиционного ПИД-регулятора и нечеткого ПИД-подобного регулятора. Разработана структурная схема автоматизированной системы прогнозного управления расходом, включающая математическую модель объекта и оптимизированный нечеткий регулятор. Результаты моделирования подтверждают, что предложенный подход обеспечивает стабилизацию расхода при различных возмущающих факторах, снижает перерегулирование и адаптируется к стохастическому характеру технологических процессов.

**Ключевые слова:** Интеллектуальное управление, ПИД-регулятор, нечеткий регулятор, расход технологических сред, Advanced Process Control (APC).

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время можно наблюдать качественные изменения в методах и алгоритмах поддержки принятия управленческих решений при информационной неопределенности, сопровождающих оперативно-прогнозное управление химико-технологическими процессами и производствами. APC – системы усовершенствованного управления функционируют в условиях внутренних и внешних случайных возмущающих воздействий параметрического, адаптивного и мультипликативного характера.

Одним из перспективных подходов к структурно-параметрическому анализу и синтезу систем усовершенствованного управления сложными технологическими процессами и промышленными производствами выступают технология управления динамическими объектами с использованием предиктивных прогнозных моделей, позволяющих управлять многомерными и многосвязными объектами в режиме реального времени в условиях априорной неопределенности внешней и внутренней информации исследуемого

динамического объекта контроля и управления [1-3].

Поступающее на технологическую установку сырье и полуфабрикаты отличаются по составу. В соответствие с этим изменяется и состав полученной конечной продукции. Для получения конечной и промежуточной продукции регламентированного качества требуются данные о качестве получаемых продуктов. На основании данной информации корректируется режим функционирования технологического оборудования. При этом оценка качества конечной продукции выполняется на основе результатов лабораторных анализов и данных поточных анализаторов или контрольно-измерительных приборов. Как правило, данные заводской лаборатории и измерительных устройств не дают возможности своевременно и оперативно оценивать качество конечной продукции. Задержка в получении достоверной и точной измерительной информации о качественных характеристиках выходного продукта оборачивается излишними материальными расходами, привозящими либо к получению меньшего по объему и количеству целевых продуктов с большим запасом по качеству, либо к заводскому браку, при котором конечный продукт не соответствует регламентированным нормам, в итоге – снижается эффективность исходного технологического процесса. Настройка регламентированных технологических режимов оборудования часто занимает время от нескольких часов до нескольких суток.

Оперативная измерительная информация, регулярно поступающая от датчиков измерительных преобразователей и контрольно-измерительной аппаратуры, предоставляет операторам и диспетчерскому персоналу возможность своевременно спрогнозировать изменение качества выходной продукции и посредством соответствующих управляющих воздействий обеспечивать требуемое качество конечной продукции.

Технология APC – систем расширенного управления обычно внедряются с целью максимизации прибыли за счет повышения эффективности работы. Основной целью является экономия потребляемой энергии. Роль, которую технология APC – систем управления будет играть в сфере автоматического контроля и управления технологическими процессами и производствами в скором будущем еще больше возрастет [4,5]. Одним из передовых направлений развития интеллектуальных систем управления является анализ и синтез систем, использующих нейросетевое управление, которое представляет собой частный случай интеллектуального управления, когда в качестве инструмента для решения задач управления используются нейронные сети (НС).

Анализ научных и технических достижений в области решения сложных задач показывает, что для повышения экономической эффективности управления сложными системами и установками набирает обороты тенденция к объединению систем автоматизированного управления динамическими объектами в единые, интегрированные информационно-управляющие платформы организационно-технологического направления [6-8]. В основе этих систем лежат автоматизированные системы оперативно-диспетчерского

управления, отвечающие за управление сложными производственными процессами. Они переводят управленческие решения руководства в практические действия, а также выполняют задачи прогнозирования производственных изменений. Благодаря предиктивной аналитике, принимающие решения лица могут более эффективно корректировать ход процессов.

