

## ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ В СИСТЕМЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

С. Н. Сытова<sup>1</sup>, И. А. Серенкова<sup>2</sup>, О. М. Дерюжкова<sup>3</sup>, А. Н. Коваленко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерных проблем БГУ, Минск, Беларусь;

<sup>2</sup>Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Беларусь;

<sup>3</sup>Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Беларусь

*Представлены краткий обзор состояния системы ядерно-физических данных в мире и концепция белорусской электронной энциклопедии ядерно-физических данных в рамках портала ядерных знаний BelNET.*

В связи с дальнейшим развитием электронного портала ядерных знаний BelNET (Belarusian Nuclear Education and Training Portal, <https://belnet.bsu.by/>), который является ведущим белорусским научно-техническим информационным ресурсом в области ядерных знаний, возникла идея создания на его базе электронной энциклопедии ядерно-физических данных.

Фундаментальные ядерные константы, рекомендованные оцененные нейтронные и ядерные данные, а также другие ядерно-физические данные являются основой проектных расчетов, проектирования, функционирования ядерных реакторов и различных ядерных установок, обоснования ядерной, радиационной безопасности и многих других аспектов деятельности в ядерной отрасли.

Под ядерно-физическими данными понимается набор параметров, характеризующих процессы взаимодействия излучения с веществом, ядерные реакции, структуру ядер и свойства радиоактивного распада [1]. Под излучением здесь понимаются нейтроны или  $\gamma$ -кванты.

Так называемые оцененные данные получают на основании анализа полной совокупности экспериментальной и теоретической информации о них и рекомендуются для использования в расчетах, обработке ядерно-физических экспериментов и хранятся в различных форматах в специализированных базах данных (БД).

Это электронные базы фактографических данных, сочетающие свойства своеобразных «складов готовой продукции» и новых оригинальных средств собственно научных исследований. Огромные массивы информации современных БД и гибкое программное обеспечение открывают перед пользователями практически неограниченные возможности поиска конкретных данных, позволяя подойти ко всей совокупности накопленных данных с единой точки зрения и впервые сформулировать вопросы, для которых без этих возможностей не было никаких оснований. Ответы на такие вопросы, полученные впервые, представляют собой, по существу, новые данные, новую информацию, а в конечном счете – новое знание.

Часто даже относительно простая системная обработка известных результатов обнаруживает (точнее, выявляет) принципиально новую физическую информацию, которая ранее отсутствовала, по крайней мере, в явном виде. Прежде всего это относится к возможностям выявления неизвестных ранее систематических погрешностей результатов разных экспериментов, установления неизвестных ранее закономерностей в таких результатах, получения точных и надежных данных на основе взаимной оценки результатов различных экспериментов с учетом их систематических погрешностей, оценки результатов экспериментов, которые не были (или не могут быть в принципе) проведены.

В мире существует большое количество баз и банков таких ядерно-физических данных, созданных, измеренных и рассчитанных. Они время от времени уточняются, верифицируются и обновляются. На создании, развитии, уточнении и поддержании таких БД уже много лет специализируются многие ведущие научные учреждения:

Секция ядерных данных (Nuclear Data Section) Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) – <https://www-nds.iaea.org/>;

Агентство по ядерной энергии (OECD Nuclear Energy Agency, NEA) – <https://oecd-nea.org/>;

Национальный центр ядерных данных (National Nuclear Data Center, NNDC) Брукхэвской национальной лаборатории, США – <http://www.nndc.bnl.gov/>;

Китайский центр ядерных данных при Китайском институте атомной энергии (China Nuclear Data Center, China Institute of Atomic Energy) – [https://en.cnncc.com.cn/2020-06/17/c\\_501119.htm](https://en.cnncc.com.cn/2020-06/17/c_501119.htm);

Центр данных фотоядерных экспериментов НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына МГУ им. М. В. Ломоносова – <http://cdfc.sinp.msu.ru>;

Центр ядерно-физических данных Института ядерной и радиационной физики РФЯЦ-ВНИИЭФ, Россия – <https://vniief.ru/partnership/nucleardatacenter/>;

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского» – <https://www.ippe.ru/nuclear-power/nuclear-data-services>;

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук – <http://www.ibrae.ac.ru/contents/research/>.

Цели международной деятельности указанных выше, а также других мировых научных центров в области ядерно-физических данных кратко можно сформулировать следующим образом:

- константное обеспечение научно-технических разработок;
- компиляция экспериментальных данных и передача их в международные библиотеки (EXFOR и др.);
- разработка специализированных баз данных;
- выполнение работ по оценке сечений ядерных реакций;
- совершенствование существующего программного обеспечения по обработке ядерных данных;
- участие в координации работ национальных центров ядерных данных.

Кратко опишем суть наиболее распространенных и развитых баз ядерно-физических данных:

EXFOR (Experimental Nuclear Reaction Data, <https://www-nds.iaea.org/nrdc/about/about-exfor.html>), включает в себя экспериментальные данные по реакциям взаимодействия нейтронов, заряженных частиц и гамма-квантов с ядрами, а также сечения, функции возбуждения, выходы, угловые и энергетические распределения и т. д. Фактографические данные сопровождаются текстовой информацией, содержащей библиографические и описательные данные.

