

УДК 004.891+007.52+004.896+681.518+65.011.56 DOI 10.24412/2413-7383-2025-2-37-159-172

К. С. Смирнов ¹, О. О. Варламов ^{1,2,3}

¹Институт искусственного интеллекта Российского технологического университета МИРЭА
119454, Проспект Вернадского, д. 78, Москва, Россия

²Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
105005, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1, Москва, Россия

³АО НИИ Вычислительных комплексов им. М. А. Карцева,
117437, ул. Профсоюзная, д. 108, Москва, Россия

МЭС ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПЕРСОНАЛА ГАЗОПОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕХА ПРИ ДОБЫЧЕ ЖИДКОЙ СЕРЫ

K. S. Smirnov ¹, O. O. Varlamov ^{1,2,3}

¹Institute of Artificial Intelligence of the Russian Technological University MIREA
119454, Vernadsky ave., bld. 78, Moscow, Russia

²Bauman Moscow State Technical University
105005, 2-ya Baumanskaya st., bld. 5, building 1, Moscow, Russia

³JSC M. A. Kartsev Research Institute of Computing Systems,
117437, Profsoyuznaya st., bld. 108, Moscow, Russia

MES FOR SUPPORTING DECISION-MAKING OF GAS PROCESSING SHOP STAFF IN LIQUID SULFUR MINING

В данной статье представлена разработка миварной экспертной системы поддержки принятия решений для персонала газоперерабатывающего цеха при добыче жидкой серы. Система реализована с использованием миварных технологий логического искусственного интеллекта и платформы «КЭСМИ». Проведен анализ технологических факторов, влияющих на эффективность добычи жидкой серы, выявлены ключевые параметры, определяющие производственные риски и нарушения, а также разработана модель прогнозирования для поддержки оперативных и стратегических решений персонала. Предложенный подход позволяет минимизировать риски, повысить производительность и обеспечить стабильность технологического процесса.

Ключевые слова: мивар, миварные сети, миварные экспертные системы, машинное обучение, технологический процесс, производство, процесс Клауса, КЭСМИ Wi!Mi РАЗУМАТОР, миварные технологии

This article presents the development of a mivar expert decision support system for the personnel of a gas processing shop during liquid sulfur extraction. The system is implemented using mivar technologies of logical artificial intelligence and the KESMI platform. An analysis of technological factors affecting the efficiency of liquid sulfur extraction was conducted, key parameters determining production risks and violations were identified, and a forecasting model was developed to support operational and strategic decisions of personnel. The proposed approach allows minimizing risks, increasing productivity and ensuring the stability of the technological process.

Keywords: mivar, mivar networks, mivar expert systems, machine learning, technological process, production, Claus process, KESMI Wi!Mi RAZUMATOR, mivar technologies

Введение

Процесс добычи жидкой серы методом Клауса представляет собой сложную совокупность взаимосвязанных технологических операций, где любые сбои могут оказывать значительное влияние на эффективность и стабильность производственного цикла. Метод Клауса основан на химической переработке серосодержащих газов, требующей точного соблюдения технологических параметров и согласованной работы всех производственных элементов, включая оборудование, персонал и материалы. В этом процессе каждая стадия, от термической до каталитической, играет важную роль, и любое отклонение от нормы может привести к снижению качества продукции, увеличению энергозатрат и дополнительным потерям ресурсов.

Основной вызов в управлении процессом Клауса заключается в необходимости постоянного мониторинга большого количества параметров и своевременного выявления отклонений, которые могут быть вызваны различными факторами: техническими неисправностями, ошибками персонала, изменением характеристик сырья или нарушением технологических режимов. Учитывая высокую сложность и динамику производственного процесса, традиционные методы управления и контроля зачастую не позволяют эффективно реагировать на возникающие помехи и прогнозировать их последствия.

Ключевая идея разработки миварной экспертной системы заключается в создании интеллектуального инструмента, который способен анализировать текущие данные технологического процесса, прогнозировать возможные сбои и предоставлять рекомендации по их предотвращению. Такая система на базе миварных технологий логического искусственного интеллекта может работать с большими объемами информации, включая многопараметрические данные и сложные производственные правила. Это обеспечивает не только автоматизацию анализа, но и качественное улучшение управления процессом, позволяя учитывать множество взаимосвязанных факторов и принимать обоснованные решения в реальном времени.

Миварные технологии [1] логического искусственного интеллекта [2] продолжают активно развиваться и расширять области применения [3], например, в робототехнике предложено создавать системы принятия решений [4] для планирования маршрутов [5] и сложных действий [6] на основе миварных баз знаний [7]. Миварные экспертные системы (МЭС) применяются для подбора лекарственных форм в медицине [8], для создания комплексных систем с распознаванием образов [9] и в других задачах интеллектуальной деятельности [10].

Миварный подход [11] искусственного интеллекта отличается линейной вычислительной сложностью [12] относительно правил «если-то», что позволяет создавать АСУ технологическими процессами [13], распознавать образы [14], применять его в робототехнике [15] для создания автономных групп роботов [16] с миварными системами принятия решений [17], в интеллектуальных системах обеспечения безопасности информации [18], а также для обучающих систем [19] и понимания текста, написанного на естественном языке [20].

Миварный подход отличается возможностью эволюционного развития, что делает его особенно гибким и удобным для применения. В миварных экспертных системах (МЭС) правила можно легко добавлять или изменять, что позволяет адаптировать систему под новые задачи или изменяющиеся условия. Для разработки таких систем используется программное обеспечение «КЭСМИ», которое помогает работать с базами знаний, опираясь на факты и правила.

Миварная технология накопления информации основывается на трех базовых понятиях: «вещь», «свойство» и «отношение». Благодаря этому подходу можно создавать базы данных и правила с динамической структурой, которые легко изменяются и дополняются. Кроме того, миварная технология обработки информации позволяет строить логические выводы с использованием специальной миварной сети, что делает процессы анализа и прогнозирования более точными и быстрыми.

Целью данной работы является создание миварной экспертной системы для поддержки принятия решений персоналом газоперерабатывающего цеха при добыче жидкой серы. Система предназначена для анализа текущего состояния оборудования и технологических параметров, прогнозирования возможных отклонений и генерации рекомендаций по управлению процессом на основе миварных правил.

Научная новизна заключается в формализации технологического процесса Клауса с применением миварной модели в виде двудольных ориентированных графов, отражающих логические зависимости в форме продукционных правил «Если, То». Это позволяет реализовать интеллектуальную поддержку в реальном времени, повысить устойчивость технологического процесса и минимизировать риски производственных нарушений. Таким образом, предлагаемое решение является актуальным и практически значимым для задач автоматизации и интеллектуализации технологического управления.