## МЕТОДЫ

Активное изучение нечетких регуляторов привело к появлению большого числа публикаций, посвященных их созданию и оценке эффективности в разных системах. Особое внимание уделяется сравнительным исследованиям нечетких регуляторов с традиционными ПИД-регуляторами. Исследования в этой области можно разделить на две группы: разработки, где комбинируются классические и нечеткие регуляторы, и исследования, где каждый тип регулятора применяется отдельно. ПИД-регуляторы, дополненные нечеткими системами управления, часто сталкиваются с трудностями в процессе проектирования и настройки из-за своей повышенной сложности. Однако, в определенных ситуациях, нечеткие регуляторы могут стать полноценной альтернативой, демонстрируя не уступающую, а порой и превосходящую производительность по сравнению с традиционными ПИД-регуляторами. Использование двух видов регуляторов в различных сценариях демонстрирует преимущество нечетких регуляторов над традиционными, особенно в сложных системах, например, в системах подачи горючих газов или регулировке скорости двигателя постоянного тока, где они демонстрируют более высокую эффективность [9].

Стохастический процесс, который предстоит спрогнозировать, может быть математически описан в следующем общем виде:

$$y = f(\bar{a}, \bar{x}) + \varphi(\bar{b}, \bar{x})\eta \quad (1)$$

где  $f(\bar{a}, \bar{x})$  и  $\varphi(\bar{b}, \bar{x})$  – функции, изменяющие свои значения в зависимости от временного изменения производных;  $\bar{x}$  – определённый набор значений параметров, определяющих временной интервал,  $t$ ;  $\eta$  – случайная величина, среднее значение которой равно нулю;  $y$  – предсказуемый показатель;  $(\bar{a}, \bar{b})$  – параметры, требующие вычисления, представлены в виде векторов.

Дискретизация непрерывных процессов, управляемых контуром, обуславливает определённые трудности при их представлении в непрерывном виде. В реальных системах предпочтение отдаётся формулировке, описывающей дискретный стохастический процесс:

$$y_{i+1} = A_{i+1,i} + y_i + \eta_i, \quad (2)$$

где  $A_{i+1,i}$  – матрица, которая отображает эволюцию процесса во времени,  $\eta_i$  – помеха.

В основе работы алгоритмов и программ лежат процессы идентификации текущего состояния системы, основываясь на измерительных данных, получаемых в определенные временные интервалы. Сравнение фактического

состояния с заданным позволяет выявить отклонения, которые затем служат основой для формирования управляющих воздействий. В общем случае задача обеспечения эффективного управления заключается в нахождении ошибки управления  $\bar{\varepsilon}(t)$  при различных управляющих воздействиях:

$$\eta_i \in R, i = \overline{1, m}. \quad (3)$$

Реализация каждого управляющего воздействия  $\bar{\eta}_i = \{\eta_i^1, \dots, \eta_i^m\}$  сопряжена с затратами определенных видов ресурсов  $\bar{C}_i = \{C_i^1, \dots, C_i^m\}$  (материальных, временных, трудовых и т.п.), на которые накладываются ограничения вида:

$$\sum_{j=1}^n C^j \leq C^0, \quad (4)$$

где  $C^0$  – пороговая величина ресурсов, выделенных на реализацию управляющего воздействия.

Вектор ошибки управления равен:

$$\bar{\varepsilon}(t) = \bar{g}(t) - \bar{x}(t), \quad (5)$$

где  $\bar{g}(t)$  – вектор идеального состояния процесса (вектор цели);  $\bar{x}(t)$  – вектор фактического состояния процесса.

Введем в рассмотрение функционал вида:

$$Q[\bar{\varepsilon}(t)] = Q[\bar{g}(t) - \bar{x}(t)] = F(\bar{\eta}_i), \quad i = \overline{1, m}, \quad (6)$$

где  $Q$  – функция, определяющая форму функционала.

