

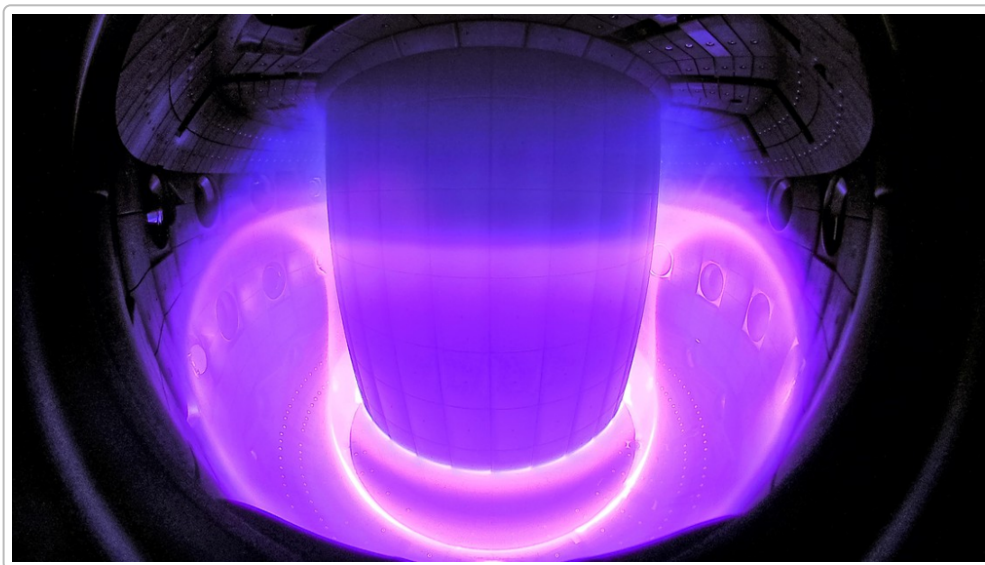
Искусственный интеллект в термоядерной энергетике: применение, проекты и инструменты

Введение

Термоядерная энергетика обещает практически неистощимый источник чистой энергии, воспроизводя на Земле реакцию синтеза, питающую звёзды. Однако управление раскалённой плазмой при температурах свыше 100 миллионов °C – задача огромной сложности. Современные эксперименты (токамаки, стеллараторы и др.) генерируют гигантские массивы данных и требуют точнейшего контроля, чтобы избежать нестабильностей и сбоев в плазме ¹ ². В последние годы искусственный интеллект (Machine Learning, Deep Learning, нейросети) стремительно внедряется в эту сферу. Алгоритмы ИИ способны выявлять скрытые паттерны в данных и принимать решения быстрее человека, открывая новые пути оптимизации термоядерных реакторов ³ ⁴. Ниже рассмотрены основные направления применения ИИ в управляемом термоядерном синтезе, конкретные примеры на крупнейших установках, текущие исследования и инициативы, а также обзор симуляторов, используемых для моделирования реакторов.

Основные направления использования ИИ в термоядерных реакторах

Управление плазмой



Плазменный разряд внутри токамака (установка TCV). Управление формой и положением плазмы – ключевая задача, решаемая с помощью ИИ.

Активное управление плазмой – одно из главных применений ИИ в токамаках. Традиционные системы управления используют отдельные регуляторы для каждого магнитного контура, тогда как современные подходы на базе **глубокого обучения с подкреплением (RL)** позволяют единым алгоритмом координировать десятки магнитных катушек и удерживать нестабильную плазму заданной формы ⁵ ⁶. Прорывной пример – сотрудничество DeerpMind и Швейцарского центра плазмы (EPFL): нейросетевой контроллер успешно управлял 19 магнитными катушками токамака TCV, самостоятельно «выучив» удерживать плазму и даже придавать ей различные конфигурации в реальном времени ⁷ ⁶. С помощью такого RL-агента учёные **скульптурировали** плазму – создавали сложные формы, например разделяли плазменный сгусток на две отдельные «капли», удерживая их одновременно ⁸. Важность этого достижения в том, что некоторые полученные формы соответствуют конфигурациям, необходимым для будущего реактора ITER ⁹.

Помимо формы, ИИ помогает удерживать **стабильность плазмы**. В США на установке DIII-D продемонстрировано, как алгоритм глубокого RL, обученный в симуляции, интегрирует данные сотен датчиков и за доли миллисекунды корректирует магнитное поле, предотвращая возникновение опасных магнито-гидродинамических возмущений (островных нестабильностей) до того, как они разовьются ¹⁰ ¹¹. Этот подход позволил **избежать токовых срывов** (disruptions) путём упреждающей стабилизации плазмы в реальном времени ¹². Как отмечают исследователи, такой AI-контроллер расширяет пространство возможных режимов работы – можно безопасно испытать сценарии, ранее считавшиеся слишком рискованными, и добиться более высокой производительности установки ¹³. Например, при помощи ИИ впервые удалось достичь устойчивого высококонфайнментного режима (H-mode) **без эволюентных всплесков** (ELM) одновременно на двух разных токамаках (DIII-D в США и KSTAR в Корее) с использованием одного и того же алгоритма управления ¹⁴ ¹⁵. Автоматизированные системы на основе ИИ способны принимать решения быстрее человека – регулировать токи катушек, подачу топлива, мощность подогрева плазмы – и тем самым поддерживать реакцию синтеза в устойчивом режиме длительное время ³ ⁴.

Диагностика и мониторинг

Термоядерные установки оснащены десятками высокотехнологичных диагностик (датчики магнитных полей, оптические и рентгеновские камеры, спектрометры, датчики нейтронов и др.), которые генерируют гигабайты информации за каждую секунду разряда ². ИИ существенно упрощает анализ этих данных. Например, методы **машинного обучения** используются для автоматического обнаружения аномалий и помех в сигналах. В плазме часто встречаются **выбросы-«артефакты»** измерений – например, всплески сигнала из-за попадания нейтронов в диагностический детектор, не связанные с реальными процессами в плазме ¹⁶. Классические алгоритмы с трудом отличают такие выбросы, особенно в многомерных массивах данных. Специалисты из Института физики плазмы Макса Планка (IPP, Германия) разработали алгоритмы на основе стохастических моделей (процессы Стьюдента t) для надёжного выявления и исключения некорректных точек в массивах экспериментальных данных ¹⁶ ¹⁷. Такой подход позволил не только очищать данные измерений, но и **восстанавливать отсутствующие данные** – например, если какой-то датчик временно вышел из строя, его показания можно интерполировать на основе данных других диагностик ¹⁸.