Постановка задачи. Создание миварной экспертной системы (МЭС) для поддержки принятия решений персоналом газоперерабатывающего цеха при добыче жидкой серы требует формализации предметной области на основе анализа технологического процесса Клауса, идентификации ключевых производственных режимов (нормального, откачки серы и аварийного) и соответствующих им параметров, фиксируемых с помощью датчиков. Для каждого режима необходимо описать цепочки причинно-следственных зависимостей, на основе которых система должна осуществлять логический вывод и предлагать управляющие воздействия. Центральным элементом решения является построение миварной модели предметной области в виде двудольного ориентированного графа, отражающего структуру знаний и правил.

Для реализации МЭС необходимо: разработать миварную базу знаний (МБЗ), содержащую правила типа «если–то»; внедрить модель в программную среду «КЭСМИ», обеспечивающую логический вывод в режиме реального времени; провести настройку и тестирование системы на типовых сценариях функционирования оборудования; предусмотреть возможность расширения и адаптации МЭС под изменяющиеся технологические и организационные условия. Эффективная реализация поставленной задачи требует междисциплинарного подхода, включающего знания в области логического искусственного интеллекта, технологических процессов переработки газа и инженерных систем управления.

Формализованное описание предметной области

Технологический процесс Клауса по получению серы представляет собой многоступенчатый процесс, состоящий из нескольких подсистем, обеспечивающих эффективное преобразование сероводорода из кислого газа в элементарную серу. В процессе используются термические и каталитические реакции, а также системы охлаждения и конденсации для выделения конечного продукта. Диаграмма процесса приведена на рисунке 1.

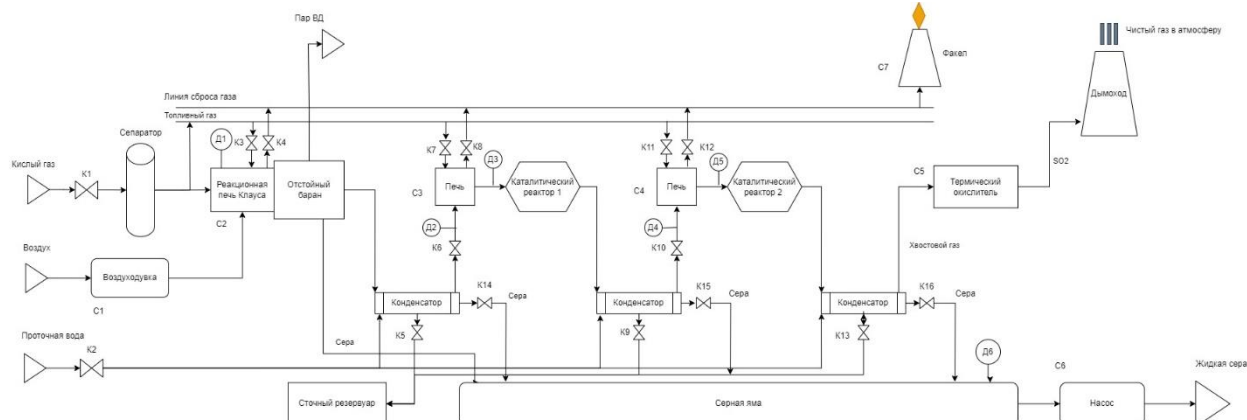


Рисунок 1 – Технологический процесс Клауса

В технологическом процессе установки Клауса экспертная система обеспечивает управление оборудованием на основе анализа входных данных, поступающих от датчиков, и выработки решений по изменению состояния выходных переменных. Работа системы организована с учетом трёх основных режимов: нормальная работа, откачка серы и аварийная ситуация. Каждый из режимов характеризуется специфическими условиями работы оборудования и алгоритмами принятия решений.

Входные данные и их роль:

- Основными источниками информации для экспертной системы являются датчики, такие как Д1, Д2, Д3, Д4 и Д5, которые фиксируют ключевые параметры процесса.
- Д1 измеряет температуру реакционной печи, когда она активна ($C2=1$), и передаёт значение температуры в систему.
- Д2 контролирует давление в газовой линии, если клапан К6 открыт ($K6=1$). Например, при нормальных условиях давления ($PR < 820$ кПа) система не принимает корректирующих действий, но при превышении порогового значения ($PR \geq 820$ кПа) данные датчика становятся основанием для принятия решений.
- Д3 и Д5 фиксируют температуры в нагревательных печах С3 и С4 соответственно, тогда как Д4 отслеживает давление, если клапан К10 открыт ($K10=1$).

Эти данные поступают в экспертную систему, где анализируются в реальном времени для оценки текущего состояния технологического процесса.

Нормальный режим работы. При нормальной работе установки кислый газ поступает через клапан К1 ($K1=1$) при давлении 820 кПа и температуре 40°C. Реакционная печь ($C2=1$) поддерживает температуру 1000–1400°C. Газовая смесь проходит через катализаторы, а насосы и клапаны, такие как С6, К14, и К15, остаются в неактивном состоянии до возникновения необходимости их использования.

Для обеспечения нормального процесса печи подогрева ($C3=1$, $C4=1$) функционируют в штатном режиме, поддерживая температурные значения ниже 300°C ($T1 < 300^\circ\text{C}$) и 150°C ($T2 < 150^\circ\text{C}$). Датчики фиксируют стабильные значения параметров, такие как давление и температура, что позволяет системе поддерживать стандартные технологические режимы.

Режим откачки серы. Когда уровень серы, фиксируемый датчиком Д6, достигает заданного значения ($L=1$), система переходит в режим откачки серы. Насос С6 включается ($C6=1$), обеспечивая транспортировку жидкой серы из отстойного барана и конденсаторов в ёмкость для хранения. Одновременно открываются клапаны К14,

K15 и K16 ($K14=1$, $K15=1$, $K16=1$), чтобы обеспечить эффективный отвод серы из системы.

При этом экспертная система продолжает мониторинг остальных параметров, таких как температура в печах и давление в системе. Например, если температура в реакционной печи превышает 1200°C ($TK \geq 1200^{\circ}\text{C}$), система временно отключает её ($C2=0$) до стабилизации условий. Режим откачки серы позволяет предотвратить её затвердевание, поддерживая температуру жидкой серы на уровне $120\text{--}140^{\circ}\text{C}$ в ёмкостях для хранения.