Тогда цель управления состоит в нахождении такого управления  $\eta_i$ , которое обеспечивает минимальное значение функционала ошибки  $\bar{\varepsilon}(t)$  при заданных ограничениях (3), (4), т.е.

$$\min Q[\bar{g}(t) - \bar{x}(t)] = \min Q[\bar{\varepsilon}(t)] \quad (7)$$

Эффективность управления прямо пропорциональна минимализации вектора ошибки управления (7). В контексте сложных стохастических систем, характерных для управляемых объектов, краткосрочное оперативное прогнозирование становится ключевым инструментом. Оно обеспечивает оперативную корректировку отклонений режимных параметров от целевых значений, позволяя реализовать опережающее управление и, как следствие, существенно уменьшить значение целевой функции. Выбор оптимальной тактики управления, направленной на рост объемов выпуска и улучшение качества готовой продукции, непосредственно зависит от данных оперативного прогнозирования текущей ситуации в управляемом процессе.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим процесс создания системы автоматического управления расходами жидкостей, структурная схема которой представлена на рис.1. Задача синтеза этой системы заключается в повышении эффективности управления, принимая во внимание специфику ее архитектуры.

Для достижения стабильного потока жидкости или газа и быстрого восстановления заданного расхода после внезапных изменений, системы управления должны эффективно регулировать его [10,11]. Данный тип систем

находит широкое применение в различных отраслях, включая химическую, нефтегазовую, горнодобывающую и обрабатывающую промышленность.



**Рис.1. Автоматизированная система контроля и регулирования расхода жидкостей и газов, м³/ч.**

К недостаткам таких систем относится их сложность понимания: они функционируют как «черные ящики», управляемые на основе сравнения входных и выходных сигналов. Настройка параметров, например, ПИД-регулятора или функций принадлежности нечеткого регулятора, может быть затруднительной. Если ручная настройка невозможна, требуется разработка модели управляемого объекта и модели регулятора. В то же время, подробное описание механизмов преобразования данных в фаззи и обратно не представлено.

Применение нечетких регуляторов осложняется отсутствием четких методик определения функций принадлежности, которые формируются исходя из ошибки и ее производной. В то время как для ПИД-регуляторов выбор параметров осуществляется на основе синтеза системы. Цифровые регуляторы играют ключевую роль в управлении сложными производственными процессами, имеющими нелинейную природу, когда возможности традиционных ПИД-регуляторов оказываются ограниченными. Когда речь идет о системах с сложной и неоднозначной природой, нечеткие регуляторы могут показать себя более действенными. Их способность обрабатывать такие параметры повышает эффективность управления. Хотя иногда сочетание классических и нечетких подходов может быть полезным, в некоторых ситуациях нечеткий регулятор способен заменить классический, достигая при этом превосходных результатов в обеспечении качества регулирования. В отличие от традиционных методов проектирования ПИД-регуляторов, где процедуры синтеза параметров четко определены, нечеткое управление сталкивается с проблемой отсутствия формализованных подходов к определению этих параметров. В данной работе исследуется система контроля водного уровня в технологическом резервуаре, где применяются как нечеткие, так и ПИД-регуляторы.

Сравнительные исследования выявили превосходство нечетких регуляторов в плане сокращения времени достижения установившегося режима и исключения явления перерегулирования по сравнению с ПИД-регуляторами. Иллюстрируя это, синтез объекта управления с применением нечеткого регулятора продемонстрировал более оперативную реакцию и отсутствие перерегулирования. В качестве инструмента для оптимизации настроек ПИД-



регуляторов рекомендуется применение нейронечетких регуляторов и генетических алгоритмов. Исследование фокусируется на разработке методики точного формального синтеза нечетких регуляторов, функционально аналогичных ПИД-регуляторам, предназначенных для управления потоком жидкости между двумя резервуарами. Проположенный метод предполагает вычисление параметров функций принадлежности с учетом коэффициентов традиционного ПИД-регулятора и корректировку, связанную с особенностями дефазификации.