ИИ помогает и в прямых задачах диагностики – распознавании состояний плазмы. **Компьютерное зрение** используется для анализа изображений плазмы и быстрых физических событий. К примеру, в стеллараторе Wendelstein 7-X применяются методы глубокого обучения для определения момента перехода к режиму **отрыва плазмы от дивертора** (detach) по видеоизображениям из внутрикамерных камер, что важно для защиты стенок от перегрева ¹⁹. Другие модели оценивают профили температуры и плотности по данным датчиков, улучшают пространственное разрешение измерений и т.д. Также разрабатываются **«цифровые двойники»** плазмы – постоянно обновляемые компьютерные модели, которые в реальном времени получают потоки диагностических данных и рассчитывают ключевые параметры плазмы (токи, профиль давления, положение границы и пр.) ²⁰ ²¹. Такие цифровые модели с помощью ИИ заполняют пробелы теоретических моделей и позволяют операторам лучше понимать эволюцию разряда. Например, нейросеть, обученная на результатах кода равновесия (EFIT), была внедрена на токамаке EAST для мгновенной оценки положения плазмы и скорости ее вертикального смещения – в реальном времени и с учётом неопределённости измерений ²² ²³. Зная точную форму плазмы и доверительный интервал, система управления может адекватнее реагировать: если отклонение формы велико и достоверно – немедленно корректировать магнитное поле; если же измерения неопределённые – игнорировать ложный сигнал ²³. Таким образом, ИИ усиливает возможности диагностики, позволяя **мониторить плазму с беспрецедентной точностью** и надёжностью.

Прогнозирование сбоев и предотвращение аварий

Одной из самых опасных ситуаций в токамаке является **дисрупция** – внезапная потеря удержания плазмы, сопровождающаяся выбросом колоссальной энергии и силовых нагрузок на стенки реактора. Предсказание подобных сбоев заранее – краеугольный камень безопасной работы ITER и других реакторов ²⁴ ²⁵. ИИ уже продемонстрировал здесь свою эффективность. В Принстонской лаборатории физики плазмы (PPPL) разработали алгоритм, обученный на тысячах прошлых разрядов DIII-D, который **предсказывает приближение дисрупции за 30–300 мс до события**, распознав характерные предвестники в показаниях датчиков ²⁶. В случае повышенного риска система автоматически инициирует меры смягчения – например, впрыск поглощающих примесей или разгрузку тока – чтобы стабилизировать плазму и избежать аварии ²⁷. В испытаниях такой ИИ-модуль на DIII-D смог предупредить срыв ~300 мс заранее и благодаря этому полностью предотвратить разрушение разряда ²⁸.

Подобные модели используют разные методы ML – от нейронных сетей (CNN, LSTM) до случайных лесов и градиентного бустинга. На китайском токамаке EAST сформирована база данных всех случаев срывов, и целый ансамбль алгоритмов (сверточные и рекуррентные сети, Random Forest, XGBoost) обучен различать типичные причины нарушений – всплески примесей, марфы (MARFE) и прочие нестабильности ²⁹. Более того, применяется **перенос обучения между установками**: используя архивы Альтатора C-Mod (США) и JET (Европа), модели, обученные на одних машинах, адаптируются для прогнозирования сбоев на других ³⁰. Такой межмашинный ИИ-подход повышает надёжность, позволяя учитывать более разнообразные сценарии, чем доступны на одной установке. Важным направлением становится и **объяснимый ИИ** (XAI): учёные стремятся не только получить верный прогноз, но и понять, какие физические признаки указывают на надвигающийся срыв ³¹ ³². Это помогает встроить прогнозирующие модели в систему управления, где они будут работать совместно с традиционными контроллерами, повышая общую устойчивость реактора к сбоям.

Оптимизация конструкции и режимов реакторов

ИИ используется не только в операционном контроле, но и на стадии проектирования термоядерных установок. **Цифровые модели реакторов**, усиленные ML, позволяют исследовать огромное пространство параметров и находить оптимальные конфигурации, которые было бы трудно подобрать вручную. Например, команда DeepMind совместно с Commonwealth Fusion Systems (разработчик компактного реактора **SPARC**) создала дифференцируемый симулятор плазмы **TORAX** на базе JAX, способный быстро просчитывать поведение плазмы при различных настройках ³³ ³⁴. Этот симулятор интегрируется с методами AI-оптимизации: **агенты на основе RL и эволюционных алгоритмов** (такие как AlphaEvolve) перебирают тысячи сценариев нагрева, токов магнитов, топливной подачи и т.п., чтобы максимизировать выходную мощность при соблюдении ограничений по стабильности ³⁵ ³⁶. В виртуальных экспериментах TORAX находит комбинации настроек, обещающие наибольшую энергосыработку для SPARC, экономя месяцы реального времени и фокусируя внимание инженеров на самых перспективных режимах ³⁶ ³⁷.

ИИ помогает и в **оптимизации конструкции магнитных конфигураций**. Стеллараторам, например, присущи сложные изогнутые магнитные поверхности. Инструменты AI/ML применяют для улучшения форм магнитных катушек и поля: в PPPL разрабатываются алгоритмы, которые учитывают сразу множество кодов для разных аспектов конструкции стелларатора и с помощью обучения находят баланс между детализированной точностью моделирования и приемлемым временем расчёта ³⁸ ³⁹. Такой подход ускоряет итерации проектирования: вместо ручного перебора, ИИ подсказывает, как изменение геометрии или токов повлияет на удержание плазмы. В перспективе, это путь к созданию **«цифрового двойника» реактора** – комплексной модели, которая калибруется по экспериментальным данным и может предсказывать поведение установки при новых конфигурациях. Как отметил д-р Майкл Черчилль (PPPL), идеальный цифровой двойник будет получать обратную связь от реального реактора и уточнять расчёты, позволяя с высокой точностью прогнозировать будущую производительность и выявлять оптимальные конструктивные решения ⁴⁰ ⁴¹.

