

Мультиагентная система предиктивного моделирования реакторов

Цифровая система двойника для установки
производства полимеров (Digital Twin)

Направление: Тематика №19

Резюме проекта (Executive Summary)



Суть: Создание «Когнитивного цифрового двойника» реактора на базе гибридного ИИ (Physics-Informed AI).

Архитектура: Разработан мультиагентный фреймворк на Go (Highload, Kafka). Реализовано ядро обмена сообщениями и протоколы интеграции.

Методология: Обоснован выбор гибридного подхода (PINNs) для преодоления ограничений классического CFD в задачах реального времени.

Ключевая ценность (Target Value): Переход от оффлайн-расчетов к онлайн-управлению (Real-Time). Целевое время реакции системы - менее 1 сек (за счет суррогатного моделирования).

Текущий статус: TRL 4 (Software Readiness). Программная платформа (Core) готова к развертыванию. Ведутся технические переговоры с R&D-партнерами для создания физической модели.

Решаемая проблема



Проблема: Невозможность использования классических CFD-моделей в контуре управления (DCS) из-за длительности расчетов. Операторы не видят объемной картины процессов внутри реактора в момент времени.

Последствия:

Позднее обнаружение зон агломерации (спекания частиц) и перегрева.

Внеплановые остановки на чистку реактора.

Высокая доля переходных (off-spec) марок при смене режимов.

Актуальность: Для газофазных реакторов (технологии Unipol, Spherilene) стабильность псевдоожженного слоя - критический параметр эффективности.

ПРОДУКТ - Суть технологии CIRIYC PRO — это Гибридный Цифровой Двойник (Hybrid Digital Twin) газофазного реактора.



- 1. Программный комплекс, который объединяет CFD-моделирование (физику процесса) и ML-алгоритмы (скорость) для расчета параметров псевдоожженного слоя в реальном времени.**
- 2. Ключевые характеристики для пользователя.** **Физическая точность:** Модель рассчитывает 3D- поля температур, скоростей и концентраций, а не просто аппроксимирует статистику. **Real-Time:** Расчет сложной физики за <1 сек (вместо часов в классическом CFD) благодаря технологии суррогатного моделирования. **Предиктивность:** Прогноз возникновения агломерации (спекания) за 15-20 минут до срабатывания аварийных датчиков.
- 3. Внедрение и применение****Интеграция:** Подключается к АСУ ТП (DCS) как «виртуальный анализатор». Читает данные (\$P, T, Flow\$), возвращает 3D-картину процесса. **Безопасность:** Работает в контуре предприятия (On-Premise), без передачи данных в облако. **Режим работы:** Open Loop (выдача рекомендаций технологу) с возможностью перехода в Closed Loop (автоматическое регулирование).
- 4. Эффекты от внедрения.** **Технологический:** Полная прозрачность процессов внутри реактора («Виртуальное зрение»). **Экономический:** Исключение внеплановых остановок на чистку реактора и снижение объемов некондиционной продукции (off-spec) при переходах.
- 5. Подтверждение эффекта** - Эффективность гарантируется валидацией на физических моделях (High-Fidelity CFD): нейросеть обучается на точных уравнениях газодинамики, что исключает «галлюцинации» и ошибки прогноза.

ТЕХНОЛОГИЯ И ИННОВАЦИЯ - Технологический стек: Синтез Physics-ML и Highload-архитектуры



- 1. Суть технологии (Core Tech)** Применение архитектуры Physics-Informed Neural Networks (PINNs). Модели обучаются не только на исторических данных, но и на физических законах (уравнения Навье-Стокса), что позволяет получать достоверный прогноз поведения реактора в режимах, которые ранее не наблюдались.
- 2. Ключевое отличие** Переход от пост-анализа (расчеты занимают часы) к оперативному управлению (расчеты занимают <1 сек). Мы делаем сложное моделирование доступным в контуре реального времени.
- 3. Ноу-хау продукта (Proprietary Tech)** Собственный мультиагентный фреймворк на языке Go, оптимизированный под промышленные нагрузки:
 - Event-Driven Architecture:** Асинхронная обработка через Kafka (гарантия доставки At-least-once).
 - Integration Layer:** Проектируется архитектура шлюзования данных из внешних систем во внутренний протокол агентов. Адаптеры для промышленных протоколов (OPC UA) - в scope пилота.
 - Orchestration:** Механизм управления состоянием агентов (StateGraph) для гибкой настройки сценариев.

