

Модель и алгоритм управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива

К.К. Оспанов

Академия гражданской защиты им. М. Габдуллина МЧС Республики Казахстан

Аннотация: В работе представлена математическая модель, алгоритм и результаты моделирования процесса управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива на основе ПИД-регулятора с фильтрацией текущей ошибки регулирования двойной скользящей средней.

Ключевые слова: автоматизация, подсистема, контроль, управление, паровая завеса трубчатой печи, давление пара, скользящее среднее.

Введение

Существующая на сегодняшний день практика и алгоритмы ликвидации аварий при разгерметизации технологического оборудования под избыточным давлением с образованием, распространением по промышленной площадке пожаровзрывоопасного облака топливовоздушной смеси на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях (далее ННП) показывает выполнение одновременного запуска систем паровых завес трубчатых печей (далее ПЗТП) технологических установок (ЭЛОУ-АТ, гидроочистки нефти, каталитического риформинга, гидроочистки дизельного топлива, гидроочистки керосина), входящих в комплекс нефтепереработки. Данный фактор обуславливает значительное увеличение потребления пара из паропроводной сети предприятия со снижением показателей давления пара ниже нормативно установленных для эффективного образования паровых струй ПЗТП, в частности, на участке технологических установок гидроочистки дизельного топлива (ТУ ГДТ) [1]. Результаты аналитического расчёта гидродинамических параметров комплекса нефтепереработки ЛК-6У, представленные в работе [2] показали при увеличении потребления пара для ПЗТП на 6,65 т/ч снижение показателей текущего давления пара в

паропроводной сети на участке ТУ ГДТ до 7,95 атм (при нормативном значении 9 атм согласно таблице, Л.1 к ГОСТ 12.3.047-2012 Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля) в течении 45 с. Также в работе [3] отмечается, что для обеспечения наибольшей эффективности ПЗТП, целесообразно использовать водяной пар среднего давления порядка 0,9 МПа и температурой, близкой к температуре насыщения, порядка 179 °С.

В связи с этим, для исследования по автоматизации процесса управления и поддержания требуемых показателей давления пара в ПЗТП ТУ ГДТ необходима разработка математической модели процесса управления давлением пара [2].

Основная часть

Для определения изменений давления пара в паропроводной сети комплекса нефтепереработки при запуске ПЗТП необходимо построение уравнений, учитывающих динамику входящего потока пара и отбора из него, а также потери, создаваемые при движении через трубопровод. Следовательно уравнение для расчёта текущего значения давления пара ($P_i(t)$) можно выразить согласно формулы (1):

$$P_i(t) = P_{i-1}(t) + \frac{dP(t)}{dt} - P_{yo}(t), \quad (1)$$

где $P_{i-1}(t)$ – начальное значение давления пара в начале участка паропровода на момент времени t , атм; $\frac{dP(t)}{dt}$ – приращение давления пара при изменении массы, атм; $P_{yo}(t)$ – удельные потери давления пара при перемещении по паропроводу на момент времени t , атм.

При постоянной температуре ($T=const$) процесс является изотермическим, в данном случае давление в трубопроводе определяется в зависимости от массы пара и уравнением, описывающим данный баланс,

является уравнение Менделеева-Клапейрона [4, 5] представленное формулой (2) и получаемое от него уравнение (3).

$$PV = nRT = \frac{m}{M} RT = mR_{\text{нар}}T; \quad (2)$$

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{R_{\text{нар}}T}{V} \cdot \frac{dm(t)}{dt} = \frac{R_{\text{нар}}T}{V} \cdot (G_{\text{вх}}(t) - G_{\text{вых}}(t)), \quad (3)$$

где P – давление газа, Па; V – объем паропровода, м³; n – количество вещества газа в молях, моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); m – масса пара, кг; $R_{\text{нар}}$ – универсальная газовая постоянная для водяного пара при рабочем давлении, Дж/(кг·К); T – абсолютная температура газа, К; M – молекулярная масса вещества, кг/моль; $\frac{dP(t)}{dt}$ – изменение давления за единицу времени, Па/с; $\frac{dm(t)}{dt}$ – изменение массы пара за единицу времени, кг/с; $G_{\text{вх}}(t)$ – входящий массовый расход пара на момент времени t , кг/с; $G_{\text{вых}}(t)$ – выходящий массовый расход пара на момент времени t , кг/с.

