УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе и инновационной деятельности
ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет»,
кандидат экономических наук, доцент
_____ Д.В. Ганин
«31» августа 2026 г.
М.П.

ОТЗЫВ

ведущей организации, государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», о диссертации Горева Сергея Владимировича на тему «Модели и алгоритмы интеллектуального управления многослойной криогенной системой», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» (технические науки)

Актуальность темы диссертации

Сохранность сжиженных технических газов при их перевозке относится к числу практически значимых задач целого ряда отраслей (энергетика, химическая промышленность, медицина, высокотехнологичное машиностроение), в которых жидкий гелий и жидкий азот выступают незаменимыми технологическими средами. Многослойная криогенная система, предназначенная для транспортировки сжиженных газов при температурах вблизи абсолютного нуля, конструктивно объединяет внутренний резервуар с жидким гелием, промежуточный экранирующий слой жидкого азота и вакуумную изоляцию. Основную теплозащитную нагрузку несет азотный экран, при утрате которым защитных свойств теплоприток к гелиевому контуру возрастает на два порядка, что приводит к интенсивному испарению дорогостоящего продукта и прямым эксплуатационным потерям владельца криогенного парка. Поэтому своевременное определение необходимости долива жидкого азота становится центральной задачей оперативного управления такой системой при транспортировке.

Особенность рассматриваемой задачи состоит в том, что управление возложено на бортовой контроллер на базе микропроцессора STM32, размещенный на раме контейнера-цистерны и работающий автономно при жестких ресурсных ограничениях, к которым относятся доступная память 256 КБ, предельное время обработки данных 50 мс и отсутствие постоянной диспетчерской связи на маршруте. Эти ограничения исключают применение ресурсоемких методов машинного обучения и облачных вычислений и

переносят всю обработку информации на встраиваемую платформу. До настоящего времени необходимость долива определяется экспертно. Показания приборов оцениваются визуально с последующей дистанционной проверкой диспетчером, совместная динамика параметров сред не анализируется, и решения принимаются без расчетного подкрепления.

При названных ограничениях разработка моделей и алгоритмов классификации состояний многослойной криогенной системы при существенном дисбалансе классов и асимметрии последствий ошибок, реализуемых в пределах ресурсов встраиваемого контроллера, представляет собой самостоятельную научную задачу обработки информации, решение которой имеет непосредственное отраслевое и народнохозяйственное значение, охватывающее снижение потерь криоагента и повышение безопасности и ритмичности транспортной логистики. Тема диссертации отвечает современным направлениям развития интеллектуальных систем управления техническими объектами и является своевременной.

Общая характеристика содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 126 наименований. Работа изложена на 165 страницах основного текста, содержит 35 рисунков, 26 таблиц и одно приложение. Структура работы традиционна и логически подчинена последовательному решению поставленных задач.

Введение содержит обоснование актуальности работы, формулировку цели и задач исследования, определение объекта и предмета, характеристику методов исследования, изложение сущности научной новизны, а также положений, выносимых на защиту. Целью работы служит повышение качества и оперативности обработки информации при интеллектуальном управлении многослойной криогенной системой за счет разработки моделей и алгоритмов на базе многокритериальной оптимизации с ограничениями. Объектом исследования выступает система управления многослойной криогенной системой, а предметом служит технологический процесс обработки информации в этой системе.

В первой главе выполнен анализ существующих методов и алгоритмов обработки данных в системах управления криогенными объектами. Система управления многослойной криогенной системой формализована автором как информационная система с выделением функциональных блоков сбора, обработки, представления данных и принятия решения. Охарактеризована сенсорная подсистема арматурного узла контейнера, формирующая вектор из пяти исходных измерений (уровень и давление гелия, уровень и давление азота, статус контейнера) с указанием типов датчиков, диапазонов и погрешностей измерительных каналов. На основе анализа существующих подходов и условий эксплуатации обоснованы требования к методам решения задачи, включающие устойчивость к шуму датчиков, работоспособность на малых выборках при выраженном дисбалансе классов, совместимость с ресурсами бортового контроллера, интерпретируемость

рекомендаций для оператора и учет асимметрии последствий ошибок. Показано, что совокупность этих требований исключает как прямое аналитическое моделирование, так и глубокое машинное обучение.