ТЕХНОЛОГИЯ И ИННОВАЦИЯ - Технологический стек: Синтез Physics-ML и Highload-архитектуры



- 4. Значимость разработки** - Решена задача интеграции «тяжелых» математических моделей в промышленный контур без использования суперкомпьютеров на площадке (Edge Computing).
- 5. Интеллектуальная собственность (IP)** - Подготовлена архитектура для регистрации программы для ЭВМ: «Ядро мультиагентной оркестрации промышленных данных». Запланировано патентование метода гибридного моделирования (совместно с R&D-партнером).
- 6. Развертывание и Интеграция Поставка:** Docker-контейнеры (микросервисная архитектура). Связь: Архитектура позволяет подключать адаптеры любых промышленных протоколов (OPC UA, MQTT) через единый шлюз.
- 7. Валидация технологии (Proof of Feasibility)** Подход Digital Twin + ML для химических реакторов доказан мировыми лидерами в производстве полимеров:

ТЕХНОЛОГИЯ И ИННОВАЦИЯ - Технологический стек: Синтез Physics-ML и Highload-архитектуры



Подход Digital Twin + ML для химических реакторов доказан в промышленных проектах мировых компаний (производство полимеров, нефтехимия):

Borealis + Johannes Kepler University (2021) - Газофазный HDPE fluidized bed reactor. Технология: rCFD (recurrence CFD). Ускорение: 381,000× vs классический CFD; Масштаб: Пилотный реактор (1.5 м³, 4.8 м высота); Статус: Промышленная валидация; Публикация: AIChE Journal (DOI: 10.1002/aic.17161)

Shell + NVIDIA Modulus (2023-2025) - Fischer-Tropsch реакторы (Gas-to-Liquid) Технология: Hierarchical PINNs -Ускорение: Microkinetics: 1,000,000×, Pellet diffusion: 10,000,000×; Точность: <1% relative error; Real-time: 4 сек на NVIDIA V100; Публикации: arXiv 2023, SPE ADIP 2024, Advanced Theory and Simulations 2025;

Прямая переносимость на газофазную полимеризацию: Та же физика (кинетика + диффузия в частицах + гидродинамика реактора), то же решение (PINNs для ускорения computational bottleneck).

CIRIYC PRO - адаптирует проверенные методы под задачу предсказания агломерации в реакторах СИБУР.

КОНКУРЕНТНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА



Сравнение с мировыми аналогами и альтернативами. 1. МЕТРИКИ

Параметр сравнения	Ansys Fluent (США)	Aspen Polymers (США)	Текущая DCS (Siemens / Yokogawa)	CIRIYC PRO (РФ)
Время расчёта (Time-to-Solution)	> 4 часов (на итерацию)	> 30 минут	0 сек (Real-time)	< 1 сек (Inference)
Детализация физики	Высокая (3D CFD)	Средняя (1D/0D модели)	Нулевая (только сырье данные)	Высокая (3D)
Горизонт прогноза (Look-ahead)	Нет (Post-analysis)	Нет (Steady state)	0 мин (реакция по факту)	15–20 мин
Требования к железу	HPC кластер / суперкомпьютер	Мощная рабочая станция	Промышленные контроллеры	1 GPU / Edge-сервер
Стоимость внедрения	Высокая (лицензии + железо)	Высокая	Уже внедрено	Средняя (SaaS / On-prem)

Ключевые преимущества (Key Differentiators)



Скорость. Мы в **14 000 раз быстрее** классического CFD (\approx 1 секунда vs 4 часа) за счёт замены прямых численных методов на нейросетевой инференс.

Предиктивность. В отличие от DCS, которая показывает аварию, когда она уже случилась, мы показываем тренд за **15 минут до события**.

Легковесность. Решение на Go + ML не требует закупки суперкомпьютеров — оно работает на стандартном серверном оборудовании.

Почему конкуренты этого не делают (Barriers for Competitors) ?

Legacy-код. Гиганты (Ansys, Aspen) развиваются свои движки 30+ лет. Код слишком тяжёлый и монолитный, чтобы переписать его под real-time и микросервисы.

Бизнес-модель. Их фокус - продажа дорогих лицензий для R&D-отделов, а не оперативный софт для сменных инженеров.

Консерватизм DCS-вендоров. Производители железа (Siemens и др.) фокусируются на надёжности контроллеров, а не на сложной математике внутри них.

БИЗНЕС-МОДЕЛЬ И ОЦЕНКА РЫНКА - Коммерциализация: Лицензирование технологии и R&D-сервис



Модель:

- **Лицензия:** Платформа CIRIYC Core для объектов заказчика
- **R&D-сервис:** Адаптация моделей под конкретный реактор

Ценообразование:

- Пилот (1 реактор): 10 млн руб.
- Тиражирование: 8-12 млн руб. за реактор
- Subscription: 3-5 млн руб./год

Оценка рынка:

- **SOM (СИБУР):** 5-7 газофазных линий (ЗапСибНефтехим, Казаньоргсинтез)
- **SAM (РФ/СНГ):** Лукойл, Газпром нефть, SOCAR - технологии псевдоожженного слоя
- **TAM (Мир):** >150 заводов Unipol/Spherilene. Рынок Industrial AI: \$2.5 млрд (CAGR 12%)

Конкуренты:

- Ansys - дорогие R&D-пакеты (непригодны для операторов)
- Siemens APC - статистика без физики

Ниша практически свободна.

