

УДК 004.896

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

*Андреанов А.А., Залужный А.А., Мицкевич А.В., Пономарев А.В., Птицын П.Б.**(Частное учреждение «Наука и инновации», г. Москва)*

e-mail: aazaluzhnyy@rosatom.ru

Методы искусственного интеллекта способны обрабатывать значительный массив информации из разных источников, способствуя решению актуальных задач, инициировать технологический прогресс в разных направлениях. Искусственный интеллект является обширной областью знаний, направленной на разработку программного обеспечения и создание устройств, которые имитируют интеллектуальные функции человека, включая анализ данных и принятие решений. Методы искусственного интеллекта опираются на три основных компонента: машинное обучение, вычислительные мощности и размеченные структурированные данные.

В настоящее время алгоритмы и вычислительные ресурсы имеются в наличии, однако качественных достоверных данных недостаточно. За годы эксплуатации АЭС накоплен большой объем недостаточно используемых данных, от которых зависит использование методов искусственного интеллекта. В 2016 г. в АО «Концерн Росэнергоатом» был создан и реализован в рамках автоматизированной системы управления технической документацией архив технической документации, регламентирующий безопасную эксплуатацию энергоблоков АС. В центральном аппарате концерна и на двух АЭС был создан и апробирован прототип системы поиска неструктурированных данных эксплуатации атомных станций в различных источниках информации. В этой связи в ядерной энергетике искусственный интеллект имеет значительный потенциал использования.

Экспоненциальный рост областей применения искусственного интеллекта в последние десятилетия приводит к появлению новых возможностей и проблем с точки зрения повышения безопасности и эффективности эксплуатации. Применение искусственного интеллекта в атомной промышленности способно оптимизировать эксплуатацию и обслуживание атомных электростанций с учетом снижения расходов на топливный цикл, вывод из эксплуатации и обращение с отработавшим ядерным топливом [1].

ЯДЕРНЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ

Ядерный топливный цикл представляет собой совокупность промышленных процессов, обеспечивающих производство электроэнергии в реакторах от добычи урана до обращения с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами.

Разведка и добыча урана. Методы искусственного интеллекта могут применяться для обработки большого массива данных аэрогеофизической съемки высокого разрешения. Используя алгоритмы машинного обучения, искусственный интеллект способен анализировать эти изображения для идентификации геологических структур, указывающих на месторождения полезных ископаемых. Возможность быстро обрабатывать и интерпретировать изображения позволит ускорить и повысить точность разведки [2].

Оценка концентрации урана в руде также может быть выполнена с использованием искусственного интеллекта, в частности, с помощью машинного обучения и обработки данных гамма-спектрометрии.

Обогащение урана. Для использования в энергетических реакторах оксид урана, добываемый из руды, должен быть обогащен ^{235}U . В основном процессе обогащения на промышленных предприятиях наиболее распространенным оборудованием являются газовые центрифуги. В газовой центрифуге сочетаются гиперзвуковые волны, разреженные области и области непрерывного потока газа, опирающиеся на законы газодинамики. Этот комплекс трудно моделировать с использованием феноменологической модели. Альтернативой для моделирования таких сложных задач являются нейронные сети.

Газовые центрифуги являются дорогостоящим оборудованием, поэтому их моделирование позволит до начала строительства предприятия верифицировать проект, проведя испытания в имитационных условиях с учетом риска и допусков в процессе производства.

Изготовление топлива. Из диоксида урана необходимой степени обогащения прессуют топливные таблетки, которые затем спекаются при высокой температуре (более 1400 °С). На качество таблеток влияют свойства поверхности, содержание влаги, примесей, поверхностные дефекты, стехиометрия и др. Производство ядерного топлива требует точного контроля многих технологических параметров для получения конечного продукта, соответствующего строгим техническим требованиям. Повышение выхода готовой продукции является одной из важных задач в производстве ядерного топлива.

Для создания автоматизированного, производительного и точного алгоритма, позволяющего свести к минимуму человеческие ошибки, а также сократить время и снизить стоимость изготовления топливных таблеток на предприятии, также возможно использование методов искусственного интеллекта [3].

Обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами. Переработка отработавшего ядерного топлива способна эффективно улучшить использование ресурсов и уменьшить количество высокоактивных отходов. Методы искусственного интеллекта могут быть применены к таким завершающим стадиям ядерного топливного цикла, как:

- разработка систем экспресс-анализа и сквозного многоуровневого моделирования физико-химических и технологических процессов;

- создание информационных экспертных систем, обеспечивающих сопряжение и интеграцию разнородных архивов экспериментальных и расчетных данных для предиктивной аналитики и информационной поддержки персонала;

- решение частных производственных задач, требующих обработки большого массива специализированных данных для поддержки принятия производственных решений.