Аварийная ситуация. В случае аварийных условий, таких как превышение давления ($PR \geq 820$ кПа) или температуры ($T1 \geq 300^{\circ}\text{C}$), система переходит в аварийный режим. В этом режиме включается факел ($C7=1$) для безопасного сжигания сбрасываемого газа. Печи подогрева ($C3$, $C4$) и реакционная печь ($C2$) отключаются ($C3=0$, $C4=0$, $C2=0$) для предотвращения повреждений оборудования.

Например, если датчики Д3 и Д5 фиксируют температуру выше 300°C и 150°C соответственно, клапаны K8 и K12 открываются ($K8=1$, $K12=1$) для сброса нагретого газа. Одновременно закрываются клапаны подачи газа, такие как K6 и K10 ($K6=0$, $K10=0$), чтобы предотвратить избыточное давление в системе. Насос С6 автоматически отключается ($C6=0$), предотвращая возможные перегрузки.

Формализованное описание предметной области в виде правил «Если, То». В рамках разработки миварной экспертной системы для поддержки принятия решений персонала газоперерабатывающего цеха при добыче жидкой серы была сформирована формализованная модель предметной области в виде миварной базы знаний (МБЗ). Основу МБЗ составляют объекты управления (агрегаты установки: печи, насосы, воздухоудовки, факельная система и др.), входные параметры (температура, давление, уровень серы, режимы работы), а также логические зависимости между ними.

Покажем пример разработанных правил принятия решений по этапам.

- C1. Управление нагнетателем воздуха
 1. ЕСЛИ давление в системе достигает или превышает 820 кПа ($PR \geq 820$), ТО отключить нагнетатель воздуха для предотвращения повреждений трубопроводов и компрессоров ($C1 = 0$).
 2. ЕСЛИ зафиксирована аварийная ситуация ($A = 1$), ТО отключить нагнетатель воздуха для предотвращения нагнетания в нестабильную реакционную зону ($C1 = 0$).
 3. ЕСЛИ инициирован регламентный ремонт ($R = 1$), ТО перевести нагнетатель воздуха в нерабочее состояние ($C1 = 0$).
 4. ЕСЛИ датчик температуры в реакторе отключён (D1 отсутствует), ТО отключить нагнетатель как источник неконтролируемой подачи ($C1 = 0$).
 5. ЕСЛИ реакционная печь отключена ($C2 = 0$), ТО отключить нагнетатель воздуха из-за отсутствия необходимости в подаче ($C1 = 0$).
 6. ВО ВСЕХ иных условиях поддерживать активное состояние нагнетателя воздуха ($C1 = 1$).
- C2. Управление реакционной печью Клауса
 1. ЕСЛИ температура в печи превышает 1200°C ($TK \geq 1200$), ТО отключить печь для предотвращения разрушения теплоизоляции ($C2 = 0$).
 2. ЕСЛИ зафиксирована авария ($A = 1$), ТО отключить реактор немедленно ($C2 = 0$).
 3. ЕСЛИ система переведена в режим ремонта ($R = 1$), ТО перевести печь в нерабочее состояние ($C2 = 0$).

4. ЕСЛИ давление на выходе реактора нестабильно более 5 секунд (ΔP нестабильно), ТО отключить реактор ($C2 = 0$).
 5. ЕСЛИ насос серы отключен ($C6 = 0$) и уровень серы достиг критического уровня ($L = 1$), ТО отключить печь для предотвращения переполнения ($C2 = 0$).
 6. ВО ВСЕХ остальных случаях поддерживать рабочее состояние ($C2 = 1$).
- С3. Управление печью подогрева №1
 1. ЕСЛИ температура в печи подогрева превышает 300°C ($T1 \geq 300$), ТО отключить печь во избежание перегрева трубопроводов ($C3 = 0$).
 2. ЕСЛИ авария на предприятии ($A = 1$), ТО отключить печь согласно промышленному протоколу безопасности ($C3 = 0$).
 3. ЕСЛИ идёт регламентное техническое обслуживание ($R = 1$), ТО вывести печь из работы ($C3 = 0$).
 4. ЕСЛИ температура воды на входе в печь ниже технологического минимума ($T_w < T_{\min}$), ТО отключить печь ($C3 = 0$).
 5. В остальных режимах поддерживать нагрев в активном состоянии ($C3 = 1$).
 - С4. Управление печью подогрева №2
 1. ЕСЛИ температура выше 150°C ($T2 \geq 150$), ТО отключить печь для предотвращения перегрева реакционной смеси ($C4 = 0$).
 2. ЕСЛИ аварийный режим ($A = 1$), ТО отключить печь ($C4 = 0$).
 3. ЕСЛИ начат ремонт оборудования ($R = 1$), ТО отключить печь ($C4 = 0$).
 4. ЕСЛИ давление в системе меньше допустимого минимума ($P_R < 650$ кПа), ТО отключить печь ($C4 = 0$).
 5. В остальных режимах эксплуатация осуществляется в активном состоянии ($C4 = 1$).
 - С5. Управление термическим окислителем
 1. ЕСЛИ зафиксирована аварийная ситуация ($A = 1$), ТО отключить окислитель для предотвращения неконтролируемого сгорания ($C5 = 0$).
 2. ЕСЛИ начат плановый ремонт ($R = 1$), ТО отключить окислитель ($C5 = 0$).
 3. ЕСЛИ концентрация сероводорода ниже технологического минимума ($\text{H}_2\text{S} < 5\%$), ТО отключить окислитель как неиспользуемый ($C5 = 0$).
 4. В других условиях поддерживать активное состояние оборудования ($C5 = 1$).
 - С6. Управление серным насосом
 1. ЕСЛИ уровень серы достигает заданного порога ($L = 1$), ТО включить насос ($C6 = 1$).
 2. ЕСЛИ аварийная ситуация ($A = 1$), ТО отключить насос для предотвращения неконтролируемого потока серы ($C6 = 0$).
 3. ЕСЛИ уровень серы ниже минимального ($L = 0$) и давление в резервуаре выше нормы ($P \geq 880$ кПа), ТО отключить насос ($C6 = 0$).
 4. ЕСЛИ одновременно отключены клапаны K14–K16, ТО отключить насос ($C6 = 0$).
 5. В иных условиях насос остаётся неактивным ($C6 = 0$).
 - С7. Управление факельной системой (C7)
 1. ЕСЛИ активирован аварийный режим ($A = 1$), ТО включить факел для утилизации избыточных газов ($C7 = 1$).
 2. ЕСЛИ давление в системе превышает допустимое значение ($P_R \geq 850$ кПа), ТО включить факел ($C7 = 1$).