Отдельно стоит упомянуть применение ИИ к инерциальному синтезу (лазерному термояду): хотя вопрос фокусируется на реакторах с магнитным удержанием, методы ML также оптимизируют **лазерные импульсы** и мишени в установках вроде NIF (США) и OMEGA. Нейросети помогли подобрать форму лазерного импульса, которая в экспериментах увеличила выход энергии синтеза в три раза ⁴², а алгоритмы **inverse design** («обратного проектирования») рекомендуют параметры облучения мишени, чтобы приблизиться к условию зажигания ⁴³. Эти успехи в сумме показывают, что ИИ стал важным инструментом, ускоряющим переход от научных экспериментов к инженерным решениям для промышленной термоядерной энергетики.

Ускорение физических симуляций

Многие вычислительные задачи в физике плазмы чрезвычайно ресурсоёмки. ИИ способен служить своего рода **ускорителем** для таких расчётов, заменяя медленные численные алгоритмы быстрыми аппроксимирующими моделями. Пример – симуляция кулоновских столкновений в плазме: прямое решение интегро-дифференциального оператора Фоккера–Планка–Ландау (FPL) требует больших вычислительных затрат. Группа в UNIST (Южная Корея) под руководством Чимина Ли разработала нейросетевую модель **FPL-net**, которая решает уравнение столкновений **за один шаг**, показывая ускорение расчётов в 1000 раз по сравнению с классическими методами при ошибке менее 0,001%

⁴⁴ ⁴⁵ . Ключевым было внедрение физических законов сохранения (заряда, импульса, энергии) прямо в архитектуру сети, чтобы она соблюдала эти инварианты при прогнозе ⁴⁶ . Такой подход позволил проводить длинные расчёты эволюции плазмы без накопления ошибок, вплоть до достижения термализации, что ранее было трудно из-за погрешностей итерационных схем ⁴⁷ . Авторы отмечают, что использование GPU и глубокого обучения дало тысячекратный прирост скорости и фактически заложило основу для **«цифровых двойников токамаков»**, где быстрое моделирование турбулентности и других процессов идёт в реальном масштабе времени ⁴⁸ .

Схожие работы ведутся и в Европе. В рамках EUROfusion запущен ряд проектов по применению ML для ускорения конкретных физических расчётов. Так, команда д-ра Aaro Järvinen (VTT, Финляндия) создает метод машинного обучения для **сверхбыстрого вычисления устойчивости краевого плазменного слоя (пьедестала)** ⁴⁹ . Сейчас подобные MHD-стабильностные расчёты (например, оценка предела токов токамака по критерию идеальной локальной моды) занимают часы суперкомпьютерного времени, что непригодно для оперативного управления. Цель – получить ML-модель, которая за мгновение будет предсказывать, стабилен ли текущий профиль плазмы, и тем самым её можно будет использовать *on-line* в контуре управления ⁵⁰ . Другой пример – проект, который возглавляет проф. Герт Вердулаге (Университет Гента, Бельгия): комбинация байесовских методов и ML для выявления универсальных зависимостей в режимах **гибридного конфайнмента** на разных установках и предсказания оптимальных условий для будущих реакторов (ITER и последующих) ⁵¹ . Такие модели фактически выступают быстрыми предикторами выхода энергии и границ устойчивости плазмы, обученными на огромных массивах экспериментальных и моделированных данных.

Наконец, ИИ облегчает многопроцессорные *first-principle* симуляции. Существуют сложнейшие коды, моделирующие плазму на уровне частиц и полей (например, **XGC** для кинетического моделирования токамаков), которые требуют мощнейших суперкомпьютеров ⁵² . Комбинирование их с ML обещает создание **гибридных моделей**: например, нейросеть может угадывать результат дорогостоящей части расчёта (скажем, турбулентного переноса) по состоянию системы, а более медленный основной код будет обрабатываться реже или меньшим масштабом. Таким образом, совмещая физические модели с обучаемыми аппроксиматорами, можно ускорить симуляции на порядки без критической потери точности ⁵³ . Подобные «симбиозы» классического моделирования и ИИ уже используются при анализе экспериментов и позволят в будущем в реальном времени прогнозировать эволюцию плазмы на основе потоков входящих данных ⁵⁴ .

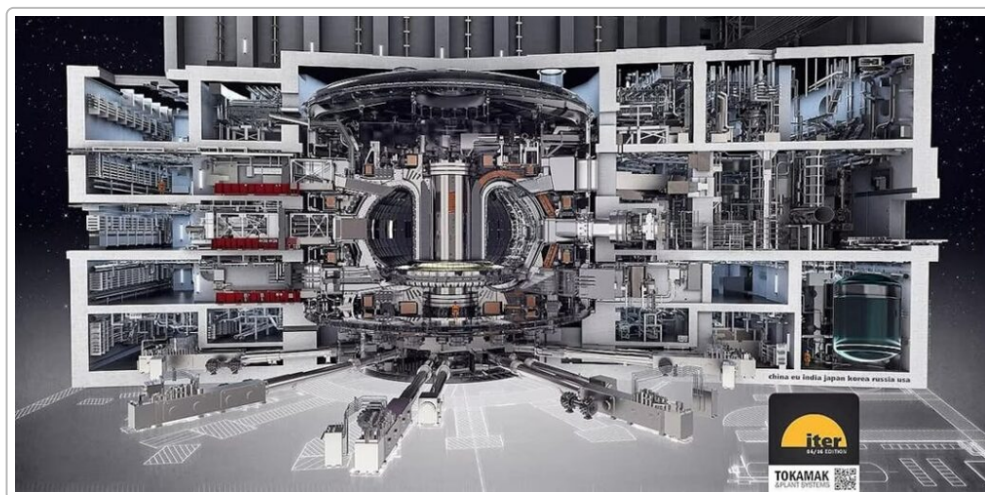
Прогнозирование выхода энергии и эффективности