Удельные потери определяются по формуле (4) согласно методике [6].

$$P_{\text{уд}}(t) = \frac{0,8125 \cdot l \cdot \lambda \cdot G_{\text{вых}}^2(t)}{d^5 \cdot \rho}, \quad (4)$$

где l – длина участка паропровода, м; λ – коэффициент гидравлического трения;

$G_{\text{вых}}(t)$ – массовый расход пара из паропровода на момент времени t , кг/с; d – диаметр паропровода, м; ρ – плотность пара, кг/м³.

В современных автоматизированных системах управления технологическим процессом (далее АСУ ТП) широко известно использование принципа пропорционально-интегрально-дифференциального регулирования (ПИД-регулятор) и математическая модель управляющего сигнала $Y_i(t)$ в цифровом виде [7] представлена уравнением (5).

$$Y_i(t) = \frac{1}{X_p} \cdot \left(E_i(t) + T_D \frac{dE_i(t)}{dt} + \frac{1}{T_I} \sum_{i=0}^n E_i(t) dt \right) \cdot 100\%, \quad (5)$$

где X_p – полоса пропорциональности или заданное давление $P_{зад}$, атм; $E_i(t)$ – разность между заданным давлением $P_{зад}$ и текущим значением давлением $P_i(t)$, атм; T_D – постоянная времени дифференцирования, с; $dE_i(t)$ – разность ошибок регулирования между двумя соседними измерениями, атм; dt – разность между периодами измерений датчиком давления пара, с; T_I – постоянная времени интегрирования, с; $\sum_{i=0}^n E_i(t)$ – накопленная в i -й момент сумма рассогласований, атм.

Текущая ошибка регулирования $E(t)$ определяется разницей между установленным (нормативным) значением давления пара и текущим значением давления пара измеренным датчиком давления согласно уравнения (6).

$$E(t) = P_{зад} - P(t), \quad (6)$$

где $P_{зад}$ – заданное значение давления пара, атм; $P(t)$ – текущее значение давления пара на момент времени t , атм.

Для управления давлением пара $P(t)$ в ПЗТП ТУ ГДТ предусмотрено регулирование (снижение) массового расхода пара на технологические нужды установок нефтеперерабатывающего комплекса, следовательно выходящий массовый расход пара $G_{вых}(t)$ из паропроводной сети будет определяться как сумма расходов пара на технологические нужды установок и паровых завес трубчатых печей согласно уравнения (7).

$$G_{вых} = \sum_{i=1}^n G_{уст.i} + G_{ПЗ} = G_{ЭЛОУ} + G_{ГН} + G_{ГК} + G_{ГДТ} + G_{ПЗ}, \quad (7)$$

где $G_{уст.i}$ – расход пара на технологические нужды i -ой установки; $G_{ЭЛОУ}$ – расход пара на технологические нужды ЭЛОУ-АТ, кг/с; $G_{ГН}$ – расход пара на

технологические нужды установки гидроочистки нефти, кг/с; $G_{ГК}$ – расход пара на технологические нужды установки гидроочистки керосина, кг/с; $G_{ГДТ}$ – расход пара на технологические нужды установки гидроочистки дизельного топлива, кг/с; $G_{ГЗ}$ – расход пара для паровых завес трубчатых печей входящих в состав комплекса нефтепереработки, кг/с.

Массовый расход пара на технологические нужды установок $G_{уст}$ находится в зависимости от площади проходного сечения клапана скорости потока, плотности насыщенного пара, положения штока клапана и управляющего воздействия на него. Уравнение для расчёта массового расхода пара для технологических нужд установки представлено уравнением (8).

$$G_{уст}(t) = A_{кл} \cdot v_{кл} \cdot \rho \cdot (x_{кл}(t) + Y_i(t)), \quad (8)$$

где $A_{кл}$ – площадь проходного сечения клапана, м²; $v_{кл}$ – скорость потока пара через клапан, м/с; ρ – плотность насыщенного пара, кг/м³; $x_{кл}(t)$ – текущее положение штока клапана; $Y_i(t)$ – управляющий сигнал регулятора, %.

