

# Достижения в области нейтронной визуализации открывают новые возможности применения исследовательских реакторов малой мощности

Мэри Элбон

Нейтронная визуализация — это неинвазивный метод исследования внутренних структур, который осуществляется с помощью исследовательских реакторов или источников нейтронов на базе ускорителей. «Это удивительный инструмент, обладающий безграничными возможностями для научных и промышленных исследований и разработок, а также для проведения криминалистических экспертиз и изучения объектов культурного наследия», — говорит младший сотрудник по проектам в МАГАТЭ Молли-Кейт Гавелло. Нейтронная визуализация может использоваться для испытания двигателей, амортизаторов и лопаток турбин. С ее помощью можно увидеть, как вода движется внутри живого растения, или исследовать внутреннюю сторону окаменевшего черепа динозавра, заполненного железистой породой.



Благодаря системе нейтронной визуализации в Чешском техническом университете (ЧТУ) в Праге была обнаружена «ось мира» (символ связи между физическим и духовным мирами) внутри тибетской статуэтки бонского божества Чаммы. (Фото: Л. Склелка/ЧТУ)

Нейтронная визуализация используется с 1950-х годов, однако до 1990-х годов ее основным форматом были двухмерные (2D) изображения на пленке. С появлением цифровых технологий, в том числе усовершенствованных цифровых камер, в нейтронной визуализации начал применяться метод компьютерной томографии (КТ), при котором из сотен изображений, сделанных под разными углами, создается трехмерное (3D) изображение с высокой степенью детализации.

До недавнего времени по техническим и финансовым причинам нейтронную визуализацию с помощью

КТ, которую еще называют 3D-визуализацией, было невозможно применять в работе с низкопоточными источниками нейтронов, такими как исследовательские реакторы малой мощности.

## Высококачественные изображения при низкой мощности

Ситуация изменилась в 2021 году, когда аспирант Чешского технического университета в Праге (ЧТУ) Яна Матоушкова и ее руководитель Любомир Склелка продемонстрировали возможность проведения нейтронной визуализации с помощью КТ при мощности исследовательского реактора 500 ватт (Вт).

Этому прорыву предшествовали два события. Во-первых, в предыдущее десятилетие стали доступны недорогие высококачественные камеры для астрофотографии. Во-вторых, работавшие на исследовательском источнике нейтронов им. Хайнца Майера-Лейбница (FRM II) в Мюнхенском техническом университете (Германия) исследователи воспользовались потенциалом этих новых камер и в 2016 году представили первую мини-установку для нейтронной томографии, в том числе для реакторов малой мощности. Коллектив исследователей под руководством Буркхарда Шиллингера разработал и создал недорогую систему высококачественной нейтронной визуализации, в которой использовался детектор с напечатанным на 3D-принтере корпусом и упрощенная версия профессионального управляющего программного обеспечения, используемого в экспериментальной системе усовершенствованной нейтронной томографии и радиографии (АНТАРЕС) для целей визуализации на исследовательском реакторе FRM II. Получаемые с помощью новых детекторов изображения не уступают по качеству изображениям, получаемым с помощью высокотехнологической системы, которая обычно используется в АНТАРЕС.

Яна Матоушкова хотела испытать нейтронную визуализацию на источниках нейтронов малой мощности, таких как расположенный в ЧТУ учебный реактор VR-1 мощностью 500 Вт — для сравнения, мощность реактора FRM II составляет 20 МВт, что в 40 000 раз больше, чем в реакторе ЧТУ, и это позволяет ему производить соответственно в 40 000 раз больше нейтронов. Это оказалось непростой задачей, поскольку Яна не могла получить доступ к установкам ЧТУ для проведения экспериментов из-за ограничений в связи с пандемией COVID-19.

Любомир Склелка обратился к Буркхарду Шиллингеру за советом о том, как им воспроизвести у себя разработанную в FRM II недорогую систему, и тот консультировал Яну Матоушкову по видеосвязи и снабжал ее информацией об устройстве системы и о том, где можно приобрести необходимые компоненты. Шаг за шагом она построила систему нейтронной визуализации у себя дома и провела испытания на видимом свете.