ИИ-приложения охватывают и задачу **оценки энергии, производимой реактором**, и оптимизации этой величины. Современные токамаки и прототипы реакторов оснащаются множеством диагностик, по сигналам которых требуется оперативно вычислить *внутренние параметры разряда* – например, текущую мощность синтеза (в D-T плазме). Классический пример – гамма-спектрометрия: при реакциях D+T образуются высокоэнергетические гамма-кванты, и по их спектру можно оценить выход мощности. В рамках подготовки к ITER был разработан метод с применением **машинного обучения для оценки мощности синтеза** по данным радиального гамма-спектрометра (RGRS) ⁵⁵ . Алгоритм, обученный на модельных и экспериментальных данных (включая кампанию D-T на JET), способен мгновенно выдавать абсолютную мощность реакций, что важно для контроля баланса энергии в реакторе.

Ещё одна область – поиск режимов с улучшенным энерговыделением. Ранее упомянутые **гибридные режимы** и **режимы без ELM** – это примеры, где ИИ помог достичь высокого удержания плазмы и, соответственно, большого коэффициента усиления реакции (Q). На KSTAR, благодаря AI-контролю, удалось впервые долго удерживать H-mode без колебаний, что обеспечивает более высокую производительность установки ¹⁴. В целом, системы AI стремятся **максимизировать выход энергии, не жертвуя стабильностью**. Как отметил профессор Эгемен Колемен, задача ИИ – позволить плазме генерировать максимум энергии синтеза при одновременном избегании опасных нестабильностей ⁵⁶ ⁴. Для этого алгоритмы рассматривают множество компромиссных вариантов – например, чуть повысить плотность ради лучшего удержания, но не настолько, чтобы спровоцировать разрядку тока; или подобрать форму плазмы, дающую оптимальный объём и давление.

Наконец, ИИ используется для **долгосрочных прогнозов эффективности** энергетических установок. С его помощью оценивают экономические параметры – например, пакет FAROES от UKAEA применяет Python-оптимизацию для расчёта стоимости энергии и капитальных затрат разных проектов реакторов ⁵⁷. В совокупности, инструментарий ML позволяет переходить от отдельных экспериментов к системной оптимизации будущих электростанций, где одновременно учитываются физика плазмы, материалы, экономика и надёжность.

Примеры применения ИИ в крупнейших проектах и установках



Разрез проекта ITER – крупнейшего термоядерного токамака. В таких сложных установках ИИ применяется для анализа огромных массивов данных и управления плазмой.

ITER (Франция) – международный токамак нового поколения – станет полигоном для широкого применения ИИ. Ожидается, что при выходе на полную мощность ITER будет генерировать порядка **2 петабайт данных в сутки**, и без продвинутых методов анализа с этим объёмом не справиться ¹. Уже сейчас, задолго до первой плазмы, команды EUROfusion и ITER разрабатывают AI-решения для управления: системы предсказания срывов (с учётом опыта JET, DIII-D и других токамаков), интеллектуальные алгоритмы для поддержания формы плазмы при рекордно долгих импульсах ~1000 секунд, автоматизированные обработчики диагностики и т.д. Особое внимание уделяется интеграции ИИ в **контур управления ITER** – модели должны работать почти в реальном времени и

быть устойчивы к шумам и отказам сенсоров ⁵⁸ ⁵⁹ . Европейская программа EUROfusion в 2024 году запустила 15 проектов по ИИ для термояда, многие из которых нацелены прямо на задачи ITER ⁶⁰ ⁶¹ . Например, проект Prof. Verdoolaege (Бельгия) ищет ML-методы, чтобы перенести улучшенные режимы конфайнмента с существующих токамаков на ITER ⁵¹ , а команда Dr. Vicente (Португалия) применяет глубокое обучение для улучшения обработки сигналов рефлектометрии, что позволит точно контролировать профили плотности на ITER ⁶² . Таким образом, ITER станет вершиной слияния больших данных и ИИ: от рутинизированной фильтрации данных до автономного ведения разряда, обеспечивая стабильную работу самого большого в истории реактора.

JET (Англия) – крупнейший европейский токамак (диам. ~3 м), где недавно был установлен мировой рекорд по энергии слияния (59 МДж, 2022 г.). На JET отработывались многие подходы, которые теперь перенимаются ИИ. Например, еще в 2019 г. была показана возможность межмашинного ML: алгоритм, обученный на JET, успешно предсказывал срывы на американском токамаке TC-V ⁶³ ⁶⁴ . В экспериментах JET с дейтерий-третиевой смесью используются нейросети для быстрой оценки выделяемой мощности по данным диагностики (гамма-спектрометры, нейтронные детекторы) – эта информация критически важна для управления подводом топлива и эффективности выгорания трития ⁵⁵ . Кроме того, JET служит испытательным стендом для технологий контроля, необходимых ITER: так, системы экстренного тушения плазмы (массированного газового впрыска) могут активироваться на основе рекомендаций ML-модели, следящей за поведением плазмы. Не менее важно, что JET накопил обширный архив данных за десятилетия – и теперь эти данные используются для обучения новых AI-систем. Проекты EUROfusion активно привлекают базу JET: скажем, для обучения нейросетей, восстанавливающих профиль тока в плазме, либо для алгоритмов распознавания образов в больших видеоархивах (визуальные наблюдения разрядов) ⁶⁵ . Таким образом, JET связывает поколения экспериментов, помогая ИИ найти **общие закономерности в поведении плазмы**, которые затем можно применить в будущих реакторах.

