



Место искусственного интеллекта в решении проблем компьютерного моделирования и расчетного анализа в целях укрепления ядерной инфраструктуры в Республике Беларусь

С. Н. Сытова

Институт ядерных проблем БГУ

sytova@inp.bsu.by

Введение



В мире атомной энергетики и обеспечения ядерной и радиационной безопасности не существует одного единственного программного средства (ПС) для компьютерного моделирования и расчетного анализа в данной области. Для решения разных задач – от моделирования физики реактора до оценки радиационных рисков при авариях – используется ряд специализированных кодов и пакетов, признанных на международном уровне.

Признание ПС включает их тщательную верификацию и валидацию.

Экспертиза (аттестация) ПС – это не разовое действие, а непрерывный и строго документированный процесс, объединяющий математические проверки, сравнение с физическим экспериментом и строгие процедуры контроля качества.

В РФ экспертиза программ проводится во исполнение требований статьи 26 Федерального закона от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» ФБУ «НТЦ ЯРБ» в соответствии с Решением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 10 июня 2013 г.

Обзор ПС в области моделирования процессов в атомной энергетике



Системный анализ тепло- и массообмена, системная теплогидравлика

- **RELAP5 / RELAP5-3D**. Разработанный в Национальной лаборатории Айдахо (INL), этот код признан *международным золотым стандартом* для анализа безопасности реакторов, их проектирования и обучения операторов. Изначально созданный для водо-водяных реакторов (PWR), сейчас он также используется для моделирования газоохлаждаемых, натриевых и солевых реакторов. Он прошел валидацию на обширной экспериментальной базе и признан NRC (Комиссией по ядерному регулированию США – Nuclear Regulatory Commission) для лицензирования.
- **Коды Westinghouse** (WCOBRA/TRAC, LOFTRAN, NOTRUMP, WGOETHIC). Эти коды, разработанные компанией Westinghouse, одной из ведущих электротехнических компаний США, широко используются в мире, в том числе и в Китае для лицензирования реакторов AP1000 и CAP1400. Регуляторы, например, в Китае, часто утверждают их к использованию после проверки зарубежными надзорными органами, такими как NRC (США).
- **ATHLET**. Развита в Германии (GRS – Общество по безопасности установок и реакторов, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit), применяется для моделирования широкого спектра течей и системных сбоев в различных типах реакторов.
- **CATHARE**. Французский код (CEA, Framatome, IRSN) для обоснования безопасности PWR.

Обзор ПС в области моделирования процессов в атомной энергетике



Нейтронная физика и реакторные расчеты

- **MCNP**. Универсальный код Монте-Карло для детального моделирования переноса нейтронов, фотонов и электронов.
- **SCALE** (США, ORNL). Это комплексный пакет инструментов от Оакриджской национальной лаборатории (ORNL), который используется уже более 30 лет. SCALE включает в себя как детерминистические, так и Монте-Карло решатели для критической безопасности, физики реактора, радиационной защиты и анализа чувствительности. Он также является стандартом для многих регуляторов и лицензиатов.
- **SERPENT**. Монте-Карло код (VTT, Финляндия) для расчетов выгорания топлива и физики реакторов. Это один из самых известных в мире кодов для моделирования ядерных реакторов, основанный на методе Монте-Карло (моделирует перенос нейтронов и фотонов). Он широко используется более чем в 200 университетах и исследовательских организациях по всему миру (включая Массачусетский технологический институт и Кембридж), а также в коммерческих целях для проектирования реакторов (в том числе SMR) и в лицензионных расчетах.
- **CITATION / DYN3D**. Детерминированные коды для трехмерной кинетики и расчета распределения энерговыделения.