Проектирование АЭС. Оптимизация конструкции реактора для повышения безопасности и экономичности является важным направлением использования методов искусственного интеллекта.

Активная зона ядерного реактора является наиболее важной среди других систем АЭС. Управление топливом обуславливает распределение мощности и экономию топлива. В активной зоне необходимо оптимизировать размеще-

ние ядерного топлива для минимизации затрат на производство электроэнергии с учетом эксплуатационных ограничений и ограничений безопасности. В качестве критерия оптимизации может быть выбрано выгорание топлива, которое оценивается после выгрузки ТВС из активной зоны. Так, генетические алгоритмы показали себя надежным инструментом в исследованиях управления ядерным топливом [4].

Теплогидравлический анализ фокусируется на течении и теплопередаче теплоносителя в ядерном реакторе. Для безопасности и повышения экономичности реактора необходима эффективная теплопередача, гарантирующая целостность активной зоны в переходных или аварийных условиях. Однако традиционное теплогидравлическое проектирование требует выполнения значительного объема моделирования и сложных расчетов, что приводит к длительным временным затратам. Для ускорения вычислений возможно использование методов искусственного интеллекта для быстрого прогнозирования важных тепловых параметров активной зоны ЯЭУ и расчета двухфазных потоков и явлений теплообмена при кипении [5].

Радиационная защита имеет большое значение, особенно для ЯЭУ судов или космических аппаратов. Проектирование радиационной защиты требует не только соответствия заданной площади пределу дозы излучения, но и строгого контроля массы и объема системы защиты, что по своей сути является многоцелевой оптимизационной задачей доза—масса—объем. Однако проблемой для существующих методов является низкая вычислительная эффективность в многомерных задачах.

Для эффективного решения одно- и многоцелевых задач оптимизации при проектировании радиационной защиты ЯЭУ также возможно использование методов искусственного интеллекта [6].

Эксплуатация АЭС. Улучшение эксплуатации и обслуживания играет важную роль в повышении безопасности и экономичности АЭС. С увеличением срока службы материалы деградируют, что негативно влияет на оборудование и не позволяет ему функционировать так, как запланировано проектом. Вероятность отказа насосов, клапанов и электронных устройств со временем увеличивается, запас прочности труб и сосудов под давлением уменьшается.

Снижение затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание является эффективной мерой для улучшения экономических показателей АЭС.

Мониторинг состояния в режиме реального времени. Мониторинг состояния АЭС в режиме on-line — это комплексная технология, которая применяется на АЭС для достижения трех целей:

точный контроль параметров безопасности и обеспечение эффективных корректирующих действий;

устранение чрезмерного консерватизма в процедурах эксплуатации реактора и улучшение экономичности при обеспечении безопасности реактора;

планирование более экономичной схемы перегрузки топлива на основе распределения его выгорания в конце топливной кампании.

Разработка технологии цифровых двойников открыла новые перспективы для такого мониторинга. Цифровой двойник представляет собой зеркальное отражение объекта АЭС, спроецированный из физического пространства в киберпространство. При эксплуатации ЯЭУ ее цифровой двойник способен получить информацию, которую невозможно извлечь с помощью датчиков. Для облегчения принятия решений в реальном времени на цифровом двойнике проводятся высокоточные симуляции для изучения последствий разных операций [7].

Диагностика неисправностей. При эксплуатации АЭС в системах и оборудовании могут возникать неисправности, способные негативно влиять на надежность. В настоящее время для диагностики неисправностей широкое распространение получил искусственный интеллект. Диагностику неисправностей АЭС можно разделить на две категории: уровень системы и уровень компонентов. На уровне системы можно диагностировать сотни возможных нештатных ситуаций и тысячи параметров станции, требующих контроля, с помощью двухканальной конволюционной нейронной сети [8].

Диагностика неисправностей компонентов АЭС более многочисленна и разнообразна. Методы искусственного интеллекта применимы для повышения устойчивости к ложным срабатываниям и обнаружения при отказах вращающегося оборудования и узлов, приводов различного рода, датчиков.

Методы предиктивного техобслуживания на основе искусственного интеллекта. Они разделяются на две категории:

прямое отображение — модели машинного обучения используются для прямого установления связи между данными мониторинга датчиков и сроком службы оборудования;

моделирование дегенеративной траектории — деградация оборудования описывается с помощью метрики траектории деградации, для подгонки профиля траектории используются методы машинного обучения.