EAST (Китай) – сверхпроводящий токамак с самым долгим удержанием плазмы (в 2021 г. удалось поддерживать плазму 1056 секунд). В проекте EAST ИИ внедряется во многих аспектах. Как отмечалось, на EAST реализована **многоуровневая система предсказания сбоев**, обученная на локальных и зарубежных данных ²⁹ . Но помимо этого, китайские учёные применили ИИ для **улучшения традиционных контроллеров**. К примеру, нейросеть, обученная на моделях плазмы, была использована для **самонастройки вертикального стабилизатора**: она в режиме реального времени оценивает параметр роста плазмы и подстраивает коэффициенты ПИД-регулятора, чтобы предотвратить потерю вертикальной устойчивости ⁶⁶ ⁶⁷ . Это повысило надёжность удержания столба плазмы, особенно в длительных импульсах. Ещё одно достижение – с помощью RL-алгоритма на EAST реализовано **автоматическое поддержание давления плазмы**: на основе идентификационной модели плазмы с нагревом СВЧ (Lower Hybrid) обучен агент, управляющий мощностью нагрева так, чтобы давление оставалось на заданном уровне ⁶⁸ ⁶⁹ . В результате EAST становится одной из самых «умных» установок, где ИИ не только прогнозирует проблемы, но и **активно ведёт разряд**, оптимизируя его параметры. Благодаря этим технологиям EAST регулярно устанавливает рекорды длительности и стабильности, подтверждая эффективность AI-подходов.

SPARC (США) – частный проект компании CFS (от MIT) по созданию компактного реактора с выходом в энергоположительный режим. SPARC отличают мощные высокотемпературные сверхпроводники и расчет на достижение **коэффициента усиления $Q > 1$** . В 2023 году компания объявила о партнёрстве с DeepMind для применения ИИ в трёх ключевых направлениях: высокоскоростное дифференцируемое моделирование плазмы, оптимизация пути к максимальной энергии и

управление плазмой в реальном времени с помощью RL ⁷⁰. Практически это означает, что ещё до запуска SPARC его **цифровой двойник** будет проигрывать миллионы виртуальных импульсов, чтобы выбрать оптимальные режимы работы ⁷¹ ⁷². Симулятор TORAX уже стал частью ежедневной работы команды SPARC, позволяя быстро проверять гипотезы и корректировать план экспериментов ⁷³. Например, ИИ-модели перебирают варианты формы импульса тока и сценариев нагрева, чтобы **перейти в режим зажигания с минимальными затратами времени** ³⁵. Поскольку SPARC должен быть первым реактором с положительным выходом энергии, ставка на ИИ здесь особенно высока: по оценке CFS, AI-инструменты помогут сэкономить годы попыток и избежать тупиковых режимов, сразу сфокусировавшись на наиболее результативных стратегиях ³⁶ ⁷⁴.

Wendelstein 7-X (Германия) – крупнейший стелларатор, отличающийся своей сложной «скрученной» магнитной конфигурацией. В W7-X благодаря форме отсутствуют крупномасштабные разрывы плазмы, но задачи удержания и контроля не менее сложны, чем в токамаках. Здесь ИИ задействован прежде всего в сфере диагностики и **точного контроля профилей**. Установка оснащена десятками диагностических систем, и институт IPP (эксплуататор W7-X) активно внедряет ML для обработки их данных ⁷⁵ ⁷⁶. Упомянутая ранее система определения равновесия и формы плазмы с оценкой погрешности – прямое приложение для W7-X, позволяющее оперативно настраивать магнитное поле и газовую подпитку для поддержания оптимального состояния плазмы ²¹ ⁷⁷. Кроме того, на W7-X проводятся исследования по управлению тепловой нагрузкой на дивертор: например, ML-алгоритмы отслеживают наступление режимов частичного или полного отрыва потока плазмы от материалов (detach) по сигналам камер и датчиков давления, позволяя автоматике вовремя увеличивать газовую подпитку для охлаждения краёв плазмы. В работе M. Szucs и др. (2022) продемонстрировано использование **классификаторов изображений** для детектирования момента отрыва по видео W7-X – некоторые алгоритмы (например, градиентный бустинг) достигли точности свыше 95% в распознавании необходимого состояния плазмы ¹⁹. Таким образом, даже в столь нетривиальной системе, как стелларатор, ИИ нашёл применение: он помогает экспериментаторам видеть невидимое (плазму целиком не измеришь напрямую) и стабилизировать её параметры в реальном времени.

K-STAR (Южная Корея) – корейский сверхпроводящий токамак, известный рекордными длительными импульсами H-мода (до 8 минут). Для достижения таких результатов KSTAR активно применяет передовые алгоритмы контроля, и ML играет растущую роль. Корейские ученые совместно с PPPL реализовали на KSTAR **нейросетевую систему подавления edge-локализованных мод (ELM)** – фактически тот же алгоритм, что и на DIII-D, позволил удерживать высокое confinement состояние без ELM, о чём сообщалось в Nature Communications ¹⁴ ¹⁵. Кроме того, KSTAR участвует в международных проектах по передаче алгоритмов: так, код предсказания срывов, разработанный на данных DIII-D, тестировался и на KSTAR, что подтвердило его универсальность ⁶³. Для будущего маршрута KSTAR (планируемого реактора K-DEMO) рассматривается глубокая интеграция AI: создаются имитационные модели «KSTAR-NN» – открытая платформа на Python для моделирования токамака KSTAR с использованием нейросетевых приближений ⁷⁸. Она позволит инженерам проверять новые идеи управления плазмой виртуально, не рискуя дорогой установкой. В итоге KSTAR сейчас – это **испытательный полигон** AI-контроля длительных импульсов, а полученные знания будут перенесены на проектируемую промышленную установку.

Помимо перечисленных, есть и другие проекты, где ИИ играет заметную роль: **DIII-D** (США) – пионер многих ML-систем, **TCV** (Швейцария) – первая площадка для DeepMind RL-контроллера плазмы,

JT-60SA (Япония–Европа) – новый токамак, где планируется использовать AI для управления долгими импульсами, **General Fusion**, **TAE Technologies**, **Zap Energy** – стартапы с альтернативными подходами к синтезу, также изучающие применение машинного обучения для оптимизации своих установок. Весь мир термояда движется к тому, что без искусственного интеллекта эффективное управление реакцией слияния практически невозможно – настолько сложна и тонка эта задача. Как образно заметил один из руководителей Tokamak Energy, «**цифровой двойник реактора и ИИ способны отвоевать годы на пути к коммерческому термояду**», сэкономив время и ресурсы в гонке за чистой энергией ⁷⁴ ⁷⁹ .