Обзор ПС в области моделирования процессов в атомной энергетике



Тяжелые аварии и безопасность контайнмента

- **MELCOR**. Интегральный код США (Sandia National Laboratory) для моделирования тяжелых аварий и плавки активной зоны.
- **ASTEC**. Совместная европейская разработка (IRSN, GRS) для анализа прогресса тяжелых аварий во всем контуре АЭС.
- **COCOSYS**. Инструмент анализа поведения защитной оболочки (контайнмента) при авариях.

Оценка радиационных рисков и аварийная готовность

- **HotSpot Health Physics Code**. Это широко признанный инструмент для быстрой оценки радиационных рисков при ядерных инцидентах, авариях или событиях с радиологическим оружием. Он моделирует атмосферный перенос радиоактивных материалов на короткие расстояния (до 10 км), позволяя оценить дозовые нагрузки и зоны загрязнения для принятия оперативных решений.

Проектирование электросистем АЭС

- **ETAP** для моделирования электроэнергетических систем, которое стало фактическим стандартом в США – 93% (57 из 61) американских АЭС используют его для обеспечения качества и надежности проектов. Оно используется ведущими инжиниринговыми компаниями отрасли, такими как Bechtel, Westinghouse и Framatome.

Коды с открытым исходным кодом на публичных репозиториях (GitHub/GitLab) под свободными лицензиями



Нейтронно-физические коды Монте-Карло (Аналоги Serpent)

- **OpenMC** (Лицензия MIT). Самый мощный, популярный и активно развивающийся в мире свободно распространяемый код Монте-Карло для расчета переноса нейтронов и фотонов. Разрабатывается MIT и Аргоннской национальной лабораторией (ANL). Полный аналог Serpent по функционалу. Считает критичность (k_{eff}), выгорание топлива (depletion), имеет глубокую интеграцию с Python API для генерации геометрии и пост-обработки данных (официальный GitHub OpenMC <https://github.com/openmc-dev/openmc>).
- **SCONE** (Лицензия GPL-3.0). Свободный стохастический код Монте-Карло, созданный в Кембриджском университете. Написан на современном Fortran 2008. Предназначен для академических исследований и прецизионных расчетов реакторов. Доступен на публичных репозиториях.
- **MC/DC** (Monte Carlo / Dynamic Code) (Лицензия BSD-3). Новый специализированный открытый код на Python/C++, оптимизированный под нестационарные динамические процессы (кинетику) переноса нейтронов во времени.

Коды с открытым исходным кодом на публичных репозиториях (GitHub/GitLab) под свободными лицензиями

Диффузионные коды и расчет констант (аналоги Ants)

Для быстрых трехмерных полномасштабных расчетов активных зон (вместо медленного Монте-Карло) применяются детерминистические программы:

- **Dragon v5** (Лицензия LGPL). Известный канадский проектный код для расчета ячеек реактора, гомогенизации и генерации многогрупповых макроконстант. Широко применяется по всему миру.
- **OpenMOC** (Лицензия MIT). Свободный код, использующий метод характеристик для высокоточного расчета распределения потока нейтронов в 2D/3D геометрии. Часто используется в связке с OpenMC.

Мультифизические платформы (аналоги Kraken)

Полноценную связанную экосистему (нейтроника + теплогидравлика + прочность) собирают на базе открытых конечно-элементных платформ:

- **MOOSE Framework** (Лицензия LGPL). Разработка INL. Это открытая среда для решения систем дифференциальных уравнений в частных производных. На базе MOOSE строятся такие открытые ядерные модули, как Pronghorn (крупносеточная теплогидравлика) и Bison (термомеханика топлива – аналог FINIX из Kraken).

Коды РФ

В РФ под санкциями традиционно опираются на собственные закрытые государственные коды, которые полностью импортонезависимы.

Ядерные коды в РФ традиционно считаются технологиями стратегического значения, поэтому их исходный код закрыт, а сами они являются интеллектуальной собственностью госкорпорации «Росатом», ИБРАЭ РАН или НИЦ «Курчатовский институт».