3. ЕСЛИ отключены ключевые узлы системы (С2, С3, С4 одновременно = 0), ТО включить факел (С7 = 1).
4. В обычном технологическом цикле удерживать факел в неактивном состоянии (С7 = 0).

Тестирование системы. После определения всех правил и состояний система была протестирована в среде «КЭСМИ». На этапе настройки были внесены все заданные правила, где входными параметрами выступали текущие состояния оборудования и датчиков (например, Состояние цеха, значения температуры и давления), а выходными параметрами — состояния клапанов, насосов и других элементов. Для каждого выходного параметра были поставлены галочки, чтобы система могла определить его значение на основе заданных правил.

В режиме нормальной работы (рисунок 2) включается цех, и все системы функционируют в штатном режиме. Датчики Д1, Д3 и Д5 фиксируют нормальные значения температуры и давления, клапаны К1, К3, К7 и К11 находятся в открытом состоянии, а воздухоподогреватель С1 включен (С1=1), обеспечивая подачу воздуха для реакции. Давление в системе контролируется датчиками Д2 и Д4, которые фиксируют его соответствие норме. В это время клапаны К14, К15 и К16 остаются закрытыми (К14=0, К15=0, К16=0), так как уровень серы, регистрируемый датчиком Д6, низкий (L=0). Насос С6 отключен (С6=0), поскольку перекачка жидкой серы не требуется. Газы проходят очистку в системе и выводятся через дымоход без отклонений.

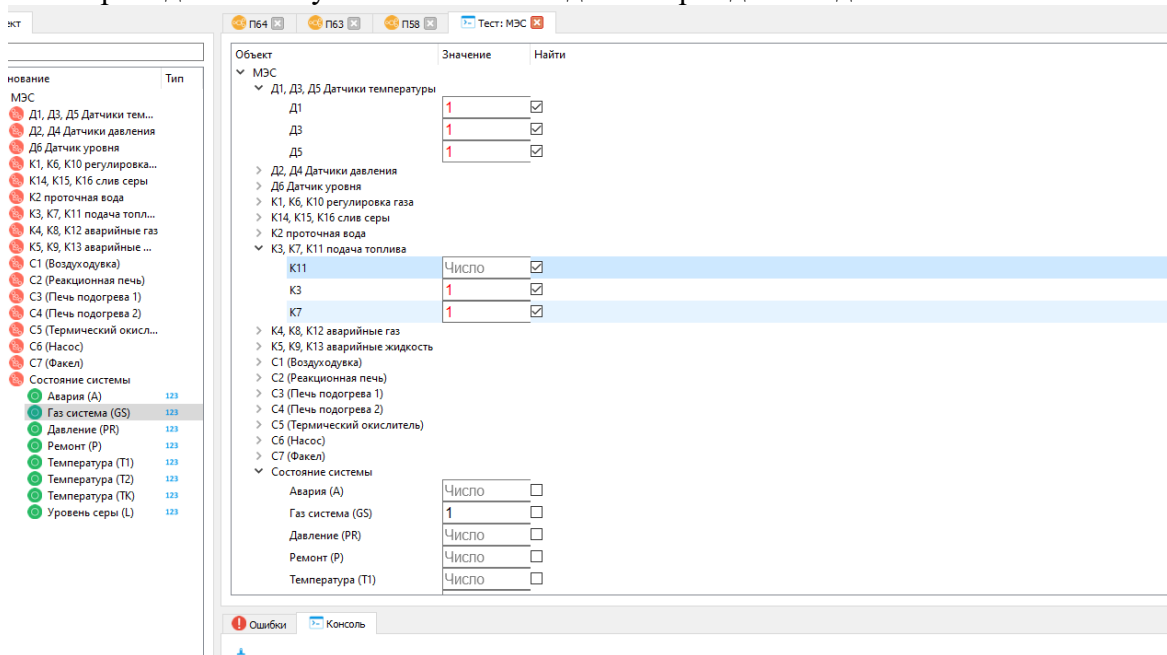


Рисунок 2 – Режим «Нормальной работы»

Граф решения (логического вывода) показан на рисунке 3. В результате получается, что можно увидеть не только требуемый результат, но и ход решения как в текстовом, так и графическом виде с помощью графа решения.

Если цех работает и происходит аварийная ситуация, датчики Д2 и Д4 зафиксировали отклонение давления, Д3 и Д5 показали отклонение температуры, а Д1 остается в норме. Клапаны К1, К2, К14, К15 и К16 закрыты для предотвращения утечек газа и серного конденсата, в то время как клапаны К4, К8 и К12 открыты для аварийного сброса газа. С1 отключена, а факел С7 включен для безопасного сжигания сбрасываемого газа. Эксперимент показан на рисунке 4.

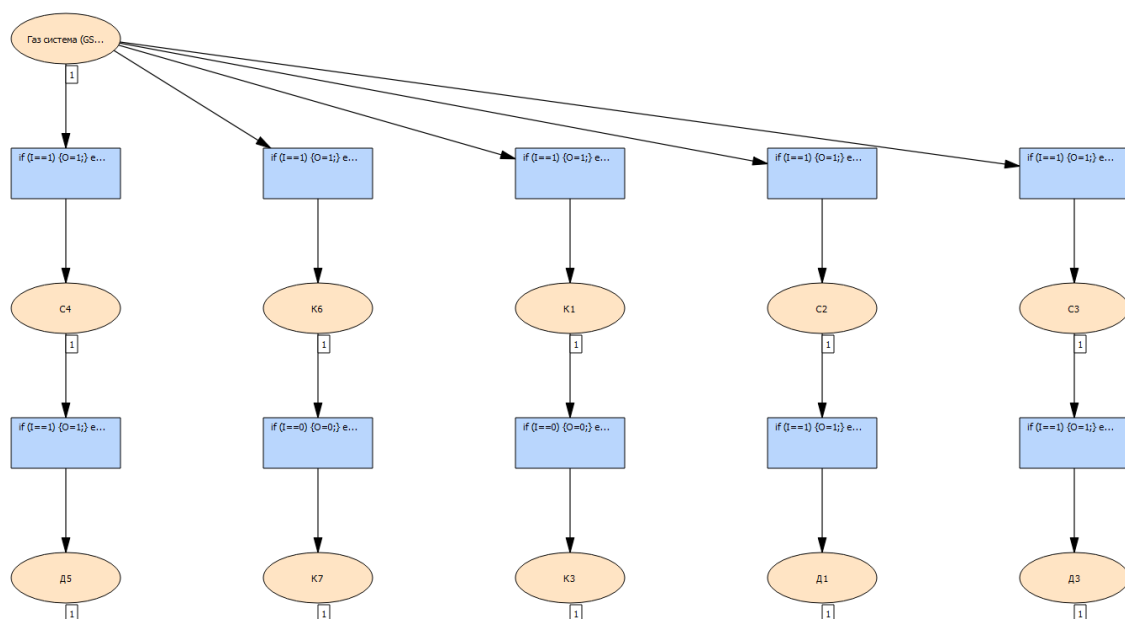


Рисунок 3 - Граф решения для режима «Нормальной работы»