После снятия ограничений, обусловленных пандемией COVID-19, Матоушкова установила свою систему на реакторе ЧТУ и впервые в истории университета было успешно получено цифровое 2D-изображение с использованием нейтронной визуализации, после чего была проведена нейтронная визуализация с помощью КТ с 12-часовой экспозицией при мощности 500 Вт. Это означает, что результаты могут быть получены в течение одного дня и при значительно меньшей мощности — мощность исследовательских реакторов, в которых также используется данная методика, варьируется от сотен киловатт до десятков мегаватт.

В настоящее время Матоушкова занимается усовершенствованием системы нейтронной визуализации ЧТУ в рамках своих аспирантских исследований. Система используется в основном для целей обучения, а также для проведения исследований, например для изучения объектов культурного наследия в сотрудничестве с Национальной галереей в Праге.

## Передача технологий и обмен опытом

Опыт FRM II и ЧТУ свидетельствует о том, что мини-установка может работать с любым источником нейтронов, включая исследовательские реакторы сверхмалой мощности. Буркхард Шиллингер заявил, что его коллектив готов бесплатно предоставить другим странам проектные планы и программное обеспечение, а также помочь с установкой и настройкой.

Благодаря компонентам, напечатанным на 3D-принтере, программному обеспечению, адаптированному для работы на ноутбуке, и снижению цен на камеры для астрофотографии полный комплект, который несложно

перевозить, может быть собран менее чем за 5000 евро. В 2022 году Буркхард Шиллингер и научный сотрудник Айдахской национальной лаборатории (США) Аарон Крафт руководили миссией экспертов МАГАТЭ по установке системы цифровой нейтронной визуализации на исследовательском реакторе RECH-1 Чилийской комиссии по ядерной энергии. Шиллингер привез компоненты в чемодане, а на установку системы ушло меньше двух дней.

«МАГАТЭ играет ключевую роль в том, чтобы сделать эту технологию доступной для исследовательских реакторов малой мощности, — говорит он. — С новыми чувствительными детекторами открывается совершенно новая область применения тех реакторов, которые не дают достаточно нейтронов для проведения сложных экспериментов в области рассеяния нейтронов. Нейтронная визуализация делает их более пригодными для применения в целях образования, исследований и сотрудничества с музеями».



Любомир Склелка, Яна Матоушкова и Буркхард Шиллингер на исследовательской реакторной установке Чешского технического университета в Праге.

(Фото: Мюнхенский технический университет)

МАГАТЭ содействует техническому сотрудничеству с исследовательскими реакторами, в том числе путем проведения миссий экспертов и закупки оборудования. Агентство публикует также справочники по нейтронной визуализации, проводит региональные учебные мероприятия и расширяет возможности электронного обучения. Кроме того, в 2022 году благодаря МАГАТЭ Матоушкова смогла провести четыре месяца на исследовательском реакторе RA-6 в Аргентине, где она помогала установить и испытать недорогую систему нейтронной визуализации.

Аналогичная система двойной нейтронно-рентгеновской визуализации была установлена и введена в эксплуатацию на установке для нейтронных исследований МАГАТЭ в Зайберсдорфе (Австрия), где она используется в учебных целях.

## Что такое нейтронная визуализация?

Нейтронная визуализация — это неинвазивный метод исследования внутренних структур и состава непрозрачных объектов. В ее основе лежат принципы, аналогичные принципам рентгеновской визуализации. Однако в отличие от рентгеновского излучения, которое поглощается плотными материалами, такими как металлы, пучки нейтронов проникают через большинство металлов и горных пород, а некоторые легкие элементы, такие как бор, углерод, водород и литий, ослабляют нейтронное излучение. Нейтроны могут также помочь получать изображения магнитных полей, а также деформации технологических и конструктивных материалов.