Линейка кодов проекта «Прорыв» (ИБРАЭ РАН) включает коды:

- **ЕВКЛИД** – интегральный код для анализа безопасности реакторов на быстрых нейтронах (сочетает нейтронику, теплогидравлику и поведение топлива).
- **СОКРАТ** – тяжелый системный код для моделирования запроектных аварий.
- **БЕРКУТ** – код для моделирования термомеханического поведения твэлов (аналог модуля FINIX в Kraken).

Коды «Курчатовского института» и ОКБ «Гидропресс» включают следующие ПС:

- **МСУ** – прецизионный код Монте-Карло для расчета переноса нейтронов (российский прямой аналог Serpent и MCNP).
- **БИПР / ПЕРМАК** – инженерные нодальные коды для расчета активных зон реакторов типа ВВЭР (аналог Ants).

Приоритеты в организации экспертизы и использовании программных средств в атомной отрасли для Беларуси

Для Республики Беларусь, которая стремится к эффективному и безопасному использованию ядерных технологий, расстановка приоритетов в области экспертизы и использования ПС должна строиться на трех стратегических китах:

- **безопасность как безусловный приоритет;**
- **развитие собственной компетенции для обеспечения независимости;**
- **стратегическая цифровизация для повышения эффективности.**

Для регулятора и оператора АЭС первоочередной задачей является внедрение и строгое соблюдение международных стандартов верификации и валидации (V&V) программного обеспечения, критичного для безопасности на всех этапах жизненного цикла.

Экспертиза должна подтверждать, что ПО правильно решает уравнения (верификация) и корректно моделирует реальные физические процессы (валидация).

Ошибки могут быть внесены на любом этапе – от проектирования до интеграции, поэтому процесс V&V должен быть непрерывным.

Стратегическая цифровизация для повышения эффективности



Ядерная отрасль все больше становится "цифровым предприятием".

Стратегический курс на технологический суверенитет подразумевает переход от монолитных систем к унифицированным цифровым платформам на всех этапах – от проектирования до эксплуатации.

Для Беларуси это означает развитие или адаптацию национальных решений для управления жизненным циклом оборудования, предиктивной аналитики и ремонтов, что снижает зависимость от внешних поставщиков в долгосрочной перспективе.

Однако рассматривая вопросы эффективности и экономической оправданности при ограниченных бюджетах, становится очевидным, что цифровизация должна быть нацелена на конкретные операционные улучшения, дающие измеримый экономический эффект через внедрение систем предиктивной аналитики и цифровых двойников, которые не требуют чрезмерных затрат на внедрение и поддержку.

Это позволяет перейти от планово-предупредительных ремонтов к обслуживанию по фактическому состоянию, помогает предотвращать дорогостоящие аварийные остановки, продлевать срок службы оборудования и, как результат, снижать себестоимость производства электроэнергии.

Что делать?



Для Беларуси с наличием компетентных кадров – физиков-ядерщиков, инженеров, программистов – дилемма в части использования ПС не сводится к простому выбору между "сделать всё самим" или "купить импортное".

Как показывает международный опыт, в том числе российский, оптимальная стратегия – это гибридный подход, сочетающий разумную самостоятельную разработку с использованием верифицированных зарубежных решений.

В этом случае страна не пытается создавать всё с нуля, а выборочно развивает собственные компетенции в критически важных областях, сохраняя гибкость и контроль.

Ключевой вопрос заключается не в том, чтобы делать или покупать, а в том, что именно делать и покупать.

Что делать?



Когда есть смысл разрабатывать ПО самостоятельно?

Для обеспечения стратегической независимости. Это самый весомый аргумент. Опыт России, где «Росатом» добился 92% импортозамещения в ключевых классах ПО, показывает, что это долгосрочный ответ на риски санкций и прекращения поддержки.

Для Беларуси это означает: независимость от внешних факторов, когда безопасность не будет зависеть от решений другого государства или компании, а также свободу развития, когда страна сама определяет, какие функции добавлять, не ожидая, пока западный производитель окупит свои инвестиции.