В регуляторах для улучшения качества управления используются фильтры, которые помогают уменьшить влияние шума и других нежелательных колебаний, улучшая тем самым точность и стабильность системы.

На сегодняшний день существует различные примеры фильтров в зависимости от цели фильтрации и среди наиболее распространённых цифровых фильтров можно отметить:

- 1) *фильтры нижних частот* [8], помогают убрать высокочастотные колебания из сигнала ошибки, тем самым уменьшая влияние шума;
- 2) *фильтры скользящего среднего* [9, 10], используются для сглаживания сигнала за счёт усреднения значений ошибки за определённый период времени;

3) *фильтры Калмана* [11], сложные алгоритмические фильтры, которые могут использоваться для предсказания состояния системы и фильтрации шума из сигнала.

Среди вышеперечисленных наиболее простым и перспективным фильтром для линейной системы является фильтр скользящего среднего (ФСС) и ниже уравнением (9) представлен ФСС текущей ошибки регулирования $E_{ci}(t)$.

$$E_{ci}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=t-N+1}^t E_i(t), \quad (9)$$

где $E_i(t)$ – текущая ошибка регулирования в момент времени t , атм; N – ширина фильтрации.

Для совершенствования процесса управления предлагается новый способ фильтрации текущей ошибки регулирования – фильтр двойной скользящей средней (ФДСС), заключающийся в последовательной вторичной фильтрации полученных ранее значений ФСС текущей ошибки регулирования. Уравнение ФДСС текущей ошибки регулирования $E_{2ci}(t)$ представлено уравнением (10).

$$E_{2ci}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=t-N+1}^t E_{ci}(t), \quad (10)$$

где $E_{ci}(t)$ – скользящее среднее текущей ошибки регулирования в момент времени t , атм; N – ширина фильтрации.

Исходя из вышепредставленных уравнений 1-10 системой уравнений (11) представлена развернутая модель процесса управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ на основе синтеза ПИД-регулятора и ФДСС.

На основе математической модели (11) и метода регулирования с обратной связью разработан алгоритм функционирования подсистемы в режиме моделирования. Блок-схема алгоритма функционирования подсистемы в режиме моделирования представлена на рис.1.

$$\begin{cases}
 E_i(t) = P_{зад} - P_i(t); \\
 E_{ci}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=t-N+1}^t E_i(t); \\
 E_{2ci}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=t-N+1}^t E_{ci}(t); \\
 Y_i(t) = \frac{1}{P_{зад}} \cdot \left(E_i(t) + T_{дл} \frac{dE_i(t)}{dt} + \frac{1}{T_{и}} \sum_{i=0}^n E_i(t) dt \right) \cdot 100\%; \\
 Y_i(t) > 0; \\
 G_{вых}(t) = A_{кл} \cdot v_{кл} \cdot \rho \cdot \left((x_{элов}(t) + Y_i(t)) + (x_{гн}(t) + Y_i(t)) + (x_{гк}(t) + Y_i(t)) + (x_{гдт}(t) + Y_i(t)) \right) + G_{пз}; \\
 P_i(t) = P_{i-1}(t) + \frac{R_{пар} T}{V} \cdot (G_{вх}(t) - G_{вых}(t)) - \frac{0,8125 \cdot l \cdot \lambda \cdot G_{вых}^2(t)}{d^5 \cdot \rho}.
 \end{cases} \quad (11)$$