Во второй главе дана физико-математическая постановка задачи обработки информации в системе управления многослойной криогенной системой. Проанализирована применимость детерминированного описания теплопереноса на основе численного решения уравнения теплопроводности; установлены три принципиальных ограничения такого подхода, а именно стохастичность теплофизических свойств изоляции в условиях транспортировки, неконтролируемость граничных условий и некорректность по Адамару обратной задачи восстановления параметров изоляции по показаниям датчиков. Проверка упрощенной конечно-разностной схемы на контроллере STM32 показала ее непригодность для бортовой платформы, поскольку одна итерация требует более 2 секунд при допустимых 50 мс, а объем кода и данных достигает 180 КБ. Обоснован переход к информационному подходу на основе статистического обучения; задача классификации состояний формализована с введением вектора физико-технических ограничений встраиваемой системы и поставлена как задача многокритериальной оптимизации с ограничениями. Введена асимметричная функция потерь, отражающая различие последствий ошибок первого и второго рода, из которой формально выведено требование к полноте обнаружения критических состояний. Выполнен отбор допустимых классов решающих моделей, совместимых с ресурсными ограничениями, и обоснован период опроса датчиков исходя из скорости изменения контролируемых параметров.

В третьей главе разработаны модели и алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия решений. Алгоритм формирования признакового пространства построен как трехэтапная процедура, которая объединяет формализованную предобработку данных, конструирование производных признаков по физическим зависимостям между параметрами сред (пороговый индикатор критического уровня азота и интегральные параметры контуров, характеризующие запас энергии среды) и количественную валидацию вклада сконструированных признаков через аддитивную декомпозицию решений модели. Оператор преобразования отображает исходное пятимерное пространство измерений в расширенное восьмимерное. Разработан алгоритм интеллектуальной поддержки принятия решений, объединяющий модель классификации на расширенном признаковом пространстве, оптимизированную с учетом дисбаланса классов и асимметрии последствий ошибок, с алгоритмом представления результата, который передает оператору классифицированное состояние вместе с перечнем определивших его факторов. Построена функциональная модель системы поддержки принятия решений, описывающая технологический процесс обработки информации в штатном режиме и в режиме адаптации; она реализована в многоуровневой архитектуре развертывания, включающей датчики, бортовой контроллер, защищенный канал связи и планшет

оператора, и дополнена процедурой обновления модели по накопленным эксплуатационным данным с двухкритериальной проверкой перед ее заменой на контроллере.

В четвертой главе выполнены экспериментальная оценка и проверка построенных моделей и алгоритмов на промышленных данных парка из 12 криогенных контейнеров-цистерн. Выполнен расчет вычислительных ресурсов, подтвердивший размещение решающей модели и полного цикла обработки в пределах памяти и времени бортового контроллера. Проведено сопоставление качества классификации на исходном и расширенном признаковых пространствах, а также сравнение разработанной интеллектуальной системы с существующим ручным контролем по совокупности эксплуатационных показателей. Отдельно оценена работоспособность механизма адаптации в ходе промышленной эксплуатации. Разработанные алгоритмы реализованы в двух программных продуктах, зарегистрированных в установленном порядке.
Изложение материала последовательно, выводы по главам согласованы с постановкой задач.

Научная новизна результатов диссертации

Совокупность полученных в работе результатов обладает научной новизной, существенной для теории и практики обработки информации в системах управления техническими объектами. Ведущая организация относит к наиболее значимым новым результатам следующие.

1. Алгоритм формирования признакового пространства, служащий для классификации состояний многослойной криогенной системы в пределах вычислительных ресурсов встраиваемого контроллера и отличающийся тем, что включает оператор, который по физическим зависимостям между параметрами контролируемых сред достраивает исходный n-мерный вектор сенсорных измерений до расширенного M-мерного описания (M больше n), а также предусматривает численную оценку вклада производных признаков средствами аддитивной декомпозиции решений модели.

2. Алгоритм интеллектуальной поддержки принятия решений для управления многослойной криогенной системой, отличающийся тем, что соединяет классификатор состояний, обученный на расширенном наборе признаков и настроенный с учетом неравнозначности последствий ошибок и дисбаланса классов, с представлением результата классификации в форме декомпозиции вклада отдельных признаков в решение, что переводит рекомендацию из непрозрачного отклика модели в проверяемую оператором информационную основу управленческого решения.

3. Функциональная модель системы поддержки принятия решений для управления многослойной криогенной системой, отличающаяся тем, что закладывает супервизорную организацию обработки информации, при которой решающее правило периодически адаптируется по накопленным эксплуатационным данным, а перед обновлением модели выполняется

двухкритериальная проверка, построенная с учетом неравнозначности последствий ошибок первого и второго рода.

Особой научной заслугой автора является строгая формализация задачи классификации состояний многослойной криогенной системы как задачи многокритериальной оптимизации с ограничениями, где введен вектор физико-технических и вычислительных ограничений Ψ, что обеспечивает верифицируемость решения на этапе проектирования встраиваемых систем.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации, обеспечены корректностью постановки задачи, обоснованным выбором методов исследования и многоступенчатой экспериментальной проверкой полученных результатов. Задача классификации состояний формализована как задача многокритериальной оптимизации с ограничениями; при обработке данных применены обоснованные методы статистического анализа.