В некоторых случаях выполнение операций требует от персонала АЭС действий в условиях психологического давления или повышенной нагрузки, что увеличивает вероятность ошибок и повышает риски разного рода. Многие из подобных рисков могут быть снижены в результате использования для автоматизации методов искусственного интеллекта и анализа больших данных. Иные задачи могут быть рутинными, но отнимающими много времени для их выполнения.

Методы машинного обучения позволяют автоматизировать разные процессы — от анализа сложных технологических данных до облегчения принятия решений и улучшения рабочих процессов [9].

Другие важные области применения искусственного интеллекта связаны с автоматизацией и обнаружением аномалий, принятием решений и анализом отчетов. Аномалия процесса или оборудования способна приводить к состояниям, о которых оператор АЭС не знает до тех пор, пока она не вызовет достаточные для обнаружения изменения. Методы машинного обучения способны изучать тенденции данных и расширять осведомленность оператора о наличии таких аномалий [10].

Внедрение цифровых систем и сетей также приводит к уязвимости в области кибербезопасности, которую необходимо тщательно рассмотреть, предотвратить и смягчить. В настоящее время с использованием методов искусственного интеллекта разработаны системы интеллектуального обнаружения вторжений на основе изображений, а также распознавания движения для обнаружения физического проникновения на АЭС [11].

Вывод АЭС из эксплуатации. Вывод из эксплуатации объекта использования атомной энергии представляет собой деятельность, исключаящую его применение по проектному назначению вплоть до полного или частичного освобождения от радиационного контроля органов государственного регулирования безопасности.

В число проводимых мероприятий входит комплексное инженерное и радиационное обследование, предполагающее сбор и анализ соответствующей текущему состоянию объекта информации о его инженерном и радиационном состоянии. Оно необходимо для разработки проекта вывода объекта из эксплуатации, содержащего в том числе оценки стоимости работ, которая на практике имеет значительную погрешность вследствие, в первую очередь, отсутствия у проектировщиков информации о фактической инженерной конфигурации и возможностей достоверного совмещения данных радиационной обстановки на объекте с его инженерной конфигурацией. В проведении такого обследования могут оказать помощь методы искусственного интеллекта, в частности, в сборе и анализе информации как о радиационной обстановке, так и об инженерных и топологических особенностях конкретного объекта.

МЕТОДЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В МЕДИЦИНЕ

Искусственный интеллект в здравоохранении позволит ускорить развитие медицинской науки и методов. МАГАТЭ выделяет радиотерапию и медицинскую физику, медицинскую визуализацию и ядерную медицину [12].

Несмотря на рост числа научных публикаций, инструменты на основе искусственного интеллекта не получили широкого распространения в радиотерапии, включая медицинскую физику, из-за рисков непредвиденных последствий, сложностей в клиническом использовании таких инструментов, а также проблем в технической, этической и правовой областях, включая защиту конфиденциальности данных пациентов.

В области медицинской визуализации методы искусственного интеллекта облегчают выполнение разных клинических задач, включая обработку изображений и компьютерную диагностику для выявления патологий, корегистра-

цию изображений, дозиметрию для конкретного пациента или прогнозирование клинических исходов.

Методы искусственного интеллекта показывают успехи в скрининге рака груди и легких. Искусственный интеллект также обладает прогностическим потенциалом в сочетании, например, с радиомикой [13]. Радиомика занимается объективизацией и количественной оценкой разных метрик (плотности, формы, однородности и др.) тканей зон интереса, которые не видны или не могут быть интерпретированы при визуальном исследовании, но могут быть вычислены на основе анализа текстуры цифровых изображений (КТ, МРТ, УЗИ, ПЭТ).

ОПТИМИЗАЦИЯ, ПЛАНИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО УТС, ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ, УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ, ПОЛУЧЕНИЮ ЯДЕРНЫХ ДАННЫХ И ДР.

В ядерной физике предпринимаются усилия по применению методов искусственного интеллекта. Ускорение вычислений в узких местах теоретических расчетов и моделировании, а также в анализе данных облегчает научные исследования [14]. Усилия направлены на эксплуатацию установок, оптимизацию и проектирование экспериментов, обработку, управление и анализ данных, а также теоретическое моделирование. В настоящее время машинное обучение используется для ускорения обработки данных и улучшения качества записанных данных.

