

*\*Денисова Н. А., Маковецкий Р. А.*

*Донбасский государственный технический университет,*

*\*E-mail: natdeny@yandex.ru*

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Работа посвящена разработке программного обеспечения для оценки психофизиологического состояния человека-оператора на основании показаний датчиков носимого индивидуального устройства. Предложено в качестве математической модели использовать метод нечеткого логического вывода.*

**Ключевые слова:** металлургическое оборудование, человек-оператор, психофизиологическое состояние, нештатная ситуация, метод нечеткого логического вывода, компьютерная программа.

**Финансирование:** исследования выполнены за счет средств федерального бюджета по теме «Экспертная система обеспечения надежности металлургического оборудования с учетом психофизиологического состояния оператора в реальном времени» (код темы: FRRU-2023-0005 в ЕГИСУ НИОКРП).

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Металлургическое производство является одной из флагманских отраслей Донбасса. Его перезапуск и переориентация на выпуск востребованной продукции позволит запустить и другие смежные отрасли. Более того, продукция металлургических предприятий Донбасса, учитывая масштаб разрушений и износа критически важной инфраструктуры, очень востребована для развития Республики. Поэтому прогноз и обеспечение надежности металлургических машин и агрегатов являются первоочередными задачами, решение которых должно предшествовать модернизации производства или являться ее первым этапом.

Общеизвестно, что надежность — это неотъемлемая часть качества любой технической системы. Надежность — это комплексное понятие, включающее множество показателей, выбор которых зависит от конкретного объекта (его характеристик, назначения, свойств). Выход из строя одного из показателей может привести к возникновению нештатной ситуации.

Из проведенного анализа возникновения нештатных ситуаций на ООО «ЮГМК» в

кислородно-конвертерном цехе на машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) в период с 2018 г. по настоящее время установлено, что наибольшее количество отказов оборудования пришлось на 2019 год (рис. 1).

Причинами возникающих аварийных ситуаций являлись: прорыв, прекращение разлива, некрытие стопора, перелив металла через кристаллизатор, выход из строя погружного стакана и отрыв затравки (рис. 2).

Количество нештатных ситуаций по годам

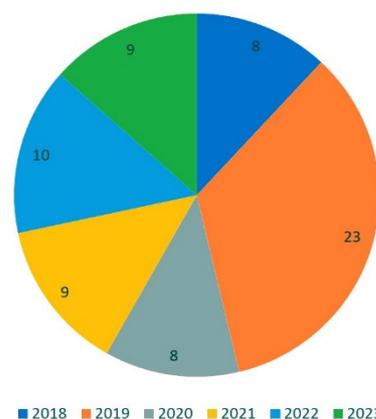


Рисунок 1 — Количество нештатных ситуаций, возникших на МНЛЗ



Рисунок 2 — Виды и количество нештатных ситуаций, возникших на ООО «ЮГМК»

Таким образом, на сегодняшний день ключевым остается вопрос безаварийной работы металлургических машин и агрегатов. Для снижения риска возникновения нештатных ситуаций (НС), а также негативного их развития вплоть до серьезных аварий необходим комплексный подход: устранение причин отказов на этапе проектирования, изготовления и обслуживания; совершенствование систем раннего предупреждения НС самых уязвимых узлов машин и агрегатов металлургического оборудования; расширение спектра контролируемых параметров, улучшение визуализации информации о состоянии процесса и оборудования в режиме реального времени; создание резервных систем для продолжения работы или безопасной остановки основного оборудования; локализация масштаба развивающейся нештатной ситуации с целью защиты персонала и смежного оборудования; подготовка персонала к эффективным действиям в условиях неопределенности при возникновении НС; проведение противоаварийных тренировок.