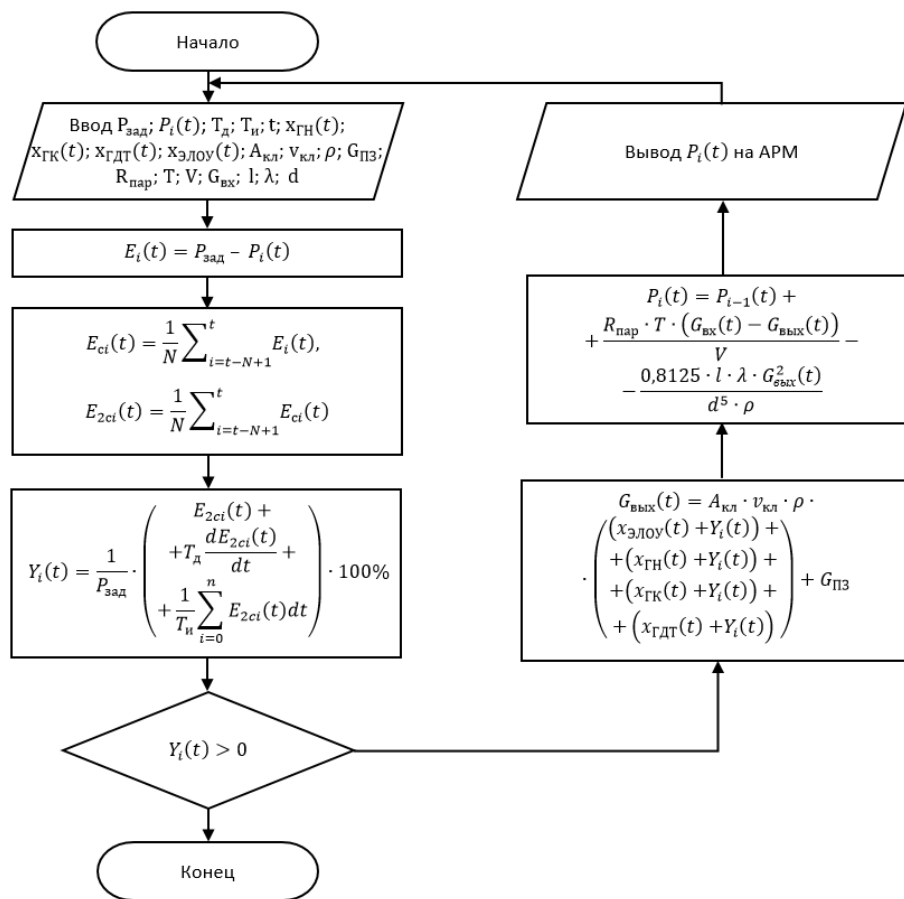


Рис. 1 – Блок-схема алгоритма функционирования программного модуля в режиме моделирования

На основе модели (11) и алгоритма, представленного на рис.1 разработана программа для ЭВМ «Программный модуль автоматической

системы контроля и поддержки давления пара противопожарной паровой завесы трубчатой печи» (программный модуль) [12].

Исследование выбора оптимальной ширины ФСС и показала, что наиболее устойчивой является ширина фильтрации второго порядка.

В программном модуле [12] проведено моделирование процесса управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ с периодом измерения датчиком давления пара (dt) 1 сек; постоянных времени интегрирования (T_{II}) равной 5 с и дифференцирования (T_D) равной 9,5 с; входящим массовым расходом пара ($G_{ex}(t)$) 24 т/ч; массовым расходом пара для ПЗТП ($G_{ПЗ}$) 6,65 т/ч; заданным давлением пара ($P_{зад}$) 9 атм; текущим значением давления пара $P(t)$ 7,95 атм, шириной фильтрации (N) второго порядка; площадью проходного сечения клапана ($A_{кл}$) 0,07 м²; скоростью потока при максимальном расходе через клапан ($v_{кл}$) 7,92 м/с; плотностью насыщенного пара (ρ) 4,93 кг/м³; начальным положением регулирующих клапанов подачи пара на технологические нужды установок ($x_{элов}(t)$, $x_{ГН}(t)$, $x_{ГК}(t)$, $x_{ГДТ}(t)$) равным 0,5; универсальной газовой постоянной для водяного пара ($R_{нар}$) 461,5 Дж/кгК; абсолютной температурой насыщенного водяного пара (T) 446 К; объёмом паропровода (V) м³; длиной участка паропровода (l) 500 м; коэффициентом гидравлического трения (λ) 15; диаметром паропровода (d) 0,3 м.