Для систем, критичных для безопасности, разработка собственного ПО для уникального или модернизируемого оборудования может быть оправдана, если готовые решения не полностью соответствуют требованиям.

Для развития уникальных национальных компетенций. Наличие сильной команды физиков и программистов должно стать главным белорусским активом.

Создание собственного ПО для нестандартных расчетов или задач может закрепить научное лидерство и стать точкой притяжения для талантов.

Место искусственного интеллекта в решении проблем компьютерного моделирования и расчетного анализа



Искусственный интеллект в области компьютерного моделирования и расчетного анализа для ядерной инфраструктуры в Беларуси может использоваться как инструмент ускорения расчетов - "вычислительный ускоритель" и "интеллектуальный суррогат", а также для анализа данных или генерации кода.

Его главная ценность – не замена фундаментальной физики, а преодоление "вычислительного барьера", который не позволяет проводить необходимые расчеты с нужной полнотой и скоростью.

Это означает возможность выполнять более глубокие расчеты обоснования безопасности и оптимизации, имея скромные вычислительные ресурсы.

Ключевые направления применения ИИ в этой области –

- суррогатное моделирование,
- многомасштабное моделирование,
- решение сложных уравнений физики,
- автоматизация рутинных расчетных цепочек.

«Суррогатное» моделирование

Роль ИИ – это замена использования "дорогих" коммерческих кодов путем создания нейросетевых суррогатов для тяжелых физических кодов (например, теплогидравлических или нейтронно-физических)*.

Высокоточные коды требуют часов и даже дней для расчета одного сценария (особенно для аварийных процессов).

ИИ обучается на массиве расчетов, выполненных "тяжелым" кодом, и затем предсказывает результат для новых входных данных за доли секунды.

Выгода – это возможность провести не десятки, а тысячи и миллионы расчетов для всестороннего анализа аварийных сценариев (например, для динамической вероятностной оценки безопасности).

В любом случае отдельные наиболее интересные полученные с помощью ИИ результаты могут и должны быть проверены с помощью сертифицированных "тяжелых" программ.

* Gradient Harmony Optimization-Driven Hybrid Physics-Informed Neural Network for Solving Neutron Diffusion Problems / H. Zhang [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2026. – Vol. 73, no. 3. – P. 505–518.

Data-driven surrogate modeling for thermal-hydraulic codes via hybrid deep neural networks and quantile learning / H. Yi [et al.] // Machine Learning: Science and Technology. – 2026. – Vol. 7, no. 4. – P. 045017.

Machine learning-enhanced dynamic probabilistic safety assessment for station blackout in Bushehr nuclear power plant / M. Yarizadeh-Bene [et al.] // Progress in Nuclear Energy. – 2026. – Vol.193. – P. 106240.

Многомасштабное моделирование и количественная оценка неопределенности



ИИ позволяет "сшивать" расчеты на разных масштабах – от атомного до инженерного.*

В качестве примера можно рассмотреть расчеты на уровне атомов, которые используются для создания моделей поведения топлива, которые затем "поднимаются" на уровень топливного стержня.

Прямой расчет всей цепочки слишком дорог.

Нейронная сеть заменяет эту цепочку, позволяя провести байесовскую калибровку и оценить реальную неопределенность предсказаний с использованием скудных экспериментальных данных.

Это позволяет более обоснованно продлевать срок службы топлива или обосновывать изменение режимов работы без проведения дорогостоящих натурных экспериментов.

*Integrating mechanistic models with separate effects and integral tests through neural network-enabled Bayesian inference: Application to uranium nitride fuel swelling / A. J. Schneider [et al.] // Journal of Nuclear Materials. – 2026. – Vol.632. – P. 156895.