Тест: МЭС

Объект	Значение	Найти
K13	1	☒
K5	1	☒
K9	1	☒
✓ C1 (Воздуходувка)		
C1	0	☒
✓ C2 (Реакционная печь)		
C2	0	☒
✓ C3 (Печь подогрева 1)		
C3	0	☒
✓ C4 (Печь подогрева 2)		
C4	0	☒
✓ C5 (Термический окислитель)		
C5	0	☒
✓ C6 (Насос)		
C6	0	☒
✓ C7 (Факел)		
C7	1	☒
✓ Состояние системы		
Авария (A)	1	☐
Газ система (GS)	Число	☐
Давление (PR)	Число	☐
Ремонт (P)	Число	☐
Температура (T1)	Число	☐
Температура (T2)	Число	☐
Температура (TK)	Число	☐
Уровень серы (L)	Число	☐

Рисунок 4 – Тестирование аварийной ситуации

Во время сбора конденсата K2 открыт, обеспечивая подачу проточной воды для системы. D6 контролирует уровень серного конденсата, показывая достижение необходимого уровня. K5, K9, K14, K15 и K16 открыты, позволяя сливать конденсат из конденсаторов в серную яму. Эксперимент показан на рисунке 5.

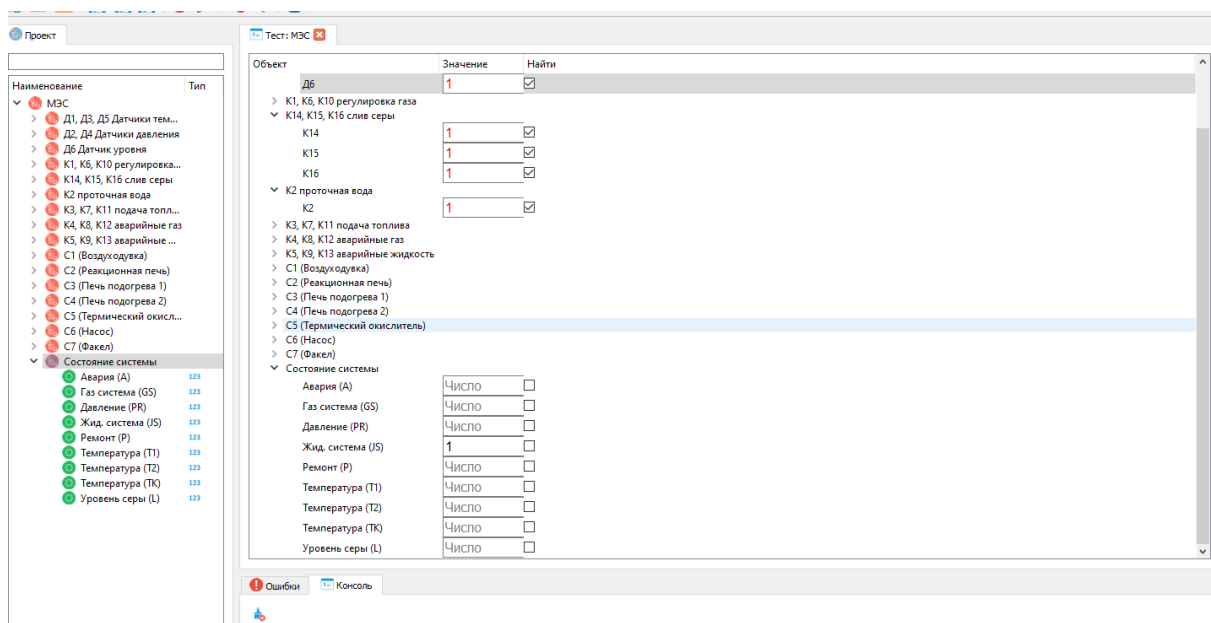


Рисунок 5 – Сбор конденсата

Заключение

Проведённое исследование подтвердило возможность и обоснованность создания миварной экспертной системы (МЭС) для поддержки принятия решений персоналом газоперерабатывающего цеха при добыче жидкой серы. Использование миварных технологий логического искусственного интеллекта позволило формализовать технологический процесс Клауса в виде системы продукционных правил и реализовать его в программной среде КЭСМИ Wi!Mi Разуматор версии 2.1. Это обеспечило автоматизацию обработки информации, прогнозирование нарушений и выдачу рекомендаций в реальном времени.

Миварная модель, построенная в формате двудольного ориентированного графа, охватывает ключевые параметры технологического процесса и отражает взаимосвязи между состояниями оборудования, датчиков и исполнительных механизмов. Тестирование системы в различных производственных режимах — от нормального функционирования до аварийных ситуаций — показало высокую точность логического вывода и гибкость миварной архитектуры.

Особенностью предложенного решения является гибкость структуры знаний: правила системы могут дополняться и редактироваться без потери целостности модели. Это делает её пригодной для эволюционного развития и масштабирования. Перспективными направлениями дальнейшей работы являются расширение модуля прогнозирования, интеграция с другими подсистемами управления и наращивание базы знаний на основе реальных производственных данных. Созданная система может стать основой для внедрения интеллектуальных помощников в критически важных объектах промышленной инфраструктуры.

Список литературы

1. Варламов О.О. Эволюционные базы данных и знаний для адаптивного синтеза интеллектуальных систем. *Миварное информационное пространство*. М.: «Радио и связь», 2002. 286 с. EDN RWTCOP.