Научные исследования, промышленные инициативы и стартапы

В области применения ИИ для управляемого термояда активно участвуют как академические лаборатории, так и промышленность. С научной стороны, крупные программы координируются международными организациями: так, **EUROfusion** в Европе спонсирует серию проектов (см. выше) по ML в физике плазмы ⁶⁰ ⁸⁰ . Также проводятся специализированные конференции (например, IAEA Technical Meeting on Fusion Data Processing, сессии по Machine Learning в Plasma Physics конференциях). Журналы отмечают рост публикаций: вышли специальные выпуски, посвящённые ML в физике плазмы (например, Contributions to Plasma Physics, июнь 2023, где 3 из 12 статей – от группы IPP ⁸¹). Исследуются самые разные аспекты: от **physics-informed нейросетей** (PINN), где сетям прививаются физические ограничения, до **интерпретируемого ИИ**, позволяющего выяснить, какие закономерности он нашёл в данных реактора ⁸² ³² . В США в 2020-х действуют программы DoE, например, SciDAC-projects, направленные на интеграцию AI и высокопроизводительных вычислений для термояда – классический пример работа проф. Уильяма Танга (PPPL) по использованию суперкомпьютеров и нейросетей для межмашинного прогнозирования сбоев ⁶³ ⁶⁴ . В Китае при проекте CFETR (демо-реактор) также заложена обширная программа «умного реактора», объединяющая университеты и институты CAS в разработке алгоритмов автоматизированного управления. Таким образом, академическая наука формирует фундаментальные методики и открытые результаты, доступные всему сообществу.

В индустрии и среди стартапов наблюдается настоящий бум применения ИИ в гонке за первым энергоположительным синтезом. **Commonwealth Fusion Systems (CFS)** – одна из ведущих частных компаний – официально партнерится с AI-лидерами (DeepMind) для ускорения выхода на сетевую мощность ⁸³ ⁷⁰ . **Tokamak Energy** (Великобритания) инвестирует в создание цифровых двойников своих токамаков: как описывал сооснователь Дэвид Кингхэм, цифровая платформа позволяет прогонять импульсы реактора в тысячи раз быстрее реального времени и таким образом «обшаривать» огромное пространство возможностей, экономя годы развития ⁷⁹ ⁸⁴ . Многие стартапы (TAE, Helion, General Fusion и др.) имеют сильные команды по анализу данных: они используют ML для оптимизации параметров плазмы в каждом эксперименте, выжимая максимум информации из ограниченного числа пусков (что критично, так как частота экспериментов ограничена). Интересный пример – компания **ITER AI** (стартап, не связанный с проектом ITER, несмотря на название): она разрабатывает программные комплексы на основе больших моделей (включая мультимодальные модели и интерфейсы с LLM) для помощи операторам термоядных установок, в том числе **разговорные интерфейсы** для управления токамаками ⁸⁵ . Идея в том, чтобы оператор мог задавать системе вопросы (на естественном языке) о состоянии реактора и

получать рекомендации, основанные на анализе многомерных данных – своего рода интеллектуальный помощник для управляющей команды.

Отдельно стоит отметить участие компаний Big Tech. **Google DeepMind** мы уже упоминали – помимо контроллера TCV и проекта с CFS, они ведут исследование “AI for Plasma Science” в целом, выпуская открытые инструменты (например, TORAX выложен в открытый доступ на GitHub ⁸⁶ ⁸⁷). **Microsoft** также инвестирует в термояд: недавно их облачное подразделение Azure запустило инициативу поддержать вычислительные нужды проектов синтеза, включая AI-анализ (пример – сотрудничество с Helion Energy). **NVIDIA** интересуется задачами ускорения симуляций плазмы на GPU – их исследователи демонстрировали ускорение задач гидродинамики и МГД, релевантных как для астрофизики, так и для лабораторной плазмы, с помощью глубоких нейросетей. Таким образом, стык AI и термояда привлекает значительные инвестиции и таланты не только из традиционной физики плазмы, но и из сферы данных.

Наконец, возникают новые междисциплинарные коллективы и стартапы, специализирующиеся именно на **ПО для термоядерного синтеза с ИИ**. К примеру, компания **FuZing** (условно, название) разрабатывает платформу для интеграции всех данных токамака и обучения моделей в процессе его работы. Другой пример – **Kyoto Fusioneering AI**: подразделение японской инжиниринговой фирмы, которое создает систему мониторинга состояния первого стенки реактора с помощью ML (чтобы предсказывать износ и необходимость ремонта). Подобные инициативы показывают, что AI-технологии проникают во все уровни создания и эксплуатации термоядерных установок – от научного софта до операционной деятельности.

Симуляторы термоядерных реакторов и процессов

Моделирование играет центральную роль в разработке термоядерных реакторов. Существуют десятки специализированных программных комплексов – от открытых библиотек для исследователей до промышленных пакетов – позволяющих изучать разные аспекты плазмы и реактора. Ниже приведена подборка таких симуляторов и инструментов:

- **PlasmaPy** – открытая библиотека на Python для плазменной физики. Содержит набор общих функций и моделей, часто используемых исследователями по всему миру ⁸⁸ . Включает модули для работы с частицами, формуляр (расчёт основных параметров), планируется модуль для базового моделирования плазмы ⁸⁹ . Подходит для обучения и начальных оценок.
- **OMAS/IMAS** – интегрированный пакет для моделей ITER. **OMAS** – это Python-библиотека, облегчающая взаимодействие с **Integrated Modeling & Analysis Suite** ITER ⁹⁰ . **IMAS** представляет собой каркас, где объединяются различные коды (транспорт, МГД, нейтроника и т.д.) под общей структурой данных. **OMAS** позволяет загружать/выгружать данные разряда ITER, запускать связки кодов и проводить анализ.
- **Bluemira** – открытый междисциплинарный инструмент для проектирования будущих реакторов ⁹¹ . Представляет собой платформу, где можно моделировать различные подсистемы реактора (магниты, охлаждение, нейтронные нагрузки) совместно, оценивая общую инженерную конфигурацию. Полезен на этапе концептуального проектирования электростанций.
- **Cherab** – фреймворк моделирования спектроскопии плазмы ⁹² . Позволяет рассчитывать излучение плазмы, спектральные линии, наблюдаемые диагностикой, и таким образом

сопоставлять эксперименты с теорией. Полезен для разработки и интерпретации оптических и рентгеновских диагностик.

