

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МИФИ» ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ И БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ

На правах рукописи
УДК 621.039.564:539.1.08

ГУНЕШ МЕРВАН

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНЫХ СЕЧЕНИЙ И ЭНЕРГИЙ ДЛЯ ГРУППЫ
ПОРОГОВЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ**

Выпускная квалификационная работа специалиста

Направление подготовки 14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация,
инжиниринг

Выпускная квалификационная
работа защищена

«30» января 2020г.

Оценка

хорошо

Секретарь ГЭК

Мерван

г. Москва

2020

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
"НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НИЯУ "МИФИ"

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ И БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ

Пояснительная записка к выпускной квалификационной работе на тему:

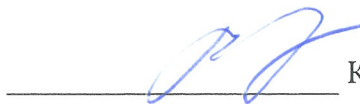
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНЫХ СЕЧЕНИЙ И ЭНЕРГИЙ ДЛЯ ГРУППЫ ПОРОГОВЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Студент группы С14-161
Форма обучения: очная (дневная)



Гунеш М.

Научный руководитель,
специалист по УМР1 кат. каф. 1



Камнев В.А.

Рецензент
к.ф.-м.н., нач. службы РБ ИРТ АЦ НИЯУ МИФИ



Кожин А.Ф.

Зав. кафедрой №1
доцент, к.ф.-м.н.



Дёмин В.М.

г. Москва

2020

АННОТАЦИЯ

Выпускная квалификационная работа была выполнена на тему: «Оценка эффективных сечений и энергий для группы пороговых ядерных реакций». Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы, а также приложения с таблицами.

Во введении представлена актуальная выбранная тема выпускной квалификационной работы, определена цель, а также поставлены задачи, которые необходимо выполнить для достижения данной цели.

В первой главе проведен анализ литературы для определения флюенсов и энергетического спектра нейтронов активационным методом.

Во второй главе представлены алгоритм и программа в среде Excel для расчета эффективных сечений и энергий пороговых ядерных реакций, разработанные в работе.

В третьей главе приведено техническое описание рассматриваемых установок для определения интегральных спектров нейтронов.

В четвертой главе проведена оценка спектров нейтронов ядерных установок по интегральным данным экспериментов. Проведено восстановление спектров для двух энергетических установок с использованием полученных в работе величин. Проведены полномасштабные расчеты спектров двух установок по программам ИВК «MIXER».

В заключении приводится анализ полученных результатов, сделаны выводы и даны рекомендации по использованию полученной системы констант для восстановления спектров реальных ядерно-физических установок. Общий объем работы составил 49 страниц.

Содержание

Введение.....	4
Глава 1 Определение флюенсов и энергетического спектра нейтронов активационным методом ...	5
1.1 Активация детекторов в поле нейтронов.....	5
1.2 Фильтрации нейтронов при активационных измерениях	5
1.3 Измерение активности и скорости деления	6
1.3.1 Измерение активности методом счета β -частиц	7
1.3.2 Определение активности по выходу γ -излучения однокристалльным гамма-спектрометром	7
1.4 Детекторы для определения характеристик поля быстрых нейтронов	8
1.4.1 Реакции деления (n, f)	9
1.4.2 Реакции неупругого рассеяния (n, n')	9
1.4.3 Реакции захвата с испусканием протона (n, p)	10
1.4.4 Реакции захвата нейтрона с испусканием α -частицы (n, α)	10
1.4.5 Реакции захвата с испусканием двух нейтронов (n, 2n)	10
1.5 «Восстановление» спектров быстрых нейтронов с применением компьютерных программ.....	11
1.5.1 Метод SAND.....	11
1.5.2 МНР (метод направленного расхождения)	12
1.5.3 Метод статистической регуляризации	13
1.6 Метод «эффективных» пороговых сечений.....	14
Глава 2 Оценка эффективных сечений пороговых реакций	16
2.1 Расчетный блок.....	16
2.2 Анализ результатов расчетов	17
Глава 3 Определение интегральных спектров нейтронов для ядерно-физических установок.....	28
3.1 РБТ реактор.....	28
3.2 Опорное поле (ОП-4) в реакторе РБТ-6.....	28
3.3 Устройство КОРПУС на реакторе РБТ-6	30
Глава 4 Оценка спектров нейтронов ядерных установок по интегральным данным экспериментов	32
4.1 Полномасштабное восстановление спектра по ИВК MIXER	32
4.2 Обсуждение результатов. Рекомендации по использованию констант	37
Заключение	39
Список литературы	40
Приложение	42
Благодарности.....	49

Введение

Информация о спектрах нейтронов ядерно-физических установок имеет большое значение как для понимания физических процессов, происходящих в активной зоне и на периферии, так и для изучения вопросов воздействия излучения на объекты живой и неживой природы.

При постановке и проведении радиобиологических исследований наряду с поглощенной тканевой дозой часто используется информация о спектрах нейтронного излучения, поскольку установлено, что биологический эффект зависит от энергии нейтронов и плотности их потока.

Данные о спектрах нейтронов необходимы и для правильного расчета защиты реактора. Например, для оценки вклада захватного гамма-излучения нужны сведения о спектре нейтронов в области низких энергий. Но для расчета прохождения нейтронов через большие толщины надо знать спектр быстрых нейтронов, так как они в значительной мере определяют спектр за защитой. Зачастую расчеты прохождения нейтронов через большие толщины вещества выполняются приближенными методами для идеализированной геометрии защиты. Однако знание полного спектра нейтронов позволяет судить о правильности принятых упрощений и выбранной системы констант.