2. Коценко А.А., Горячкин Б.С., Базанова А.Г. и др. Модель описания миварных сетей в формате двудольных и трехдольных ориентированных графов для принятия решений и обработки информации в машиностроительном ИИ. *Динамика сложных систем - XXI век*. 2024. Т. 18, № 1. С. 5-17. DOI 10.18127/j19997493-202401-01. EDN XWYTYR.
3. Варламов О.О. Большие знания: расширение областей применения миварных технологий логического ИИ. *МИВАР'23. Сборник статей*. Москва, 2023. С. 591-597. EDN: DDTLFQ.
4. *Миварные системы принятия решений роботов*. Роборазум : монография / О.О. Варламов, А.А. Коценко, Д.В. Аладин, А.А. Желтова, А.В. Марущенко. М.: ИНФРА-М, 2024. 549 с. ISBN 978-5-16-020037-8.
5. Коценко А.А., Козырев С.А., Тодуа Д.Г. и др. Исследование применения миварных технологий для планирования маршрутов робототехнических комплексов в трехмерном логическом пространстве. *Естественные и технические науки*. 2024. № 2(189). С. 190-196. DOI 10.25633/ETN.2024.02.12. EDN JAFWVA.
6. Varlamov O., Aladin D. A New Generation of Rules-based Approach: Mivar-based Intelligent Planning of Robot Actions (MIPRA) and Brains for Autonomous Robots. *Mach. Intell. Res.* 2024. DOI: 10.1007/s11633-023-1473-1 EDN: TSPUOP.
7. Варламов О.О. Подготовка исходных данных для миварных БЗ СПР роботов. *МИВАР'23. Сборник статей*. Москва, 2023. С. 545-551. EDN: FHLZBJ.
8. Честнова Е.А., Федосеева Е.Ю., Ваганов Д.Д. и др. Разработка базы знаний МЭС по подбору лекарственных форм для антибиотиков и антимикотиков. *Естественные и технические науки*. 2023. № 5(180). С. 29-33. DOI 10.25633/ETN.2023.05.01. EDN WOZCUJ.
9. Желтова А.А. Комплексный ИИ: анализ распознавания знаков на фотографиях. *МИВАР'23. Сборник статей*. Москва, 2023. С. 412-417. EDN: YUHADL.
10. Максимов Н.В. Большие знания: модели и средства представления, поиска и обработки знаний в задачах интеллектуальной деятельности. *МИВАР'23. Сборник статей*. Москва, 2023. С. 579-590. EDN: HAWGBH.
11. Варламов О.О. Обзор 25 лет развития миварного подхода к разработке интеллектуальных систем и созданию искусственного интеллекта. *Труды Научно-исследовательского института радио*. 2011. № 1. С. 34-44. EDN: NTMHXF.
12. Варламов О.О. О создании информационных технологий для математического моделирования на основе «многомерной открытой гносеологической активной сети» MOGAN. *Информация и образование: границы коммуникаций INFO'20. сборник научных трудов № 12 (20)*. Горно-Алтайск, 2020. С. 134-135. EDN: FOCICJ.
13. Санду Р.А. и др. Миварные автоматизированные системы управления технологическими процессами для нефтяной промышленности России. *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. 2011. № 11. С. 37-40. EDN: OJOUVV.
14. Максимова А.Ю. Миварная экспертная система для распознавания образов на основе нечеткой классификации и моделирования различных предметных областей с автоматизированным расширением контекста. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2011. № 12 (125). С. 77-87. EDN: OKIPCF.
15. Давыдова Т.Л., Варламов О.О., Остроух А.В., Краснянский М.Н. Анализ возможностей миварного подхода для систем искусственного интеллекта и современной робототехники. *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2011. Т. 17. № 3. С. 687-694. EDN: OEYUOD.
16. Чувилов Д.А. и др. О создании автономных групп роботов на основе миварной системы принятия решений. *Информация и образование: границы коммуникаций*. 2022. № 14 (22). С. 217-220. EDN: XZQSGF.
17. Чувилов Д.А., Аладин Д.В. Автономные группы роботов с миварными системами принятия решений. *МИВАР'22*. Москва, 2022. С. 356-362. EDN: VLVNDE.
18. Варламов О.О. О системном подходе к созданию модели компьютерных угроз и ее роли в обеспечении безопасности информации в ключевых системах информационной инфраструктуры. *Известия ТРТУ*. 2006. № 7 (62). С. 216-223. EDN: KVHUEH.
19. Подкосова Я.Г., Васюгова С.А. Использование технологий виртуальной реальности для трехмерной визуализации результатов моделирования и для миварных обучающих систем. *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2011. № 1-1 (39). С. 226-232. EDN: NECGTZ.

20. Протопопова Д.А. Использование миварного подхода для понимания текста, написанного на естественном языке. *Автоматизация и управление в технических системах*. 2015. № 4-1 (16). С. 10. EDN: YUTKEQ.
21. Терехов В.И., Горячкин Б.С. Развитие актуальных научных направлений как продолжение научных школ кафедры «Системы обработки информации и управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана. *Динамика сложных систем – XXI век*. 2023. Т. 17, № 3. С. 25-33. DOI 10.18127/j19997493-202303-04. EDN CLLMCH.
22. Горячкин Б.С., Байбарин Р.Г., Тюлькина Н.В., Запруднов М.С. Эргономический анализ представлений миварной модели. *Естественные и технические науки*. 2022. № 4(167). С. 162-174. EDN MYQLZN.
23. Андреев А.В., Крайчиков О.Д., Карпов Д.К. и др. БЗ МЭС по подбору фильмов. *Мивар'22: Сборник научных статей*. Москва: Инфра-М, 2022. С. 115-122. EDN MLVVUM.
24. Бондаренко И.Г., Гришин С.В., Стрихар П.А. и др. МЭС подбора оптимального персонажа в игровом проекте DOTA 2. *Мивар'23*. Москва: Инфра-М, 2023. С. 27-32. EDN VIUHEB.
25. Богомолов Д.Н., Умряев Д.Т., Кротов Ю.Н. и др. МЭС для автоматизации решения заявок в службе технической поддержки. *Мивар'22*. Москва: Инфра-М, 2022. С. 20-28. EDN VEFYUJ.
26. Коценко А.А. Разработка методики автоматической генерации миварных баз знаний трехмерного логического пространства. *Информация и образование: границы коммуникаций*. 2023. № 15(23). С. 304-308. DOI 10.59131/2411-9814_2023_15(23)_304. EDN MLGYNM.
27. Гаврилюк А.Г., Хотин П.Ю., Черната Н.С. и др. БЗ МЭС подбора ноутбуков. *Мивар'22: Сборник научных статей*. Москва: Инфра-М, 2022. С. 129-136. EDN FZKYHL.
28. Воронцова А.В., Вережкина Д.В., Ванина П.В. и др. МЭС для распределения рабочих задач между сотрудниками. *Мивар'23*. Москва: ИНФРА-М, 2023. С. 63-73. EDN ZOOLHR.
29. Шевцова Ю.Б., Замула А.И., Мышенков К.С. и др. ГИИС оценки человека по фотографии и выдачи рекомендаций по питанию. *Мивар'22*. Москва: Инфра-М, 2022. С. 309-314. EDN JJGWRP.
30. Дятленко Е.А., Евдокимов А.А., Никольский Д.Р. и др. МЭС для распознавания объектов интерьера. *Мивар'23*. Москва: ИНФРА-М, 2023. С. 87-95. EDN SJMPZG.