- **BOU++** – открытый код для нелинейного **МГД/флюидного моделирования** плазмы ⁹³. Особенно популярен для изучения турбулентности на краю плазмы, ELM и других локализованных неустойчивостей. Написан на C++ с параллелизацией, позволяет задать геометрию токамаков и стеллараторов.
- **tofu** – (Tomography for Fusion) – Python-библиотека для **синтетических диагностик и томографии** ⁹⁴. Применяется, чтобы моделировать сигнал диагностик по известному распределению величин в плазме и решать обратную задачу восстановления внутренней структуры (например, томография излучения плазмы). Полезна для разработки диагностических методов.
- **Aurora** – современный пакет на Python для моделирования **примесей и излучения** в плазме ⁹⁵. Используется для расчёта транспортных уравнений примесей (например, эволюция профиля impurity при впрыске аргоновых гранул) и связанного с ними излучения, что важно для прогнозирования радиационных потерь и методов радиационного охлаждения плазмы.
- **FreeGS / FreeGSNKE** – семейство открытых кодов для решения уравнения **Града-Шафранова** (вычисление магнитного равновесия) ⁹⁶. FreeGS – 2D решатель задачи равновесия (определяет форму магнитных поверхностей плазмы) с бесплатной границей; FreeGSNKE – расширенная версия с численным решением методом Ньютона-Крылова. Эти инструменты позволяют реконструировать равновесие плазмы по измерениям или заданным токам в катушках.
- **PLEQUE** – Python-фреймворк для удобной работы с равновесиями плазмы ⁹⁷. Позволяет загружать результаты Grad-Shafranov решателей (например, EFIT), извлекать профили, находить точки X, рассчитывать параметры магнитных поверхностей и т.д. Ускоряет анализ конфигураций плазмы.
- **DESC** – Stellarator Optimization Package – открытый код для оптимизации стелларатора ⁹⁸. Использует градиентные методы для подбора формы магнитных поверхностей и катушек стелларатора, максимизируя некоторые показатели (например, объём плазмы, конфайнмент). Это важный инструмент, учитывая сложность ручной оптимизации стеллараторных конфигураций.
- **KSTAR-NN** – открытый симулятор токамака KSTAR с использованием нейросетей ⁷⁸. Вероятно, включает обученные модели для различных подсистем KSTAR (транспорт, токовая разгрузка и т.д.), позволяя быстро воспроизводить поведение установки. Может служить тестовой площадкой для алгоритмов управления.
- **PROCESS** – системный код UKAEA для оценки параметров реактора ⁹⁹. Решает в самосогласованном виде баланс мощностей, параметры плазмы, требования к магнитам и другим системам для заданного уровня производительности реактора. Позволяет оптимизировать некоторые целевые функции (например, минимизировать стоимость энергии) ⁹⁹. Использовался при проектировании DEMO в ЕС.
- **Paramak** – библиотека на Python для **параметрического CAD-моделирования** реакторов ¹⁰⁰. С её помощью можно программно создавать 3D-модели компонентов (камера, blanket, магнитная система) по заданным параметрам и даже сразу получать совместимые с нейтронным расчётом геометрии. Очень упрощает работу по созданию проектов реакторов и тестированию их в нейтронных кодах.
- **FIDASIM** – пакет моделирования диагностики быстрых нейтральных атомов (FIDA) и пучков нейтрального тока ¹⁰¹. Позволяет рассчитывать, как нейтральный пучок взаимодействует с плазмой, какой сигнал дадут детекторы FIDA, что необходимо для измерения функций

распределения быстрых ионов. Широко используется на многих токамаках с установками нейтрального пучка.

- **PINT** – Python Integrated Tokamak Model – минималистичный интегрированный транспортный код для токамаков (1D по радиусу) ¹⁰². Решает уравнения переноса частиц и энергии, может использоваться для быстрых оценок профилей температуры и плотности.
- **QuaLiKiz** – *Quasilinear Gyrokinetic* код, упрощенный и ускоренный для включения в системные расчёты ¹⁰³. Позволяет быстро рассчитывать коэффициенты турбулентного транспорта в плазме на основе параметров (в отличие от первых принципов, делая приближенно, но за миллисекунды). Встроен в некоторые средства моделирования разряда, чтобы давать реалистичные значения аномального транспорта без тяжёлых вычислений.
- **HEAT** – Heat Flux Engineering Analysis Toolkit – набор инструментов для оценки **тепловых потоков на элементы первого стенда** ¹⁰⁴. Помогает спрогнозировать, какой тепловой нагрузке подвергнутся плазменно-граничащие компоненты (дивертор, плазмостабилизирующие плитки) и какова будет их температура. Очень важен для проектирования материалов и систем отвода тепла.
- **TORAX** – упоминавшийся симулятор DeepMind, открытый и доступный профессиональный код для **быстрого моделирования токамака** ¹⁰⁵. Он дифференцируемый (можно считать производные по параметрам), что позволяет использовать его в оптимизационных циклах. Покрывает физику токамака в 0D/1D приближении (core plasma transport, эволюция параметров импульса) и интегрируется с инструментами контроля.
- **MHD, транспорт, нейтронные и инженерные коды** – помимо вышеперечисленных, существует множество профессиональных кодов, часто закрытых или узкоспециализированных. Например: **TRANSP** (США) – инструмент анализа/предсказания разряда, **ASTRA** (Европа) – 1.5D транспортный код, **JINTRAC** (JET) – пакет нескольких модулей для интегрированного моделирования, **NIMROD**, **M3D-C1** – коды для нелинейного MHD, **MCNP**, **GEANT4**, **OpenMC** – нейтронные монте-карло коды для расчёта радиации в реакторе, **ANSYS**, **COMSOL** – общие индустриальные пакеты для тепловых, механических и электромагнитных расчётов компонентов реактора. Их тоже можно считать частью экосистемы симуляторов термояда. Многие из них не открыты, но широко используются в научном сообществе. Например, MCNP применялся при расчётах нейтронных потоков на ITER, а ANSYS – при проектировании магнитов и вакуумной камеры.