Выбор системы расхода для исследования обусловлен ее глубоким изучением и потенциалом интеграции в расширенные системы водоснабжения и водоотведения, где применяется нечеткое управление. Исследование предполагает синтез и моделирование как классического ПИД-регулятора, так и нечеткого ПИД-регулятора для системы жидкостного потока. Кроме того, будет разработана методика определения параметров нечеткого регулятора, обладающего эквивалентными характеристиками ПИД-регулятора. Проведется исследование и сравнение систем, отличающихся типами регуляторов. На основе полученных результатов алгоритмы управления претерпят модернизацию с целью повышения точности и эффективности регулирования. Чтобы эффективно настроить классический ПИД-регулятор, первым шагом является создание математического модели объекта, управляемого в системе автоматического регулирования расхода жидкости. Задача синтеза автоматической системы управления заключается в повышении эффективности регулирования, прежде всего, в обеспечении стабильного расхода и оперативном достижении заданных значений при внесении изменений. Настройка системы будет ориентирована на достижение технического оптимального режима, который гарантирует оптимальные переходные процессы при условии, что передаточная функция разомкнутой системы будет иметь заданную оптимальную структуру:

$$W_{\text{ИМ}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)} \quad (8)$$

Функция, описывающая передачу сигнала в управляемом объекте:

$$W_{\text{об.упр.}}(p) = \frac{3}{0,5p + 1} \cdot \frac{6}{0,05p + 1} \cdot \frac{0,006}{0,4p + 1}. \quad (9)$$

Рассчитаем регулятор по формуле:

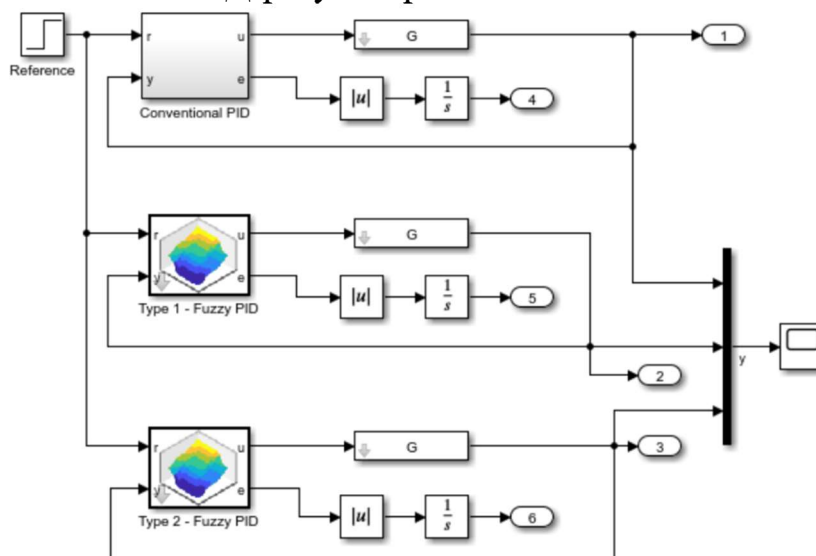
$$W_{\text{РЕГ}}(p) = \frac{W_{\text{ж}}}{W_{\text{ОУ}} \cdot W_{\text{ОС}}} = \frac{p^2 + 22,5p + 50}{p} = p + 22,5 + \frac{50}{p}. \quad (10)$$

Система автоматического регулирования (САР) расхода, предназначенная для работы с двумя технологическими резервуарами, функционирует с определенными ограничениями. Далее мы рассмотрим создание синтезированного нечеткого ПИД-регулятора, заимствуя параметры настройки из традиционного ПИД-регулятора.

Нечеткие ПИД-регуляторы, аналогично традиционным ПИД-системам, основаны на обработке ошибки управления, ее интеграла и производной.

Однако, в отличие от классических аналогов, они применяют нечеткую логику для обработки этих данных. Сначала входные величины преобразуются в нечеткую интерпретацию с помощью фаззификации, затем логические операции позволяют получить нечеткую управляющую величину. На заключительном этапе дефаззификация преобразует нечеткий сигнал в четкий, который направляется на управляемый объект. Ключевым моментом в настройке нечеткого ПИД-регулятора выступает создание функций принадлежности и правил, определяющих его поведение. Настройка осуществляется путем определения лингвистических величин и классификации их значений. Правила алгоритма регулятора, представленные в виде логических высказываний, определяют его работу. К примеру, высказывание «при росте ошибки управляющее воздействие должно уменьшаться, а при ее уменьшении – увеличиваться» иллюстрирует принцип функционирования регулятора. Применение функций принадлежности, сформулированных с учетом коэффициентов традиционного ПИД-регулятора, дает возможность сформировать нечеткий регулятор, обладающий функциональностью, сопоставимой с ПИД-регулятором. Такой подход исключает необходимость ручного подбора параметров, что особенно актуально для систем, где такой подбор невозможен.