References

1. Varlamov O. O. Evolutionary databases and knowledge bases for adaptive synthesis of intelligent systems. *Mivar information space*. Moscow: "Radio and communication", 2002. 286 p. EDN RWTCOP.
2. Kotsenko A. A., Goryachkin B. S., Bazanova A. G., et al. A model for describing mivar networks in the format of bipartite and tripartite directed graphs for decision-making and information processing in mechanical engineering AI // *Dynamics of complex systems - the XXI century*. 2024. Vol. 18, No. 1. Pp. 5-17. DOI 10.18127/j19997493-202401-01. EDN XWYUYP.
3. Varlamov O. O. Big knowledge: expanding the areas of application of mivar technologies of logical AI // *MIVAR'23. Collection of articles*. Moscow, 2023. Pp. 591-597. EDN: DDTLFQ.
4. *Mivar decision-making systems for robots. Roborazme: monograph* / O. O. Varlamov, A. A. Kotsenko, D. V. Aladin, A. A. Zheltova, A. V. Marushchenko. Moscow: INFRA-M, 2024. 549 p. ISBN 978-5-16-020037-8.
5. Kotsenko A. A., Kozyrev S. A., Todua D. G. et al. Study of the application of mivar technologies for route planning of robotic complexes in three-dimensional logical space // *Natural and technical sciences*. 2024. No. 2 (189). Pp. DOI 10.25633/ETN.2024.02.12. EDN JAFWVA.
6. Varlamov O., Aladin D. A New Generation of Rules-based Approach: Mivar-based Intelligent Planning of Robot Actions (MIPRA) and Brains for Autonomous Robots. *Mach. Intell. Res.* 2024. DOI: 10.1007/s11633-023-1473-1 EDN: TSPUOP.
7. Varlamov O.O. Preparation of initial data for mivar KB of robotic control systems // *MIVAR'23. Collection of articles*. Moscow, 2023. P. 545-551. EDN: FHLZBJ.
8. Chestnova E.A., Fedoseeva E.Yu., Vaganov D.D. and others. Development of a knowledge base of the MES for the selection of dosage forms for antibiotics and antimycotics // *Natural and technical sciences*. 2023. No. 5 (180). P. 29-33. DOI 10.25633 / ETN.2023.05.01. EDN WOZCUJ.
9. Zheltova A.A. Complex AI: analysis of sign recognition in photographs // *MIVAR'23. Collection of articles*. Moscow, 2023. P. 412-417. EDN: YUHADL.
10. Maksimov N.V. Big knowledge: models and means of representation, search and processing of knowledge in problems of intellectual activity // *MIVAR'23. Collection of articles*. Moscow, 2023. P. 579-590. EDN: HAWGBH.

11. Varlamov O.O. A Review of 25 Years of the Development of the Mivar Approach to the Development of Intelligent Systems and the Creation of Artificial Intelligence // Proceedings of the Radio Research Institute. 2011. No. 1. Pp. 34-44. EDN: NTMHXF.
12. Varlamov O.O. On the Creation of Information Technologies for Mathematical Modeling Based on the "Multidimensional Open Epistemological Active Network" MOGAN // Information and Education: The Boundaries of Communications INFO'20. Collection of Scientific Papers No. 12 (20). Gorno-Altaysk, 2020. Pp. 134-135. EDN: FOCICJ.
13. Sandu R.A. et al. Mivar Automated Process Control Systems for the Russian Oil Industry // Automation, Telemechanization and Communication in the Oil Industry. 2011. No. 11. Pp. 37-40. EDN: OJOUVV.
14. Maksimova A.Yu. Mivar expert system for pattern recognition based on fuzzy classification and modeling of various subject areas with automated context expansion // Bulletin of SFedU. Technical sciences. 2011. No. 12 (125). P. 77-87. EDN: OKIPCF.
15. Davydova T.L., Varlamov O.O., Ostroukh A.V., Krasnyansky M.N. Analysis of the capabilities of the mivar approach for artificial intelligence systems and modern robotics // Bulletin of Tambov State Technical University. 2011. Vol. 17. No. 3. P. 687-694. EDN: OEYUOD.
16. Chuvikov D.A. et al. On the creation of autonomous groups of robots based on a mivar decision-making system // Information and education: boundaries of communications. 2022. No. 14 (22). P. 217-220. EDN: XZQSGF.
17. Chuvikov D.A., Aladin D.V. Autonomous groups of robots with mivar decision-making systems // In the collection: MIVAR'22. Moscow, 2022. P. 356-362. EDN: VLVNDE.
18. Varlamov O.O. On a systems approach to creating a computer threat model and its role in ensuring information security in key information infrastructure systems // Bulletin of TRTU. 2006. No. 7 (62). P. 216-223. EDN: KVHUEH.
19. Podkosova Ya.G., Vasyugova S.A. Using virtual reality technologies for three-dimensional visualization of modeling results and for mivar training systems // Bulletin of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2011. No. 1-1 (39). P. 226-232. EDN: NECGTZ. 20. Protopopova D.A. Using the mivar approach to understand text written in natural language // Automation and control in technical systems. 2015. No. 4-1 (16). P. 10. EDN: YUTKEQ.
20. Protopopova D.A. Using the mivar approach to understand text written in natural language // Automation and control in technical systems. 2015. No. 4-1 (16). P. 10. EDN: YUTKEQ.
21. Terekhov V.I., Goryachkin B.S. Development of relevant scientific directions as a continuation of scientific schools of the Department of Information Processing and Control Systems of Bauman Moscow State Technical University // Dynamics of complex systems - XXI century. 2023. Vol. 17, No. 3. P. 25-33. DOI 10.18127/j19997493-202303-04. EDN CLLMCH.
22. Goryachkin B.S., Baibarin R.G., Tyulkina N.V., Zaprudnov M.S. Ergonomic analysis of the representations of the mivar model // Natural and technical sciences. 2022. No. 4(167). pp. 162-174. EDN MYQLZN.
23. Andreev A.V., Kraichikov O.D., Karpov D.K. and others. MES knowledge base on film selection // Mivar'22: Collection of scientific articles. Moscow: Infra-M, 2022. pp. 115-122. EDN MLVVUM.
24. Bondarenko I.G., Grishin S.V., Strikhar P.A. and others. MES for selecting the optimal character in the DOTA 2 game project // Mivar'23. Moscow: Infra-M, 2023. pp. 27-32. EDN VIUHEB.
25. Bogomolov D.N., Umryaev D.T., Krotov Yu.N., et al. MES for automation of request resolution in technical support service // Mivar'22. Moscow: Infra-M, 2022. Pp. 20-28. EDN VEFYTJ.
26. Kotsenko A.A. Development of methodology for automatic generation of mivar knowledge bases of three-dimensional logical space // Information and education: boundaries of communications. 2023. No. 15(23). Pp. 304-308. DOI 10.59131/2411-9814_2023_15(23)_304. EDN MLGYNM.
27. Gavriilyuk A.G., Khotin P.Yu., Chernata N.S., et al. MES knowledge base for laptop selection // Mivar'22: Collection of scientific articles. Moscow: Infra-M, 2022. pp. 129-136. EDN FZKYHL.
28. Vorontsova AV, Verevkina DV, Vanina PV, et al. MES for distributing work tasks among employees // Mivar'23. Moscow: INFRA-M, 2023. pp. 63-73. EDN ZOOLHR.
29. Shevtsova YuB, Zamula AI, Myshenkov KS, et al. GIIS for assessing a person from a photograph and issuing nutrition recommendations // Mivar'22. Moscow: Infra-M, 2022. pp. 309-314. EDN JIGWRP.
30. Dyatlenko EA, Evdokimov AA, Nikolsky DR, et al. MES for recognizing interior objects // Mivar'23. Moscow: INFRA-M, 2023. P. 87-95. EDN SJMPZG.