Место искусственного интеллекта в решении проблем компьютерного моделирования и расчетного анализа



С целью автоматизация рутинных расчетных цепочек ИИ, особенно в виде LLM-агентов, можно автоматизировать процесс подготовки входных данных, запуска и обработки результатов симуляций (например, для кода FLUKA или MCNP)*. Это снимает проблему "человеческого фактора" и снижает порог входа для молодых специалистов, позволяя им быстро выполнять сложные расчеты, не углубляясь в синтаксис многотомных руководств.

Физико-информированные нейронные сети (Physics-informed neural networks – PINN) **

Обычная нейросеть минимизирует ошибку между предсказанием и данными.

PINN добавляет в функцию потерь **слагаемое, которое наказывает за нарушение физических уравнений** (например, уравнений теплопроводности, Навье-Стокса, нейтронной кинетики).

В результате модель:

- соблюдает законы сохранения даже там, где данных нет;
- работает при малом объёме обучающих данных;
- может экстраполировать за пределы обучающей выборки более физично.

* Gradient Harmony Optimization-Driven Hybrid Physics-Informed Neural Network for Solving Neutron Diffusion Problems / H. Zhang [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2026. – Vol. 73, no. 3. – P. 505–518.

** Emerging Applications of AI and Machine Learning in Nuclear Science and Engineering / S. Bhorkade // Preprints. – 2025. – P. 2025092504.

Automating Monte Carlo simulations in nuclear engineering with domain knowledge-embedded large language model agents / Z. N. Ndum [et al.] // Energy and AI. – 2025. – Vol. 21. – P. 100555.

Физико-информированные нейронные сети (PINN)



- 1. Суррогатные модели теплогидравлики.** PINNs обучаются на уравнениях сохранения массы, импульса и энергии. Они используются для быстрого предсказания полей температуры, давления и скорости теплоносителя в активной зоне и первом контуре — вместо дорогостоящих CFD-расчётов.
- 2. Нейтронная кинетика и диффузия.** PINN может решать уравнение диффузии нейтронов и кинетические уравнения с запаздывающими нейтронами. Это позволяет моделировать поведение реактора при изменениях реактивности без полного численного решения.
- 3. Аварийные процессы (LOOP, LOCA).** Для сценариев с потерей внешнего электроснабжения (LOOP) или течью теплоносителя (LOCA) PINNs строят быстрые суррогатные модели, которые за миллисекунды дают прогноз, сравнимый с тяжёлыми кодами типа RELAP5/MELCOR.
- 4. Остаточное тепловыделение.** PINN может аппроксимировать кривые распада продуктов деления, комбинируя данные и физические ограничения (законы радиоактивного распада).
- 5. Топливные циклы и выгорание.** Моделирование эволюции изотопного состава топлива с учётом уравнений баланса нуклидов — ещё одна ниша для PINNs, особенно когда экспериментальных данных мало.
- 6. Цифровые двойники реакторов.** PINNs встраиваются в цифровые двойники как «быстрый слой»: они получают данные с датчиков и мгновенно выдают оценку состояния, которую затем уточняют более точные, но медленные модели.

Заключение



Существует важное ограничение в области использования ИИ в решении проблем компьютерного моделирования и расчетного анализа.

Это обеспечение верификации и валидации.

Для регулируемой ядерной сферы любой ИИ-суррогат – это "черный ящик", который должен быть строго верифицирован на множестве контрольных примеров. Он не может использоваться как единственное доказательство безопасности без подтверждения классическими методами.

Однако для выявления редких, но опасных сценариев, которые "не видны" при традиционном ограниченном наборе расчетов, ИИ является критически важным инструментом для такой небольшой страны, как Республика Беларусь, позволяя ей достичь уровня анализа, сравнимого с крупными ядерными державами.



***Всегда выбирайте
самый трудный путь —
там вы не встретите
конкурентов.***

Шарль де Голль



Спасибо за внимание!

sytova@inp.bsu.by