Сравнительные результаты моделирования с использованием базовой модели ПИД-регулятора [4, 13, 14], ПИД-регулятора с ФСС [10] и предложенным методом ФДСС представлены на рис. 3.

Результаты представленные на рис.3 показывают положительное влияние ФДСС, которая выражена в ускорении переходных процессов в сравнении с ФСС на 61%, с 18 до 7 с. Это связано с влиянием текущей ошибки регулирования на формирование интегральной и дифференциальных

функций регулятора и на рис.4 представлена динамика изменения данных функций регулятора.

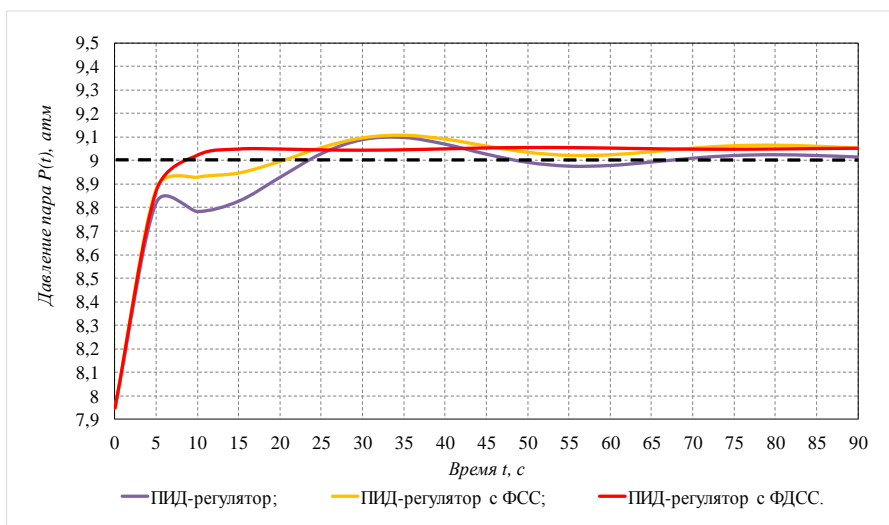
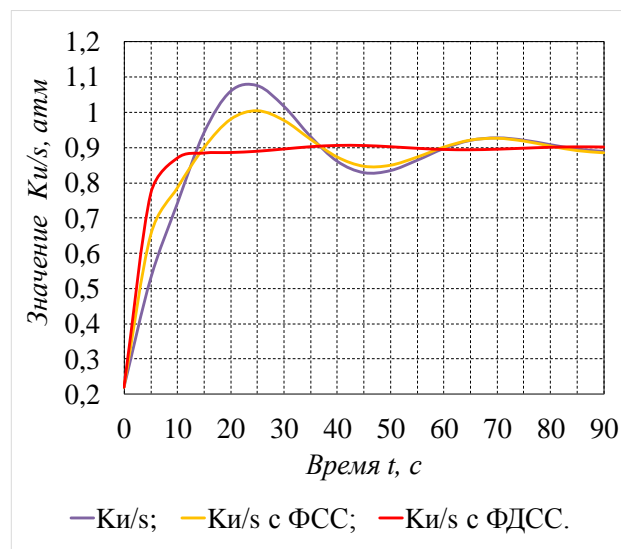
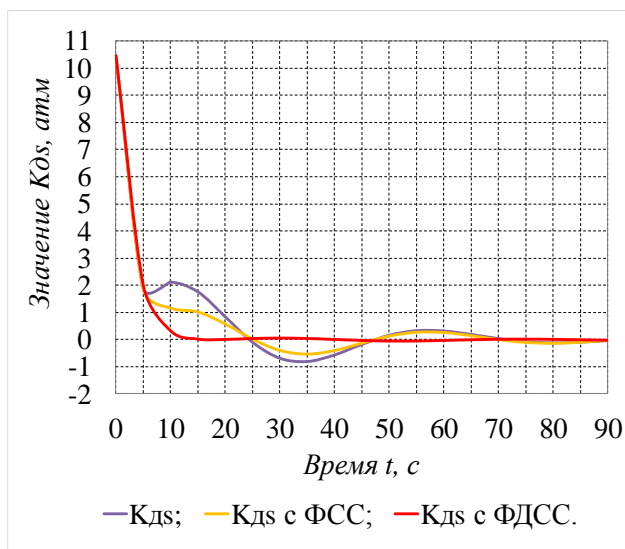