Применение методов искусственного интеллекта позволило минимизировать влияние внешних факторов и отклонений в сложных системах ускорителей, а также быстро обнаружить неисправности во время их работы.

В термоядерных исследованиях искусственный интеллект и машинное обучение эффективны в решении проблем прогнозирования и моделирования.

Отдельно следует отметить возможности методов искусственного интеллекта в поиске, отборе, структурировании и анализе научно-технической информации в целом. Число публикуемых материалов в настоящее время возрастает экспоненциально, возможности методов искусственного интеллекта в извлечении содержания из текста, диаграмм, рисунков и др., кластеризации научных направлений способны оказать существенную поддержку в выделении

перспективных или вновь формирующихся научных направлений, особенно в междисциплинарных областях.

ЯДЕРНАЯ И ФИЗИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, ГАРАНТИИ МАГАТЭ

Сбор и интерпретация данных являются важными компонентами любой деятельности в области ядерной безопасности. Искусственный интеллект способен обеспечить улучшенный анализ данных и поддерживать их обработку в дополнение к поддержке принятия решений в деятельности по ядерной безопасности.

В ядерной криминалистике искусственный интеллект применяется для повышения эффективности системного подхода, который используется для формирования выводов при расследовании. Это связано с тем, что ни один отдельный параметр не может служить основой для окончательных выводов с высокой степенью достоверности, обычно в оценку включается несколько параметров, что формирует многомерную проблему для анализа, которую возможно решить с использованием методов искусственного интеллекта.

В рамках деятельности по обеспечению гарантий нераспространения делящихся материалов МАГАТЭ проводит инспекции на местах, чтобы убедиться, что государства используют ядерный материал в мирных целях и этот материал не перенаправляется на военные нужды. Инспекции, как правило, приводят к получению большого объема разнородных инструментальных данных. В связи с увеличением количества материала, находящегося под гарантиями, и внедрением новых методов измерений и датчиков объем данных и число инспекций возрастают. Эти большие наборы данных могут использоваться для различных приложений: классификации данных, поиска закономерностей и выявления аномалий в них. Это те области, в которых искусственный интеллект может значительно повысить эффективность деятельности по направлению гарантий МАГАТЭ.

ОТКРЫТЫЕ ВОПРОСЫ

Методы искусственного интеллекта, в частности, машинного и глубокого обучения в ядерной энергетике подтверждаются практическими

работами и исследованиями [1]. Однако сохраняются сомнения в том, что они могут быть масштабированы на другие реальные проблемы АЭС. Это связано, в первую очередь, с тем, что часть данных, используемых для обучения и тестирования моделей, получена в результате имитационных расчетов из-за высоких затрат на сбор экспериментальных данных АЭС, а также риска воспроизведения некоторых сложных условий эксплуатации, например, сценариев тяжелых аварий. Поэтому для модели искусственного интеллекта информационные характеристики, которые представлены данными, используемыми для обучения в неявном пространстве, вероятно, будут значительно отличаться от реальных. В этой связи требуется разработка стандартных наборов данных для конкретных целей в области ядерных реакторов, чтобы определить лучшую модель искусственного интеллекта.

Другая проблема заключается в том, что искусственный интеллект на основе алгоритмов глубокого обучения, по сути, представляет собой «черный ящик». Модели с лучшей производительностью обычно имеют более сложный внутренний механизм и поэтому трудно объяснимы, в то время как модели с более ясным механизмом (линейные модели и модели, основанные на правилах) не способны решать некоторые сложные нелинейные проблемы. Идеальная модель должна обладать как хорошей производительностью, так и высокой объяснимостью.

Требования к безопасности являются одним из важных критериев при проектировании и эксплуатации ядерных реакторов. Поэтому для дальнейшего развития совместного использования искусственного интеллекта и ядерных технологий необходимо улучшать прозрачность, надежность и подотчетность моделей искусственного интеллекта.

Одним из выводов состоявшегося в 2023 г. Технического совещания МАГАТЭ «Безопасность использования искусственного интеллекта на атомных электростанциях» было утверждение, что, хотя искусственный интеллект имеет широкие перспективы использования как в атомной отрасли в целом, так и на АЭС в частности, первое внедрение методов искусственного интеллекта в практическую деятельность не будет связано с вопросами безопасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ядерная энергетика является консервативной отраслью с точки зрения внедрения инноваций, поэтому первые внедрения методов искусственного интеллекта будут осторожными. Тем не менее с появлением соответствующих вычислительных мощностей и средств анализа данных атомная промышленность также начнет использовать методы искусственного интеллекта для решения перспективных задач, способных изменить подходы к проектированию, лицензированию и эксплуатации ядерных систем.