Действенность разработанного алгоритма формирования признакового пространства подтверждена количественно, так как применение оператора преобразования признаков обеспечило повышение F1-меры классификации состояний с $0{,}653 \pm 0{,}087$ в исходном пространстве до $0{,}925 \pm 0{,}021$ в расширенном при неизменном составе исходных измерений. Качество классификации оценено методом стратифицированной пятикратной кросс-валидации; коэффициент вариации оценки составил 2,3 %, что соответствует зоне высокой устойчивости, а значимость различий между моделями подтверждена критерием Уилкоксона для связанных выборок. Обоснованность выбранных конструкций производных признаков подтверждена аддитивной декомпозицией решений модели, в которой ведущий вклад в решения вносят интегральные параметры азотного и гелиевого контуров, что согласуется с физикой процесса, так как критическое обеднение азотного экрана по времени опережает начало потерь гелия.

Отсутствие переобучения подтверждено верификацией на независимой выборке наблюдений, собранных после завершения этапов обучения и настройки и не участвовавших в них. Работоспособность системы и механизма адаптации подтверждена в условиях промышленной эксплуатации в течение 18 месяцев. За четыре цикла адаптации полнота обнаружения критических состояний не опускалась ниже 0,952, ни одно критическое событие не было пропущено. Достоверность результатов подкреплена также апробацией на научно-практических конференциях и публикацией основных положений в рецензируемых научных изданиях. Соотнесение положений, выносимых на защиту, с паспортом научной специальности 2.3.1 показывает их принадлежность пунктам 4, 9 и 10. К пункту 4 относится алгоритм формирования признакового пространства, к пункту 9 относится функциональная модель системы поддержки принятия решений, а к пункту 10 относится алгоритм интеллектуальной поддержки принятия решений.

Значимость полученных результатов для науки и практики

В теоретическом плане работа развивает подходы к формированию признакового пространства для задач классификации в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Предложенный способ построения производных признаков по физическим зависимостям между параметрами контролируемых сред расширяет инструментарий обработки информации для встраиваемых систем управления и позволяет удержать физическую содержательность модели, минуя прямое численное интегрирование задачи теплопереноса. Формализация задачи классификации с явным включением вектора ресурсных ограничений и функциональная модель с замкнутым контуром адаптации представляют собой методический результат, применимый при построении аналогичных систем для других технических объектов с ограниченными вычислительными ресурсами, в том числе в химической промышленности, энергетике и на транспорте.

Практическая значимость работы определяется внедрением разработанных моделей и алгоритмов в практику управления парком криогенных контейнеров. Алгоритмы реализованы в двух программных продуктах, на которые получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2025614055 и № 2025684788. Внедрение обеспечило повышение F1-меры классификации состояний с 0,46 при ручном контроле до 0,89, сокращение среднего времени реакции оператора с 204 до 2,3 минуты и снижение доли ложных срабатываний с 4,9 % до 0,6 %, то есть в 8,2 раза. Эти показатели подтверждены актами внедрения на промышленных предприятиях, среди которых ООО «ИнфраПро» (г. Москва), АО «Инвест-Альянс» (г. Москва) и АО «Ивхимпром» (г. Иваново). Материалы диссертации включены в учебный процесс ФГБОУ ВО «ИГХТУ». Приведенный показатель качества 0,89 получен в условиях промышленной эксплуатации на полном парке контейнеров и характеризует работу системы в реальной среде, тогда как оценка 0,925 из раздела о достоверности отражает сравнение исходного и расширенного признаковых пространств при кросс-валидации. Народнохозяйственный эффект внедрения выражается в снижении потерь дорогостоящего криоагента, сокращении числа незапланированных остановок транспорта и повышении обоснованности управленческих решений при эксплуатации криогенного парка.

Полученные результаты целесообразно рекомендовать к использованию организациям, эксплуатирующим средства транспортировки и хранения сжиженных газов, предприятиям химической, энергетической и медицинской отраслей, применяющим криогенные среды, а также разработчикам встраиваемых систем управления техническими объектами с ограниченными вычислительными ресурсами. Материалы диссертации применимы и в образовательном процессе при подготовке специалистов в области системного анализа, управления и обработки информации.

Апробация работы

Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы прошли широкую апробацию на международных и всероссийских научно-практических конференциях. Результаты докладывались и обсуждались на шести научных конференциях, среди которых Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Дни науки в ИГХТУ» (ИГХТУ, 2024); V Международная научно-практическая конференция «Построение систем управления устойчивым развитием территорий: взаимодействие стран БРИКС» (МГУ имени М.В. Ломоносова, 2025); V Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы функционирования финансовой системы России» (Финансовый университет, 2025); Всероссийская конференция с международным участием «Имитационное моделирование. Теория и практика» (Санкт-Петербург, 2025); Международная конференция «Прикладной искусственный интеллект: перспективы и риски» (Санкт-Петербург, 2025); Международная научно-практическая конференция «COMSYSTEM 2026» (МТУСИ, 2026).