Рис. 3 – Сравнительные результаты моделирования процесса управления давлением пара ПИД-регулятором ПИД-регулятором с ФСС и ФДСС



а) Дифференциальная функция $K_{дs}$

б) Интегральная функция $K_{и/s}$

Рис. 4 – Динамика изменения дифференциальной и интегральной функций ПИД-регулятора

На основе результатов моделирования процесса управления давлением пара представленных на рис.3, с использованием регрессионного анализа проведена проверка адекватности разработанной математической модели управления давлением пара на основе синтеза ПИД-регулятора и ФДСС. По

результатам регрессионного анализа получен коэффициент линейной детерминации (R^2) равный 0,86, что свидетельствует об адекватности используемой модели описываемому процессу.

Выводы

Разработана математическая модель и алгоритм процесса управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива с фильтрацией текущей ошибки регулирования двойным скользящим средним, позволивший улучшить качество и сократить время переходных процессов на 61% в сравнении с существующим методом фильтрации скользящей средней при управлении давлением пара в системе. Программное обеспечение на основе разработанной математической модели и алгоритма позволит обеспечить проведение предварительной оценки процесса управления по стабилизации требуемых показателей давления пара для обеспечения непрерывного эффективного функционирования паровых завес трубчатых печей в условиях резкого увеличения потребления пара от паропроводной сети нефтеперерабатывающего комплекса.

Литература

1. Fedorov A.V., Ospanov K.K., Nehamkin V.G. Analytical review of emergency protection process for diesel fuel hydraulic treatment // Scientific research of the SCO countries: synergy and integration: Proceedings of the International Conference: Participants' reports in English, Beijing, 30 декабря 2021 года. – Beijing: Scientific publishing house Infinity, 2021. P. 219-223.

2. Федоров А.В., Рубцов Д.Н., Оспанов К.К. Контроль и поддержание параметров эффективного функционирования паровой завесы трубчатой печи // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2023. №2. С. 73-80. DOI 10.25257/FE.2023.2.73-80.

3. Добротворский А.М., Балуттов А.В., Денисенко Е.П., Легостаев Д.А., Шувалов А.Е., Васецкий А.Ф. О вреде экономии на паровой завесе печей // Химическая техника. 2016. №2. С. 25.

4. Гоппе Г.Г., Киргин Д.С. Математическая модель управления давлением газовых сред в автоклаве для вулканизации резиновых изделий // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. №11(58). С. 15-20.

5. Навацкая В.А. Моделирование системы управления давлением пара во внешней паровой ёмкости // Russian Journal of Logistics & Transport Management. 2021. Т. 6, №2. С. 58-63.

6. Сафонов, А. П. Сборник задач по теплофикации и тепловым сетям, Москва, ЭнергоАтомИздат, 1985. С. 64-65.

7. Шульга К.В., Деменковец Д.В. Применение математической модели PID-регулятора для симуляции движения судомодели // 58-я конференция аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 18-22 апреля 2022 г., БГУИР, Минск, Беларусь: сборник статей. Мн.: БГУИР, 2022. С. 61-65.

8. Андрианов А.В., Губарев Д.Е., Зикий А.Н., Кочубей А.С. Моделирование фильтра нижних частот // Инженерный вестник Дона, 2024, №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2019/6008.

9. Кичкидов А.А., Семенов Д.А., Добреля А.А. Применение методов математической статистики для фильтрации сигналов // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2005. Т. 1. С. 135-136.