Ключевой проблемой современной высокотехнологичной металлургии является нарастающее противоречие между усложнением технологических систем и критической ролью человека при возникновении

нештатной ситуации. Чтобы исключить влияние человеческого фактора, процессы механизуются, автоматизируются и роботизируются. Но роль человека пока остается достаточно высокой, особенно в периоды, когда наблюдаются технические или технологические сбои в работе машин и агрегатов. И чем сложнее производственные процессы и уникальнее эксплуатируемое оборудование, тем выше цена ошибки принятия техническим и обслуживающим персоналом неправильного решения.

**Постановка задачи.** С точки зрения производственной безопасности металлургических предприятий особая ответственность возлагается на операторов высокотехнологичных машин и агрегатов. В инженерной психологии их принято называть «человек-оператор» [1]. Иногда именно от его решения, основанного на анализе ситуации, опыте и интуиции, зависит предотвращение эскалации опасности и недопущение инцидента или аварии на производстве.

С целью снижения риска возникновения нештатной ситуации из-за действий «человека-оператора» необходим контроль его психофизиологического состояния (ПФС).

В связи с этим *целью* данной работы является разработка программного обеспече-

ния для оценки психофизиологического состояния человека-оператора на основании показаний с датчиков носимого индивидуального устройства.

**Объект исследования** — психофизиологическое состояние оператора металлургического оборудования.

**Предмет исследования** — оценка ПФС оператора металлургического оборудования на основе данных, поступающих с датчиков индивидуального устройства.

**Задачи исследования:**

– анализ влияния психофизиологического состояния «человека-оператора» на безопасность функционирования металлургического оборудования;

– разработка программного обеспечения для мониторинга ПФС работника на основе данных, поступающих с датчиков индивидуального устройства в режиме реального времени.

**Методика исследования.** В статье [2] отмечено, что для определения психофизиологической оценки функционального состояния «человека-оператора» выделяют две составляющие: физиологическое состояние и психическое состояние. В данной работе для разработки компьютерной программы использовались показатели физиологического состояния человека, основанные на их измерении в режиме реального времени.

**Изложение материала.** В работе П. Г. Белова [3] приведены количественные характеристики безошибочности действий среднестатистического человека, которые могут быть использованы для определения вероятностей отказа в системе «человек — машина». Классифицируя ошибки по типам и связывая их с действиями человека, исследователь установил, что стресс является одним из самых ощутимых факторов, способствующих возникновению физических и психофизиологических опасностей на рабочем месте.

ГОСТ 12.0.003-2015 выделяет в отдельный блок опасные и вредные производственные факторы психофизиологического воздействия на человека. Оператор испыты-

вает нервно-психические перегрузки, связанные с напряженностью трудового процесса. В их числе: умственное перенапряжение; перенапряжение анализаторов; монотонность труда; неуверенность в действиях из-за недостатка образования и опыта [4].

Надежность человека как элемента сложной технической системы зависит от внутренних и внешних условий, которые меняются во времени.

В [5] выделены технические, санитарно-гигиенические, организационные и психофизиологические группы факторов аварийности и травматизма на металлургических и коксохимических предприятиях (рис. 3).

Последние две группы тесно связаны с человеком — непосредственным участником производственных процессов.

Таким образом можно сделать вывод, что в современных условиях, независимо от степени автоматизации металлургического производства, степень влияния человека на технологический процесс остается довольно высокой. Присутствие человека в системе обуславливает наличие ошибок.

В связи с этим некорректно производить расчеты надежности оборудования без учета надежности работы человека. В основу разработки компьютерной программы легла математическая модель с использованием нечеткого логического вывода [1]. Предложенная модель реализована в программном комплексе MatLab. Однако MatLab, несмотря на свои широкие возможности, имеет значительные недостатки при моделировании нечетких систем:

– инструменты нечеткой логики (Fuzzy Toolbox) заточены под офлайн-анализ, а не потоковую обработку;

– процесс фазификации применения нечетких правил (особенно при использовании сложных функций принадлежности или методов импликации) вычислительно затратен;

– встроенные функции модуля Fuzzy Logic Toolbox не всегда оптимизированы для максимальной скорости в циклах реального времени.