По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, в том числе 9 статей в рецензируемых изданиях из перечня ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации общим объемом 5,7 печатного листа. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, что подтверждает практическую реализацию разработанных алгоритмов.

Замечания по диссертации

В ходе рассмотрения и обсуждения диссертации на заседании кафедры высказаны следующие замечания.

1. В диссертации выполнено обоснованное сравнение предложенного решения с ручным контролем и классическими методами машинного обучения (логистическая регрессия, градиентный бустинг). Однако для полноты картины научного приращения представляется целесообразным более детально обозначить в тексте диссертации отличия разработанного оператора физико-статистического формирования признаков от методов автоматизированного машинного обучения и зарубежных подходов к прогностике криогенного оборудования (в частности, систем мониторинга CERN и NASA), упомянутых в обзоре литературы.

2. Разработанные модели и алгоритмы получены применительно к транспортным контейнерам жидкого гелия с азотным экраном. Для контейнеров иных типов автор указывает на возможную необходимость переобучения и приводит требования к объему обучающей выборки, однако перенос метода на иные криоагенты и конструктивные схемы изоляции отнесен к перспективам исследования. Поскольку общность результатов существенна для их научной и отраслевой ценности, желательно формализовать методику такого переноса с явным разграничением

инвариантной алгоритмической части и части, подлежащей перенастройке под конкретный объект.

3. Функциональная модель системы поддержки принятия решений представлена как формализация полного цикла обработки информации, охватывающего сбор данных вплоть до выработки управленческого решения. Так как сходную последовательность сбора, передачи и представления данных реализуют типовые автоматизированные системы управления и диспетчерского контроля, для оценки новизны существенно четче обозначить, чем предложенная формализация отличается от известных архитектур подобного назначения, помимо наличия контура адаптации.

4. Оценка экономического эффекта внедрения приведена преимущественно в относительном выражении и в части методики вынесена в отдельную публикацию. Для инженерно-экономического профиля ведущей организации представляется важным довести эту оценку до абсолютных стоимостных показателей непосредственно в тексте работы, а именно расчета экономии в денежном выражении, срока окупаемости внедрения и совокупной стоимости владения системой в расчете на парк контейнеров. Это придало бы обоснованию народнохозяйственной значимости работы завершенный вид.

Указанные замечания носят характер рекомендаций, не снижают уровня научной новизны, теоретической и практической значимости, не влияют на общую положительную оценку выполненной диссертационной работы и являются направлениями дальнейших исследований и публикаций.

Заключение

Диссертация Горева Сергея Владимировича представляет собой самостоятельное и завершенное научное исследование, в котором решена актуальная научная задача автоматизированной обработки сенсорной информации и поддержки решений оператора при управлении многослойной криогенной системой на встраиваемой платформе с ограниченными вычислительными ресурсами. Полученные результаты развивают теорию и практику системного анализа, управления и обработки информации в технических системах и доведены до практического применения. По совокупности разработанных моделей, алгоритмов и методов, глубине их обоснования и подтвержденному эффекту внедрения работа отвечает уровню кандидатской диссертации и заслуживает положительной оценки. Содержание автореферата соответствует основному тексту диссертации и в достаточной мере передает ее научные результаты и выводы.

Диссертация соответствует требованиям, установленным пунктами с 9 по 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (с изменениями и дополнениями), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Горев Сергей Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата

технических наук по научной специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» (технические науки).
Отзыв рассмотрен, обсужден и одобрен на заседании кафедры «Информационные системы и технологии» государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», протокол № 1 от «31» августа 2026 г. Присутствовало на заседании 23 человек. Результаты голосования: за 23 человек, против 0 человек, воздержались 0 человек.

Отзыв составил:

Доцент, к.т.н., доцент _____ Анна Александровна Бердникова

Заведующий кафедрой

«Информационные системы и технологии»,

к.ф.-м.н., доцент _____ Татьяна Николаевна Астахова

Подписи заверяю:

Ученый секретарь

ГБОУ ВО «НГИЭУ» _____ Ольга Владимировна Тепцова

Сведения о ведущей организации: государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет» (ГБОУ ВО «НГИЭУ»). Адрес: 606340, Нижегородская область, г. Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22а. Телефон: 8 (83166) 4-15-50. E-mail: ngiei-126@mail.ru. Сайт: https://ngieu.ru/.