ENDF (Evaluated Nuclear Data File, <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>) содержит оцененные данные по реакциям взаимодействия нейтронов, заряженных частиц и гамма-квантов с ядрами, данные по нейтронным сечениям, выходам продуктов реакции, тепловому рассеянию нейтронов, фотоатомным взаимодействиям, образованию радионуклидов и распаду, а также по заряженным частицам и фотоядерные данные.

ENSDF (Evaluated Nuclear Structure Data File, <https://www.iaea.org/resources/databases/evaluated-nuclear-structure-data-file>) охватывает оцененные данные по структуре ядра с информацией по свойствам уровней: энергии уровней, виды распада, интенсив-

ности распада, энергии гамма-квантов, а также по значениям периодов полураспада и других свойств ядер в основном и метастабильном состояниях.

CINDA (Computer Index of Nuclear Reaction Data, <https://www-nds.iaea.org/exfor/cinda.htm>) предоставляет ссылки на экспериментальные данные по ядерным реакциям и на расчетные данные, обзоры, компиляции и оценки по нейтронным реакциям и данным по спонтанному делению.

В настоящее время под эгидой Секции ядерных данных МАГАТЭ продолжается создание актуальных полных банков и баз оцененных данных в области атомной и ядерной физики. МАГАТЭ поддерживает функционирование международных сетей и центров атомных и ядерных данных, позволяющее обеспечить высокую степень согласованности деятельности основных центров данных во всем мире. МАГАТЭ, обладая обширными базами оцененных атомных и ядерных данных, предоставляет в онлайн-режиме доступ к численной информации по свойствам атомных ядер, характеристикам ядерных реакций и радиоактивных распадов, которая эффективно применяется для решения широкого класса задач прикладных и фундаментальных исследований в энергетической и неэнергетической сферах, для разработки различных практических приложений, а также в образовательном процессе.

Порталом, наиболее развитым и предлагающим полную информацию в широкой области ядерно-физических данных, является Служба ядерных данных (Nuclear Data Service), размещенная в Интернете по адресу <https://www-nds.iaea.org/>, созданная, развиваемая и поддерживаемая Секцией ядерных данных МАГАТЭ. Однако некоторые важные разделы здесь отсутствуют либо обновляются недостаточно часто. Так, за весь 2022 г. здесь присутствуют всего две новости (см. раздел News на портале <https://www-nds.iaea.org/>), за шесть месяцев 2023 г. – только три.

Также отметим, что данный сайт содержит информацию только на английском языке. Наличие описания и информации на русском языке очень важно с точки зрения лучшего ее понимания и читабельности. Особенно это касается преподавателей и студентов профильных специальностей в рамках образовательного процесса белорусских высших учебных заведений.

Среди лидеров в области ядерно-физических данных отметим Японскую библиотеку оцененных ядерных данных JENDL (Japanese Evaluated Nuclear Data Library, <https://wwwndc.jaea.go.jp/>). Однако на сайте МАГАТЭ информация о ней присутствует в очень фрагментарном виде, хотя на сайте <https://wwwndc.jaea.go.jp/> размещено уточнение последней версии библиотеки JENDL-5 18 января 2023 г.

Сайт МАГАТЭ вообще не содержит информации о ведущих научных учреждениях и сайтах Южной Кореи, которые занимаются ядерно-физическими данными, например, Центр ядерных данных Корейского научно-исследовательского института атомной энергии (Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI, <https://atom.kaeri.re.kr>), а также коллаборации GEANT4 (<https://geant4.web.cern.ch/>), на основе программ которой в настоящий момент проводятся многие вычисления и обработка ядерно-физических данных.

Нельзя не упомянуть наличие других важных и интересных международных сервисов, которые должны периодически отслеживаться и при появлении на которых новой информации должны отмечаться соответствующие свежие ссылки. Это, например, сервер «X-ray Server» («Рентгеновский сервер») (<https://x-server.gmca.aps.anl.gov/>) под эгидой Аргонской национальной лаборатории США (Argonne National Laboratory), который предоставляет бесплатный онлайн-доступ к некоторым программам анализа рентгеновских данных, разработанным для исследований рентгеновской дифракции и рассеяния на материалах. Также необходимы свежие ссылки на данные Particle Data Group (<https://pdg.lbl.gov/>), где в свободном доступе размещены данные Обзора физики частиц (The Review of Particle Physics, 2022) и другие аналогичные сайты.