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**



Рисунок 3 — Группы факторов аварийности и травматизма

Альтернативой для Real-Time нечеткого моделирования временных процессов является Python.

Python — это высокоуровневый, интерпретируемый язык программирования, известный своей простотой и читаемостью синтаксиса, который обладает обширной стандартной библиотекой. Python также является эффективным инструментом для обработки в реальном масштабе времени информации от датчиков, работающих с Rum-Teim.

Программа «PFS\_Operator.py» представляет собой основу системы мониторинга ПФС работника на основе данных с датчиков с использованием нечеткой логики. Она включает в себя импорт необходимых библиотек, определение входных и выходных переменных нечеткой логики и их функций принадлежности, а также обработку данных из CSV-файла.

Программа содержит следующие основные блоки (рис. 4):

– импорт библиотек: «os», «numpy», «skfuzzy», «skfuzzy.control», «pandas»,

«chardet», «matplotlib.pyplot», «csv», «time», «watchdog»;

– организация мониторинга изменения показателей датчиков в реальном времени. Данные поступают из файла «SensorData.csv». После выполнения всех необходимых расчетов в программе по определению ПФС работника результаты выводятся в выходной файл «PFS\_Result.csv» и в графические файлы «chart1.png» и «chart2.png»;

– определение диапазонов входных переменных  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  и создание объектов для входных переменных;

– определение диапазонов выходной переменной  $K$  (индикатор ПФС работника) и создание объекта для выходной переменной  $K$ ;

– определение классов ПФС работника. В этом блоке создается класс Situation, который будет использоваться для классификации состояния работника на основе значения индикатора  $K$ . Метод `init` принимает значение и вызывает метод классификации;

– определение функций принадлежности для каждой входной и выходной переменной;

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

- определение производственных правил: создаются нечеткие правила, связывающие входные и выходные переменные;
- создание системы управления: создается нечеткая система управления на основе определенных правил;
- запуск системы управления для получения необходимых оценок ПФС для текущих показаний  $x_1, x_2, x_3$ ;

– организация обновления записей результатов в DataFrame и записи данных в выходной файл «PFS\_Result.csv».

Фрагменты результатов выполнения программы «PFS\_Operator.py» на контрольной выборке данных, графическая интерпретация результатов и построение графика изменения индикатора ПФС оператора представлены на рисунке 5.