На рис.2 представлена архитектура системы, где в качестве регулятора используется классический ПИД-регулятор и нечеткая модель.



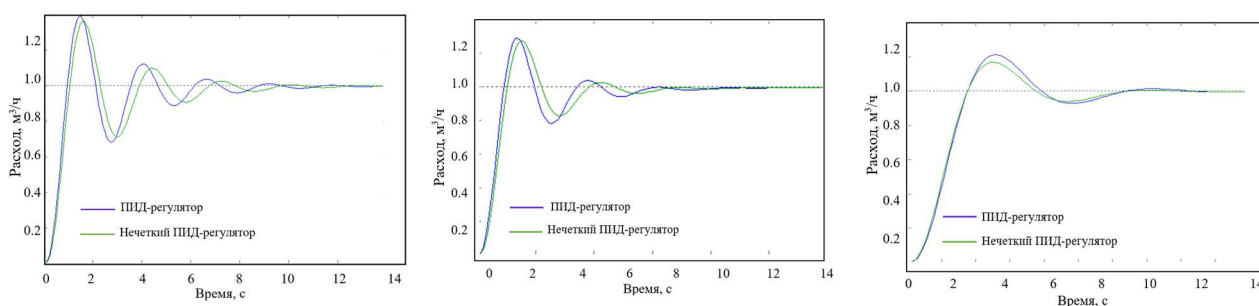
**Рис.2. Структурная схема системы САР расхода с ПИД и нечетким регулятором в среде Matlab.**

В нечетких регуляторах САР для управления расходом предпочтение отдается трапецеидальной форме функций принадлежности (ФП). Такая форма обусловлена тем, что рост управляющей ошибки и других входных параметров ведет к линейному росту влияния соответствующего правила, пока не будет достигнуто предельное значение. Если входные переменные отклоняются в положительную область, описание ФП будет зеркально симметричным.

## ОБСУЖДЕНИЕ

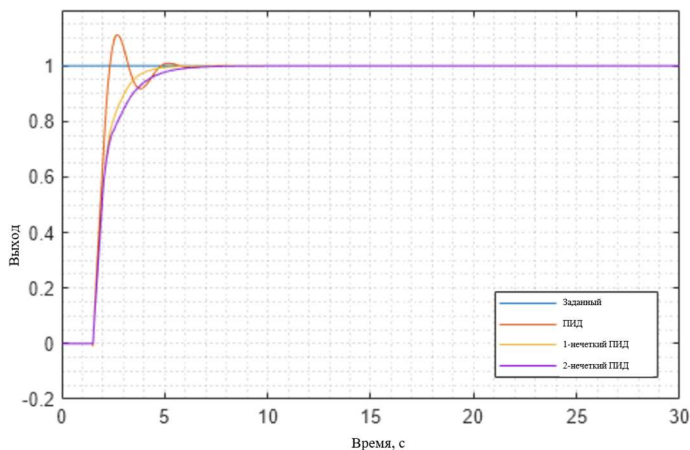
Проведём симуляцию функционирования двух видов регуляторов: традиционного и нечеткого, в системе автоматического регулирования расхода. Исследование будет осуществляться при разных уровнях заданного расхода. Полученные графики переходных процессов позволят оценить эффективность каждого типа регулятора в различных эксплуатационных сценариях, включая значения заданного расхода (рис.3).

Анализ графиков переходных процессов позволяет сделать следующие заключения о работе регуляторов расхода жидкости. Оба типа регуляторов, несмотря на заметное перерегулирование при низких расходах и короткие времена переходных процессов, обладают разными характеристиками. Нечеткий регулятор, хотя и способен устранить статическую ошибку при определенных значениях заданного расхода, демонстрирует существенное удлинение времени переходного процесса (в более чем четыре раза) по сравнению с ПИД-регулятором при повышении заданного расхода. В то же время, оба типа регуляторов эффективно стабилизируют расход жидкости на требуемом уровне.