В заключение, открытые инструменты все активнее развиваются. Сообщество исследователей термояда стремится к открытой науке: на GitHub поддерживается список из десятков проектов open-source для магнитного синтеза ¹⁰⁶ ⁹³. Это способствует привлечению новых специалистов (в том числе из сферы Data Science) и ускоряет прогресс, поскольку модели и данные становятся доступнее. Сочетание мощных симуляторов и методов искусственного интеллекта уже сейчас приносит плоды – от удержания плазмы в токамаке рекордное время до автоматизации анализа экспериментов. В перспективе, именно синергия ИИ и физических моделей позволит преодолеть оставшиеся барьеры на пути к коммерческому термоядерному реактору, сделав управление «искусственным солнцем» надежным и эффективным.

Источники и ссылки:

1. DeepMind & EPFL – Управление плазмой токамака с помощью глубокого обучения ⁷ ⁶
2. DOE/Princeton – Предотвращение неустойчивостей плазмы через deep reinforcement learning

¹⁰ ¹¹

3. Futura Science – Обзор ИИ в управлении термоядерной плазмой (достижения DeepMind, предсказание сбоев, цифровые двойники) 26 54
4. iXBT – Ускорение моделирования плазмы нейросетью FPL-net (UNIST, 2025) 44 48
5. PPPL News – ИИ для предотвращения срывов на DIII-D (Y. Fu et al., 2020) 107 108
6. DoE Fusion – Избежание tearing-нестабильности с помощью RL (Nature 2024) 12 13
7. DeepMind Blog – Партнерство с CFS (SPARC) и выпуск симулятора TORAX (2025) 33 35
8. 22century.ru – Статья на русском о проекте DeepMind по управлению плазмой (TCV, 2022) 8 9
9. IPP (Max-Planck) – ИИ в исследовании плазмы (обнаружение выбросов, равновесие W7-X) 16 21
10. IAEA TM 2024 – Применение ИИ на токамаке EAST (Xiao B. и др.) 29 68
11. EUROfusion News – 15 новых проектов ИИ для синтеза (2024) 49 62
12. Tokamak Energy Blog – О важности цифровых двойников и ИИ для ускорения разработки (2024) 79 84
13. GitHub – Список open-source проектов по термояду (kripnerl/fusion-open-source) 90 93

1 20 26 27 28 42 43 53 54 58 59 Nuclear fusion meets AI: plasma feats that are leaving researchers speechless - Futura-Sciences

https://www.futura-sciences.com/en/nuclear-fusion-meets-ai-plasma-feats-that-are-leaving-researchers-speechless_21036/

2 16 17 18 21 23 75 76 77 81 Artificial intelligence in fusion research

https://www.ipp.mpg.de/5372351/ki_in_der_Fusionsforschung_2023

3 4 14 15 38 39 40 41 52 56 63 64 Using artificial intelligence to speed up and improve the most computationally intensive aspects of plasma physics in fusion | Princeton Plasma Physics Laboratory

<https://www.pppl.gov/news/2024/using-artificial-intelligence-speed-and-improve-most-computationally-intensive-aspects>

5 7 Accelerating fusion science through learned plasma control - Google DeepMind

<https://deepmind.google/blog/accelerating-fusion-science-through-learned-plasma-control/>

6 8 9 Искусственный интеллект для управляемого термоядерного синтеза

<https://22century.ru/energetics/105772>

10 11 12 13 AI Tackles Disruptive Tearing Instability in Fusion Plasma | Department of Energy

<https://www.energy.gov/science/fes/articles/ai-tackles-disruptive-tearing-instability-fusion-plasma>

19 Detecting Plasma Detachment in the Wendelstein 7-X Stellarator ...

<https://www.mdpi.com/2076-3417/12/1/269>

22 29 30 66 67 68 69 conferences.iaea.org

<https://conferences.iaea.org/event/377/contributions/31638/contribution.pdf>

24 25 107 108 Artificial intelligence helps prevent disruptions in fusion devices | Princeton Plasma Physics Laboratory

<https://www.pppl.gov/news/2021/artificial-intelligence-helps-prevent-disruptions-fusion-devices>

31 32 49 50 51 60 61 62 65 80 82 85 EUROfusion spearheads advances in Artificial Intelligence and Machine Learning to unlock fusion energy - EUROfusion

<https://euro-fusion.org/eurofusion-news/eurofusion-spearheads-advances-in-artificial-intelligence-and-machine-learning-to-unlock-fusion-energy/>

33 34 35 36 37 70 71 72 73 83 86 87 Google DeepMind is bringing AI to the next generation of fusion energy - Google DeepMind

<https://deepmind.google/blog/bringing-ai-to-the-next-generation-of-fusion-energy/>

44 45 46 47 48 При помощи нейросетей удалось ускорить моделирование плазмы для термоядерного синтеза в 1000 раз

<https://www.ixbt.com/news/2025/03/02/pri-pomoshi-nejrosetej-udalos-uskorit-modelirovanie-plazmy-dlja-termojadernogo-sinteza-v-1000-raz.html>

55 A machine learning case study in nuclear fusion: Assessment of the ...

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666546825000588>

57 78 88 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 105 106 GitHub - kripnerl/fusion-open-source: List of interesting fusion open source projects

<https://github.com/kripnerl/fusion-open-source>

74 79 84 AI will accelerate path to clean fusion energy in fight against climate change - Tokamak Energy

<https://tokamakenergy.com/2024/01/17/ai-will-accelerate-path-to-clean-fusion-energy-in-fight-against-climate-change/>

89 conferences.iaea.org

https://conferences.iaea.org/event/255/contributions/19573/attachments/10665/15457/Murphy_OpenSource_IAEA2021.pdf