Следует обратить внимание на сайт Национального института стандартов и технологий США (National Institute of Standards and Technology, NIST, <https://www.nist.gov/pml/productsservices/physical-reference-data>), где размещен большой объем различных физических справочных данных, в том числе:

- «Индекс элементарных данных», который предоставляет доступ к онлайн-данным Лаборатории физических измерений NIST, организованным по элементам периодической системы;
- «Периодическая таблица: атомные свойства элементов», содержащая критически оцененные NIST данные об атомарных свойствах элементов;
- «Физические константы» со значениями фундаментальных физических констант и соответствующая библиографическая база данных;
- «Данные атомной спектроскопии» с базами данных по уровням энергии, длинам волн, вероятностям радиационных переходов и энергиям ионизации для атомов и ионов, а также соответствующие библиографические базы данных;
- «Данные молекулярной спектроскопии», включающие БД спектроскопических данных для малых молекул, углеводов и межзвездных молекул;
- «Атомные и молекулярные данные», содержащие базы данных по теплофизическим свойствам газов, сечениям электронного удара (атомов и молекул), поверхностям потенциальной энергии димеров группы II, атомным весам и изотопным составам;
- «Рентгеновские и гамма-данные» с данными по взаимодействию рентгеновских и гамма-лучей с элементами и соединениями;
- «Данные радиационной дозиметрии», обеспечивающие вычисление тормозной способности и таблицы пробега для электронов, протонов или ионов гелия;
- «Данные ядерной физики» с таблицей периодов полураспада 65 радионуклидов и БД изотопных составов, атомных весов и относительных атомных масс элементов;
- «Данные по физике конденсированных сред», содержащей оцененные данные для использования в расчетах полной энергии электронной структуры с помощью теории функционала плотности, включая полные энергии и собственные значения орбитальной энергии для всех атомов от водорода до урана.

В Беларуси, к сожалению, недостаточно собственных научных сил для разработки и расчета полностью оригинальных наборов оцененных ядерно-физических данных. Однако очень важно обращать внимание и отслеживать результаты работы по развитию ядерно-физических данных, обзоры и работы известных научных групп белорусских ученых. Это например, БД «Maslov», разработанная ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны», на сайте МАГАТЭ (<https://www-nds.iaea.org/minskact/>) и многие другие.

Все вышесказанное означает, что назрела необходимость создания собственной, поддерживаемой в актуальном состоянии и постоянно обновляемой в случае появления новых данных в мире электронной энциклопедии-справочника по различным типам ядерно-физических данных. Фактически – это научный сервис на русском языке для организации эффективного и удобного доступа исследователей и специалистов к данным и знаниям, накопленным во всем мире, с использованием существующих инструментов белорусского портала ядерных знаний BelNET <https://belnet.bsu.by/> [2] (подраздел «Данные и анализ» в составе раздела «Практика»). Данная работа важна как для облегчения работы научных групп в Беларуси, так и для преподавателей и студентов в рамках различных физических курсов.

Приведем методику (концепцию) поиска, накопления и формирования ядерно-физических данных в рамках создания белорусской электронной энциклопедии ядерно-физических данных, реализованной в подразделе «Данные и анализ» портала BelNET:

- создать список основных ссылок на все ведущие базы данных с их подробным описанием (EXFOR, ENSDF, ENDF и т. д.);
- создать список основных ссылок на библиотеки и файлы ядерных данных (общие и оцененные библиотеки данных в различных форматах);
- создать список основных ссылок и описание на русском языке программного обеспечения (EMPIRE, ATHLET, OpenMC, MCNP, библиотеки для Geant4 и т. д.), в особенности свободно доступные программные коды;
- все имеющиеся ссылки должны минимум раз в месяц проверяться на актуальность и наличие обновлений;
- регулярно отслеживать и размещать различную другую актуальную полезную информацию и ссылки;
- в обязательном порядке проводить учет белорусской специфики, в том числе ссылки и описание белорусских работ в этой области.

Таким образом, первым главным результатом работы становится прозрачный структурированный последовательный список всех доступных данных, сгруппированных в близкие по тематике разделы, с регулярно уточняемыми и обновляемыми ссылками и информацией. Очевидно, что сами данные указанных библиотек объемом в сотни мегабайт или гигабайт полностью скачивать и размещать на портале не следует.

В заключение подчеркнем, что в Интернете есть очень большое количество сайтов, содержащих различные общедоступные библиотеки и банки ядерно-физических данных. Ссылки на этих сайтах настолько многочисленны и дублируют друг друга, а некоторые из них недоступны и недостоверны, что требуется специальная работа по систематизации и вычленению единого набора действующих рабочих ссылок на самые свежие уточненные и верифицированные (оцененные) версии данных.

Наличие надежных атомных и ядерных данных является ключевым фактором успеха для целого ряда применений, включая проектирование и эксплуатацию атомных электростанций, обращение с ядерными отходами, производство и использование радиоизотопов, медицинскую дозиметрию и диагностику, разработку и применение лазеров и ускорителей, исследования термоядерной энергии, мониторинг окружающей среды, плазменную обработку, контроль материалов и ядерные гарантии.

### **Список литературы**

1. Колесов, В. В. Файлы ядерных данных и их использование в нейтронно-физических расчетах / В. В. Колесов, М. Ю. Терновых, Г. В. Тихомиров. – М. : НИЯУ МИФИ, 2014. – 68 с.
2. Белорусский портал ядерных знаний BelNET : вчера, сегодня, завтра / С. Н. Сытова [и др.] // Сахаровские чтения 2023 года: экологические проблемы XXI века : материалы 23-й Междунар. науч. конф., Минск, 18–19 мая 2023 г. – Минск : БГУ, 2023. – Т. 2. – С. 158–162.