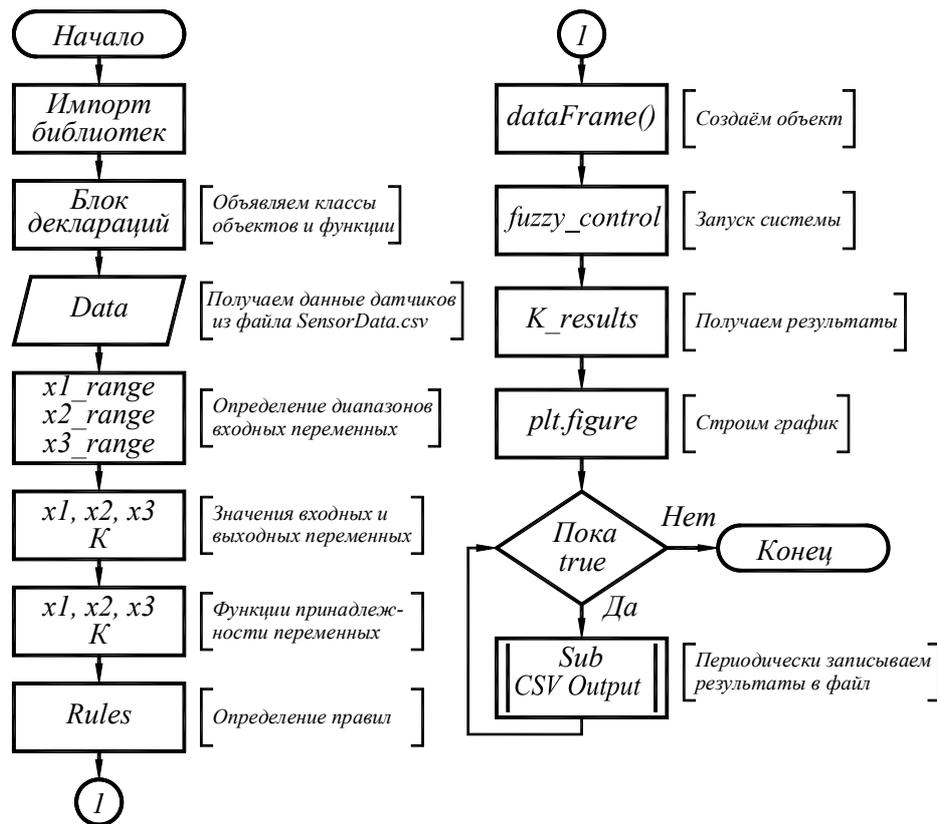


Рисунок 4 — Блок-схема программы «PFS\_Operator.py»

```

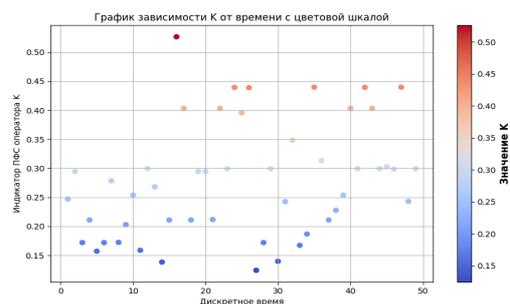
Python 3.12.8 (tags/v3.12.8:2dc476b, Dec 3 2024, 19:30:04) [MSC v.1942 64 bit (AMD64)] on win32
Type "help", "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>>
===== RESTART: C:\Users\ASUS\Documents\my_prog\trial_time\PFS_Operator.py =====
Входные переменные - текущие показания датчиков:
X1 - частота сердечных сокращений (ЧСС), уд/мин
X2 - температура тела оператора, град.С
X3 - показатель кожно-гальванической реакции (КГР), ком
Выходная переменная - индикатор K, характеризующий психофизиологическое состояние оператора (ПФС):
Классы ПФС, определяемые на основе значений индикатора K:
класс A - нормальное рабочее состояние;
класс B - эмоциональная напряженность, возможны ошибочные действия;
класс C - переутомление, велика вероятность ошибок;
класс D - нерабочее состояние, соответствующее заболеванию.
Monitoring changes in SensorData.csv...
File modified, updating chart...
Определенная кодировка: ascii
Saving chart1.png
Squeezed text (51 lines)
Saving chart2.png
Данные успешно записаны в PFS_Result.csv
Файл PFS_Result.csv обновлен.
    
```



Рисунок 5 — Фрагменты результатов выполнения программы «PFS\_Operator.py»