RESUME

Smirnov K.S., Varlamov O.O.

MES for decision support of gas processing plant personnel during liquid sulfur extraction

In recent years, approaches to creating intelligent control systems for complex production processes have been actively studied. In this paper, the possibility of using mivar technologies of logical artificial intelligence to support decision-making at a critically important chemical industry facility — a liquid sulfur production unit using the Claus method — is substantiated for the first time. The main result of the study was the creation of a mivar expert system (MES) implementing a formalized mechanism for analyzing process parameters, identifying anomalies, and generating recommendations for controlling the unit in various operating modes.

The study showed that the use of mivar models to support operational and emergency control of process systems based on logical rules of the "if-then" type is an appropriate and promising direction. This allows increasing the stability and safety of processes, minimizing the risks of accidents, and improving the operating efficiency of process equipment.

As part of the project, a system analysis of the subject area of sulfur-containing gas processing was carried out, a formalized description of thermal and catalytic processing processes was developed in the form of a mivar knowledge base, including more than 50 logical rules. The model is implemented in the KESMI Wi!Mi Razumator version 2.1 environment, which ensures automatic logical inference in real time. Particular attention is paid to processing signals from sensors, controlling actuators and selecting control actions depending on the current state of the system.

Testing on typical scenarios - including normal, emergency and sulfur pumping mode - confirmed the correctness of the model, the stability of the logical inference and its readiness for practical application. The flexibility of the mivar architecture allows for the development of the system: new rules can be added without violating the existing logic, which makes the MES suitable for evolutionary growth and integration into broader intelligent automation platforms.

Thus, the developed mivar expert system demonstrates the practical applicability of mivar technologies in the tasks of intelligent control of hazardous production facilities and can serve as a basis for creating new generations of smart production systems in the chemical industry.

РЕЗЮМЕ

Смирнов К.С., Варламов О.О.

МЭС для поддержки принятия решений персонала газоперерабатывающего цеха при добыче жидкой серы

В последние годы активно исследуются подходы к созданию интеллектуальных систем управления сложными производственными процессами. В настоящей работе впервые обоснована возможность применения миварных технологий логического искусственного интеллекта для поддержки принятия решений на критически важном объекте химической промышленности — установке получения жидкой серы методом Клауса. Основным результатом исследования стало создание миварной экспертной системы (МЭС), реализующей формализованный механизм анализа параметров технологического процесса, выявления аномалий и генерации рекомендаций по управлению установкой в различных режимах работы.

Выполненное исследование показало, что применение миварных моделей для поддержки оперативного и аварийного управления технологическими системами на основе логических правил типа «если–то» является целесообразным и перспективным направлением. Это позволяет повысить устойчивость и безопасность процессов, минимизировать риски аварий и улучшить эффективность эксплуатации технологического оборудования.

В рамках проекта был проведён системный анализ предметной области переработки серосодержащих газов, разработано формализованное описание процессов термической и каталитической переработки в виде миварной базы знаний, включающей более 50 логических правил. Модель реализована в среде КЭСМИ WiMi Разуматор версии 2.1, что позволило обеспечить автоматический логический вывод в реальном времени. Особое внимание уделено обработке сигналов от датчиков, управлению исполнительными механизмами и выбору управляющих воздействий в зависимости от текущего состояния системы.

Проведённое тестирование на типовых сценариях — включая нормальный, аварийный и режим откачки серы — подтвердило корректность модели, устойчивость логического вывода и её готовность к практическому применению. Гибкость миварной архитектуры позволяет развивать систему: новые правила могут добавляться без нарушения уже существующей логики, что делает МЭС пригодной для эволюционного роста и интеграции в более широкие интеллектуальные платформы автоматизации.

Таким образом, разработанная миварная экспертная система демонстрирует практическую применимость миварных технологий в задачах интеллектуального управления опасными производственными объектами и может служить основой для создания новых поколений умных производственных систем в химической промышленности.

Смирнов Кирилл Сергеевич, магистр, Институт искусственного интеллекта РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия, kk_smirnov@mail.ru

Область научных интересов: искусственный интеллект, миварные технологии логического искусственного интеллекта, умные производственные системы, обработка информации, кибернетика

Варламов Олег Олегович, доктор технических наук, профессор, ovar@narod.ru,
1) главный научный сотрудник АО «НИИ «Вычислительных комплексов»»,
2) профессор базовой кафедры № 254 Вычислительных комплексов Института искусственного интеллекта РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия

3) профессор кафедры Систем обработки информации и управления МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

Область научных интересов: искусственный интеллект, экспертные системы, логика, миварные технологии логического искусственного интеллекта, обработка информации, принятие решений, распознавание образов, кибернетика, автономные робототехнические комплексы

Статья поступила в редакцию 16.05.2025.