Быстрое внедрение методов искусственного интеллекта и машинного обучения также способно оказать влияние на развитие ядерной физики и библиотек ядерных данных.

Применение методов искусственного интеллекта не исключает участия человека (экспертов, персонала и др.), но упрощает и оптимизирует его работу, снижая влияние человеческого фактора на результаты. При этом окончательное решение все же должен принимать человек с учетом результатов, полученных с использованием методов искусственного интеллекта.

Достаточно остро в целом и для атомной промышленности в частности стоит вопрос о достоверности данных, предназначенных для обучения моделей. Данные могут оказаться противоречивыми и недостоверными. Поэтому они должны подтверждаться разработчиком, их достоверность, полнота и достаточность должны оцениваться регулятором.

Другим острым вопросом представляется объяснимость моделей искусственного интеллекта. Поэтому для дальнейшего развития совместного использования искусственного интеллекта и ядерных технологий необходимо улучшать прозрачность, надежность и подотчетность моделей.

Еще один вопрос, требующий решения, — нормативное регулирование использования методов искусственного интеллекта в атомной отрасли и других секторах электроэнергетики. Возможно, на уровне федерального законодательства потребуется гармонизация существующих норм и правил.

В целом можно констатировать, что в настоящее время методы и инструменты ис-

кусственного интеллекта используются в атомной отрасли для решения локальных задач. В перспективе область применения этих инструментов будет расширяться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лысачев М.Н., Прохоров А.Н. Искусственный интеллект. Анализ, тренды, мировой опыт. М.: Константа, 2023. 460 с.
2. Bournas N., Touré A., Balboné M. e.a. Use of machine learning techniques on airborne geophysical data for mineral resources exploration in Burkina Faso. — ASEG, 2019, v. 2019, № 1, p. 1—4.
3. Charatsidou E. A Machine Learning Approach to the Nuclear Fuel Fabrication Process. Master Thesis. Stockholm, KTH Royal Institute of Technology, 2020. 48 p.
4. Sobolev A.V., Gazetdinov A.S., Samokhin D.S. Genetic algorithms for nuclear reactor fuel load and reload optimization problems. — Nucl. Engng Techn., 2017, v. 3, № 3, p. 231—235.
5. Lu Q., Yuan Y., Li F. e.a. Prediction method for thermal-hydraulic parameters of nuclear reactor system based on deep learning algorithm. — Appl. Thermal Engng, 2021, v. 196, p. 117272.
6. Huang Q., Peng S., Deng J. e.a. A review of the application of artificial intelligence to nuclear reactors: where we are and what's next. — Heliyon, 2023, v. 9, № 3, p. e13883.
7. Gong H., Cheng S., Chen Z., Li Q. Data-enabled physics-informed machine learning for reduced-order modeling digital twin: application to nuclear reactor physics. — Nucl. Sci. Engng, 2022, v. 196, № 6, p. 668—693.
8. Lee G., Lee S., Lee C. A convolutional neural network model for abnormality diagnosis in a nuclear power plant. — Appl. Soft Comp., 2020, v. 99, p. 106874.
9. Virkkunen I., Koskinen T., Jessen-Juhler O., Rinta-aho J. Augmented ultrasonic data for machine learning. — Nondestructive Evaluation, 2019, v. 40, № 4, p. 11.
10. Farber J., Rashadan A., Abdel-Khalik H. e.a. Process Anomaly Detection for Sparsely Labeled Events in Nuclear Power Plants. INL/EXT-21-64303. 2021. [Электронный ресурс]. URL: https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/Sort_53081.pdf (дата обращения: 27.12.2024).
11. Kim S., Lim S., Kim D. Intelligent intrusion detection system featuring a virtual fence, active intruder detection, classification, tracking, and action recognition. — Ann. Nucl. Energy, 2017, v. 112, p. 845—855.
12. Artificial Intelligence for Accelerating Nuclear Applications, Science and Technology. Vienna: IAEA, 2022.
13. Annunziata S., Treglia G. Editorial: radiomics and artificial intelligence in radiology and nuclear medicine. — Front. Med., 2023, v. 10, p. 1216434.
14. Boehnlein A., Diefenthaler M., Sato N. e.a. Colloquium: machine learning in nuclear physics. — Rev. Modern Phys., 2022, v. 94, № 3, p. 32.

Поступила в Редакцию 23.07.24