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

|    | n  | date       | time  | x1  | x2   | x3 | K        | PFS    |
|----|----|------------|-------|-----|------|----|----------|--------|
| 0  | 1  | 01.12.2024 | 8:00  | 100 | 36.6 | 40 | 0.247051 | A or B |
| 1  | 2  | 01.12.2024 | 8:10  | 90  | 36.7 | 44 | 0.294367 | A or B |
| 2  | 3  | 01.12.2024 | 8:20  | 87  | 36.6 | 32 | 0.172081 | A or B |
| 3  | 4  | 01.12.2024 | 8:30  | 87  | 36.6 | 39 | 0.210871 | A or B |
| 4  | 5  | 01.12.2024 | 8:40  | 80  | 36.6 | 36 | 0.157165 | A or B |
| 5  | 6  | 01.12.2024 | 8:50  | 75  | 36.6 | 38 | 0.172046 | A or B |
| 6  | 7  | 01.12.2024 | 9:00  | 64  | 36.6 | 42 | 0.278394 | A or B |
| 7  | 8  | 01.12.2024 | 9:10  | 96  | 36.6 | 32 | 0.172369 | A or B |
| 8  | 9  | 01.12.2024 | 9:20  | 62  | 36.8 | 38 | 0.202941 | A or B |
| 9  | 10 | 01.12.2024 | 9:30  | 98  | 37.0 | 31 | 0.253915 | A or B |
| 10 | 11 | 01.12.2024 | 9:40  | 69  | 36.6 | 36 | 0.158811 | A or B |
| 11 | 12 | 01.12.2024 | 9:50  | 45  | 36.7 | 54 | 0.299621 | A or B |
| 12 | 13 | 01.12.2024 | 10:00 | 96  | 35.9 | 41 | 0.267978 | A or B |
| 13 | 14 | 01.12.2024 | 10:10 | 88  | 36.6 | 28 | 0.138460 | A or B |
| 14 | 15 | 01.12.2024 | 10:20 | 75  | 36.6 | 39 | 0.210840 | A or B |
| 15 | 16 | 01.12.2024 | 10:30 | 77  | 36.7 | 21 | 0.526383 | C      |



Продолжение рисунка 5

**Выводы и направление дальнейших исследований.** В настоящее время программа «PFS\_Operator.py» проходит этап тестирования и нуждается в испытаниях для решения ряда задач, связанных с настройкой параметров используемого алгоритма нечеткого логического вывода Мамдани. Поскольку в модели заложены интервалы оценок входных и выходных переменных  $x_1, x_2, x_3, K$  на основании среднестатистических параметров человека [6], то для более эффективного использования устройства в

качестве средства диагностики ПФС работника необходимо разработать алгоритм индивидуализации параметров модели для настройки ее на конкретного работника. В связи с этим для создания эффективной системы мониторинга на следующем этапе планируется проведение широкой программы исследований с участием работников металлургической отрасли, выполняющих работу операторов на высокотехнологичных машинах и агрегатах.

**Список источников**

1. Подлипенская Л. Е., Бондарь Н. А., Денисова Н. А. Оценка функциональной деятельности оператора в системе человек-машина // *Среда, окружающая человека: природная, техногенная, социальная : матер. XIII междунар. науч.-практ. конф.* Брянск : БГИТУ, 2024. С. 151–155. EDN OYRNIO
2. Денисова Н. А., Подлипенская Л. Е., Козачишнев В. А. Классификация психофизиологического состояния человека-оператора в режиме реального времени на базе данных, поступающих с датчиков индивидуального устройства // *Научные технологии и оборудование в промышленности и строительстве. 2024. № 6 (80).* С. 72–84. EDN AYQAPF
3. Белов П. Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере. М. : центр Академии ГЗ МЧС РФ, 2003. 512 с. EDN QMDVST
4. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. М. : Стандартинформ, 2016. 10 с.
5. Негреева В. В., Василенок В. Л., Кагиян О. А. Исследование проблем охраны труда и их влияние на промышленную безопасность предприятий черной металлургии // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия : Экономика и экологический менеджмент. 2019. № 4.* С. 41–50. DOI: 10.17586/2310-1172-2019-12-4-41-50. EDN PHZVOB
6. Вишневский Д. А. Развитие научных основ и практика обеспечения безотказной эксплуатации металлургических машин и механизмов : дис. ... д-ра техн. наук. Донецк, 2021. 336 с.

© Денисова Н. А., Маковецкий Р. А., 2025

Рекомендована к печати к.э.н., доц., зав. каф. ТОМП ДонГТУ Зинченко А. М., д.т.н., проф. каф. МОЗЧМ ДонНТУ Сотниковым А. Л.