СТАТУС ПРОЕКТА



Активы:

- **Software Core (Go):** Мультиагентный фреймворк для промышленных данных
- **Методология:** Архитектура интеграции CFD в real-time через PINNs
- **IP:** Исходный код платформы (готовится регистрация ПО)

Технологический базис: Концепция «Цифровой Энергетический Директор» (Digital Energy Director) для управления критической инфраструктурой.

Готовность:

- **Highload-архитектура (Kafka):** Обработка тысяч тегов телеметрии/сек
- **Интеграция:** Протоколы обмена данными → развертывание без переработки IT-ландшафта

Статус партнёров: Сформирован Tech Expert R&D (CFD, AI) консорциум. Профильные отраслевые эксперты в областях вычислительной гидродинамики (CFD) и AI-моделирования материалов, разрабатывают основу для обучения нейронных сетей и научно валидируют модель реактора.

ПРЕДЛОЖЕНИЕ ЗАКАЗЧИКУ НА ПИЛОТ



Решение: Запуск CIRIYC PRO параллельно АСУ ТП без вмешательства в управление.

Система предсказывает зоны агломерации, не влияя на производство.

Объект: Один газофазный реактор (ПЭ/ПП) для отработки точности.

Доработки:

1. CFD-модель под геометрию реактора СИБУР
2. Обучение PINNs на исторических данных
3. OPC UA Gateway с буферизацией в Kafka

Этапы (3-4 месяца):

1. **Согласование:** NDA, чертежи, архив телеметрии
2. **Установка:** Адаптация моделей, развертывание
3. **Валидация:** Ретроспективный анализ, проверка прогнозов

Эффекты:

- Прогноз агломерации за **15-20 мин** до аварии
- **Precision >95%** (5 ложных из 100), **Recall 80%** (поймали 8 из 10)

ЗАТРАТЫ И ЭФФЕКТЫ ПИЛОТНОГО ПРОЕКТА

Бюджет пилота и экономический эффект



Затраты: 10 млн руб.

- ФОТ (50%): Адаптация платформы, интеграция (OPC UA Gateway)
- R&D (30%): CFD-модель, обучение ML
- Инфраструктура (20%): GPU, накладные расходы

Финансирование:

1. Грант Сколково (R&D расходы)
2. Договор с СИБУР (ОПИ)

KPI пилота (3 месяца):

- Горизонт прогноза: **>15 мин**
- Precision: **>95%** (ложные тревоги <5%)

Экономика:

- Стоимость инцидента: **20-50 млн руб.**
- ROI: **1 предотвращённая авария = окупаемость**
- Потенциал СИБУР: **>300 млн руб./год** (5-7 линий)

Коммерциализация:

- Лицензия (Enterprise): Платформа
- SLA: Техподдержка + калибровка моделей

Команда

Якшин Артем Сергеевич, CEO /Architect / Product

Научные статьи ВАК, менеджмент, УП



Макеев Тихон Александрович, CIT /Code / Architect

Финалист хакатонов, победитель олимпиад



Волков Василий Юрьевич, CFD Lead Expert

к.т.н., инженер коструктор (РОСАТОМ)

Шапеев Александр Васильевич, R&D Partner

к.ф.-м.н., профессор (Сколтех)

Лебедева Анна Андреевна, ML Engineer

Разработка алгоритмов машинного обучения.



Онуфриенко Анна Сергеевна, ML Engineer

Data Science, подготовка датасетов.

Власов Андрей Михайлович, UX/UI

Программист/Дизайнер - разработка пром.-х UX/ГШ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПРЕДЛОЖЕНИЕ

Ключевые показатели проекта (Summary)

Технология: Гибридный цифровой двойник (PINNs + Go Core).

Скорость: Расчет физики реактора <1 сек (Real-Time).

Горизонт прогноза: Обнаружение аномалий за **15–20 минут** до сбоя.

Предложение для заказчика

Проект: Пилотное внедрение системы CIRIYC PRO в режиме «Теневого двойника».

Объект интеграции: Газофазные реакторы полимеризации («ЗапСибНефтехим» / «Казаньоргсинтез»).

Экономический эффект пилота: Подтверждение возможности предотвращения внеплановых остановок (стоимость риска: **20–50 млн руб.** за инцидент).

Первые шаги для старта (Next Steps):

1. Подписание NDA и согласование периметра пилота.
2. Передача архива исторических данных (3–6 месяцев) для обучения моделей.
3. Согласование ТЗ на адаптацию коннекторов к заводской DCS.

Долгосрочные возможности (Vision)

Масштабирование решения на все технологические линии холдинга (потенциал **>300 млн руб./год**) и переход от режима «Советчик» к автоматическому замкнутому управлению (Closed Loop).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПРЕДЛОЖЕНИЕ



ООО “СИРИУС ПРО”

+ 7 (495) 308 83 77,

+ 7 964 647 74 48,

inbox@ciriyc.ru

WWW.CIRIYC.RU