**Рис.3. Переходные процессы расхода жидкости.**

Исследование графиков переходных процессов выявило, что система с нечетким контролем демонстрирует существенно более длительный переходный процесс по сравнению с классической системой, особенно при высоких значениях расхода. Полученные графики переходного процесса изображены на рис.4.



**Рис.4. Сравнительный анализ динамики потока жидкости в системах ПИД-регуляторами и нечеткой регуляторами.**



Такое замедление обусловлено чрезмерным влиянием правила, которое предусматривает увеличение воздействия в случае отрицательной производной. Нечеткие логические выводы могут генерировать несколько возможных значений, что может приводить к занижению управляющего воздействия при применении метода центра максимума для дефаззификации.

Проблема, связанная с коррекцией ошибки учета дифференциального члена, которая появляется при использовании прямого метода дефаззификации, успешно разрешена. В результате удалось добиться равенства времени переходного процесса для системы с нечетким регулятором и системы с традиционным регулятором.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с растущим значением систем Advanced Process Control (APC) для оптимизации сложных производственных процессов, в работе предложен метод прогнозирования расхода жидких сред, основанный на нейронных многомодельных системах. Цель этого подхода - минимизировать общую стоимость ошибки прогноза, рассчитанной на несколько последующих интервалов времени. Разработана методика, которая имитирует процессы оперативно-прогнозного управления сложными системами, изменяющимися во времени. Эта методика использует предиктивную информацию для предсказания развития технологического процесса и оптимизации управляющих действий.

Разработана автоматическая система управления расходами технологических жидкостей и газов, основанная на нечетком ПИД-регуляторе. Такой подход позволяет оптимизировать работу объектов, являющихся подсистемами более сложных комплексных систем, что особенно актуально в рассматриваемой ситуации. В итоге достигается сокращение времени переходных процессов при регулировании расходов газожидкостных систем.

## ЛИТЕРАТУРЫ

1. Box G. E. P., Jenkins G. M., Reinsel G. C., Ljung G. M. Time Series Analysis: Forecasting and Control. 5th ed. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2016. -712 p.
2. Wang L. A Course in Fuzzy Systems and Control. – Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997. -452 p.
3. Camacho E. F., Bordons C. Model Predictive Control. 2nd ed. – London: Springer-Verlag, 2013. -405 p.
4. Oggunnaik B. A., Ray W. H. Process Dynamics, Modeling, and Control. – New York: Oxford University Press, 1994. – 1264 p.
5. Roffel B., Betlem B. Process Dynamics and Control: Modeling for Control and Prediction. – Chichester: John Wiley & Sons, 2006. – 424 p.
6. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. – 1985. – Vol. 15, No. 1. – P. 116–132.

7. Narendra K. S., Parthasarathy K. Identification and control of dynamical systems using neural networks // *IEEE Transactions on Neural Networks*. – 1990. – Vol. 1, No. 1. – P. 4–27.
8. Seborg D. E., Edgar T. F., Mellichamp D. A., Doyle F. J. Process Dynamics and Control. – 3rd ed. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2016. – 544 p.
9. Ross T. J. Fuzzy Logic with Engineering Applications. – 3rd ed. – Chichester: John Wiley & Sons, 2010. – 585 p.
10. N.R. Yusupbekov, Sh.M. Gulyamov, E.E. Ortiqov. Some problems of automatic control and management in conditions of uncertainty // *Central Asian Research Journal For Interdisciplinary Studies*, ISSN: 2181-2454 Volume 2 | Issue 10 |October, 2022 | SJIF: 5,965 | UIF: 7,6 | ISRA: JIF 1.947 | Google Scholar | [www.carjis.org](http://www.carjis.org), 2022.- pp.65-70. DOI: 10.24412/2181-2454-2022-10-65-70.
11. E.E.Ortiqov. Совершенствование систем контроля расхода газа в промышленных печах для повышения их энергоэффективности // *TECHSCIENCE.UZ*, Topical Issues of Technical Sciences, 2025-yil | 3-jild | 9-son, ISSN (onlayn): 3030-3702. - 31-36 b.