Статья поступила в редакцию 05.06.2025.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Денисова Наталья Анатольевна**, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. машин металлургического комплекса

Донбасский государственный технический университет,  
г. Алчевск, Россия, e-mail: natdeny@yandex.ru

**Маковецкий Руслан Артурович**, аспирант каф. машин металлургического комплекса

Донбасский государственный технический университет,  
г. Алчевск, Россия

\***Denisova N. A., Makovetskiy R. A.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, \*e-mail: natdeny@yandex.ru)

#### SOFTWARE PROGRAMMING FOR ASSESSING PSYCHOPHYSIOLOGICAL STATE OF A HUMAN-OPERATOR OF METALLURGICAL EQUIPMENT

*This work focuses on developing software that assesses the psychophysiological state of human-operator based on sensor readings from a personalized wearable device. The method of fuzzy logical inference is proposed as a mathematical model.*

**Key words:** metallurgical equipment, human-operator, psychophysiological state, abnormal situation, method of fuzzy logical inference, computer program.

**Funding:** the research is funded from the federal budget on the theme “Expert system for ensuring the reliability of metallurgical equipment considering the psychophysiological state of the operator in real time” (theme code: FRRU-2023-0005 in the Unified state information system for accounting the research, experimental and technical works).

#### References

1. Podlipenskaya L. E., Bondar' N. A., Denisova N. A. Assessment of operator's functional activity in the man-machine system [Ocenka funktsional'noy deyatel'nosti operatora v sisteme chelovek-mashina]. Sreda, okruzhayushchaya cheloveka: prirodnyaya, tekhnogennaya, social'naya : materialy XIII mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. Bryansk : BSTUE, 2024. Pp. 151–155. EDN OYPNIO
2. Denisova N. A., Podlipenskaya L. E., Kozachishen V. A. Real-time classification of the psychophysiological state of a human-operator based on data from the personalized wearable device. [Klassifikatsiya psihofiziologicheskogo sostoyaniya cheloveka-operatora v rezhime real'nogo vremeni na baze dannyh, postupayushchih s datchikov individual'nogo ustrojstva]. Knowledge-intensive technologies and equipment in industry and building. 2024. No. 6 (80). Pp. 72–84. EDN AYQAPF
3. Belov P. G. System analysis and modelling of hazardous processes in the technosphere [Sistemnyy analiz i modelirovanie opasnykh processov v tekhnosfere]. M. : Publishing House Center Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2003. 512 p. EDN QMDVST
4. GOST 12.0.003-2015. System of labor safety standards. Hazardous and harmful production factors. Classification. M. : Standartinform. 2016. 10 p.
5. Negreeva V. V., Vasilenok V. L., Kagiyan O. A. Study of labour protection problems and their impact on industrial safety of ferrous metallurgy enterprises [Issledovanie problem ohrany truda i ih vliyanie na promyshlennuyu bezopasnost' predpriyatij chernoy metallurgii]. Scientific journal NRU ITMO. The series : Economics and Environmental Management. 2019. No. 4. Pp. 41–50. DOI: 10.17586/2310-1172-2019-12-4-41-50. EDN PHZVOB
6. Vishnevskiy D. A. Development of scientific bases and practice of maintenance of failure-free operation of metallurgical machines and mechanisms : thesis ... dr. of technical sciences [Razvitiye nauchnykh osnov i praktika obespecheniya bezotkaznoy ekspluatscii metallurgicheskikh mashin i mekhanizmov : dis. ... d-ra tekhn. nauk]. Donetsk, 2021. 336 p.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

***Denisova Natalia Anatol'evna***, PhD in Engineering, Assistant Professor, Head of the Department of Metallurgical Complex Machines  
Donbass State Technical University,  
Alchevsk, Russia, e-mail: natdeny@yandex.ru

***Makovetskiy Ruslan Arturovich***, Postgraduate of the Department of Metallurgical Complex Machines  
Donbass State Technical University,  
Alchevsk, Russia