10. Pengfei Luo, Min Zhang, Yile Liu, Dahai Han and Qing Li. A moving average filter based method of performance improvement for ultraviolet communication system // 2012 8th International Symposium on Communication

Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP) 2012, Poznan, 2012, pp. 1-4. DOI: 10.1109/CSNDSP.2012.6292672.

11. Лушников Н.Д. Система распознавания пользователей по извлекаемым признакам голоса с применением фильтра Калмана // Инженерный вестник Дона, 2024, №2. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2024/9016>.

12. Оспанов К.К., Малфи Х.А.М.Н. Программный модуль автоматической системы контроля и поддержки давления пара противопожарной паровой завесы трубчатой печи. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023618750. Бюллетень №5. 28.04.2023 URL: elibrary.ru/item.asp?id=53819045.

13. Гоппе Г.Г., Киргин Д.С. Математическое моделирование и экспериментальное исследование процесса изменения давления пара в автоклаве при вулканизации резиновых изделий // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. №11(82). С. 265-271.

14. Чихрай Е.В., Шестаков В.П., Аскербекоев С.К., Кенжина И. Е. Способ стабилизации давления водяного пара при проведении высокотемпературных коррозионных испытаний графитовых материалов ЯР И ТЯР // Вестник НЯЦ РК. 2018. №4. С. 134-138.

References

1. Fedorov A.V., Ospanov K.K., Nehamkin V.G. Scientific research of the SCO countries: synergy and integration: Proceedings of the International Conference: Participants' reports in English, Beijing, 30 dekabirja 2021 goda. Beijing: Scientific publishing house Infinity, 2021. P. 219-223.

2. Fedorov A.V., Rubcov D.N., Ospanov K.K. Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashhenie, likvidacija. 2023. №2. pp. 73-80. DOI 10.25257/FE.2023.2.73-80.

3. Dobrotvorskij A.M., Balutov A.V., Denisenko E.P., Legostaev D.A.,

Shuvalov A.E., Vaseckij A.F. Himicheskaja tehnika. 2016. №2. P. 25.

4. Goppe G.G., Kirgin D.S. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2011. №11 (58). pp. 15-20.

5. Navackaja V.A. Russian Journal of Logistics & Transport Management. – 2021. T. 6, №2. pp. 58-63.

6. Safonov, A. P. Sbornik zadach po teplofikacii i teplovym setjam [Collection of tasks on heating and heating networks], Moskva, JenergoAtomIzdat, 1985. pp. 64-65.

7. Shul'ga K.V., Demenkovec D.V. 58-ja konferencija aspirantov, magistrantov i studentov uchrezhdenija obrazovanija «Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radiojelektroniki», 18-22 aprelja 2022 g., BGUIR, Minsk, Belarus': sbornik statej. Mn.: BGUIR. 2022. pp. 61-65.

8. Andrianov A.V., Gubarev D.E., Zikij A.N., Kochubej A.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2019/6008.

9. Kichkidov A.A., Semenov D.A., Dobrelja A.A. Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo». 2005. T. 1. pp. 135-136.

10. Pengfei Luo, Min Zhang, Yile Liu, Dahai Han and Qing Li. 2012 8th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP) 2012, Poznan, 2012, pp. 1-4. DOI: 10.1109/CSNDSP.2012.6292672.

11. Lushnikov N.D. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, №2. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2024/9016>.

12. Ospanov K.K., Malfi H.A.M.N. Programmnyj modul' avtomaticheskoy sistemy kontrolja i podderzhki davlenija para protivopozharnoj parovoj zavesy trubchatoj pechi [The software module of the automatic steam pressure monitoring and support system of the fire-fighting steam curtain of the tubular furnace]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2023618750. Bjulleten' № 5. 28.04.2023 URL: elibrary.ru/item.asp?id=53819045.



13. Goppe G.G., Kirgin D.S. Vestnik Irkutского gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2013. №11 (82). pp. 265-271.

14. Chihraj E.V., Shestakov V.P., Askerbekov S.K., Kenzhina I. E. Vestnik NJaC RK. 2018. №4. pp. 134-138.

Дата поступления: 14.04.2024

Дата публикации: 30.05.2024