Измерение спектра нейтронов связано со значительными финансовыми, материальными и временными затратами. Требуется высокая квалификация экспериментаторов. Используются мощные компьютерные коды для обработки результатов измерений и определения характеристик нейтронного поля. При этом не всегда требуется подробная детализация получаемых параметров. Часто достаточным является знание интегральных параметров. К таковым относится интегральное распределение плотности потока нейтронов (интегральный спектр). Ключевым моментом здесь является определение параметров и констант, позволяющих провести оценки максимально оперативно и по упрощенным методикам.

Цель данной работы – создание самосогласованной библиотеки эффективных сечений в зависимости от эффективной энергии нейтронов для ряда пороговых ядерных реакций с последующим расчетом интегральных спектров действующих ядерно-физических установок.

Глава 1 Определение флюенсов и энергетического спектра нейтронов активационным методом

1.1 Активация детекторов в поле нейтронов

Активационный метод определения характеристик поля нейтронов основан на использовании ядерных реакций деления и реакций активации, приводящих к образованию радиоактивных изотопов и изомеров [1].

Используются ядерные реакции, в результате которых образуются радиоактивные ядра. Затем измеряют активность облучённого детектора по выходу вторичного излучения.

Образование радиоактивных ядер описывается соотношением:

$$\frac{dn}{dt} = -\lambda n + qn_0, \quad (1.1.1)$$

где: n_0 – число ядер-мишеней, n – количество радиоактивных ядер, λ – постоянная распада изотопа – продукта реакции, q – активность в насыщении, приведенная к одному ядру изотопа-мишени (активационный интеграл)

$$q = \int_0^{\infty} \sigma(E)\varphi(E)dE, \quad (1.1.2)$$

где: $\varphi(E)$ – дифференциальное энергетическое распределение плотности потока нейтронов (дифференциальный спектр); $\sigma(E)$ – энергетическая зависимость сечения реакции.

Значение активационного интеграла q определяется экспериментально.

1.2 Фильтрации нейтронов при активационных измерениях

Тепловые нейтроны имеют большее поперечное сечение поглощения, чем быстрые нейтроны. Для уменьшения вклада тепловых и надтепловых нейтронов обычно используются фильтры на основе кадмия или бора. Скорость активации детектора в фильтре описывается уравнением

$$q_{\phi} = \int_0^{\infty} T_{\phi}(E)\varphi(E)\sigma(E)dE, \quad (1.2.1)$$

где T_{ϕ} – функция пропускания нейтронов фильтром.

Кадмий, имеющий доминирующий резонанс при энергии от 0.176 эВ до 0.180 эВ, сильно поглощает тепловые и медленные нейтроны и пропускает быстрые нейтроны. Для кадмия возможно представление функции пропускания в упрощенном виде

$$T_{Cd} = \begin{cases} 1, & E < E_{Cd}; \\ 0, & E \geq E_{Cd}. \end{cases} \quad (1.2.2)$$

Значение граничной энергии поглощения кадмиевым фильтром E_{Cd} определяется из соотношения

$$Q_{Cd} = \int_0^{\infty} T_{Cd}(E, d_{Cd}) \sigma(E) \varphi(E) dE = \int_{E_{Cd}}^{\infty} \sigma(E) \varphi(E) dE. \quad (1.2.3)$$

Здесь d_{Cd} – толщина кадмиевого фильтра.

Принято определять граничную энергию кадмиевой отсечки для сечения реакции, изменяющегося как $1/\sqrt{E}$. В общем случае E_{Cd} зависит не только от толщины и формы применяемого фильтра, но и от спектра нейтронов и их углового распределения.

В работе [2] предложена аналитическая аппроксимация граничной энергии как функции толщины кадмия для цилиндрических экранов при изотропном облучении:

$$E_{Cd}(\text{эВ}) = 0,520 + 0,162 \ln \delta; \quad (1.2.4)$$

$$\delta = \xi_{Cd} * d_{Cd}; \quad d_{Cd} = (0.5 - 1.5) \text{ mm}.$$

Рекомендуется применять кадмиевые фильтры толщиной стенок 1 мм, так как при меньшей толщине сказывается сильное влияние спектра нейтронов на величину E_{Cd} .

Фильтры с бором применяют для увеличения вклада в активацию быстрых нейтронов. Толщину фильтра выбирают равной (0,5 – 2) г/см². Функцию пропускания обычно рассчитывают методом Монте-Карло, так как необходимо учитывать не только поглощение, но и рассеяние нейтронов материалом фильтра и связующим веществом и их угловое распределение.

1.3 Измерение активности и скорости деления

Образовавшиеся в результате активации радиоактивные изотопы (изомеры) могут испускать γ -кванты, характеристическое излучение, β -частицы, позитроны и конверсионные электроны. Активность определяется по регистрации ядерного или аннигиляционного фотонного излучения (γ -излучения), заряженных частиц, а также методами совпадений [3].

1.3.1 Измерение активности методом счета β -частиц

Наиболее распространенными установками для измерения активности радионуклидов являются β -счетчики. Наивысшая точность достигается при применении 4π - β -счетчиков. Промышленность выпускает 4π проточный счетчик с комплектом электронной арматуры 2154-1-1М «Протока», работающий на метане или пропане, а также установки типа УДИС.

При определении активности счетом β -частиц необходимо измерить зависимость скорости счета от времени выдержки (кривая распада). Анализ этой зависимости позволяет учесть влияние мешающих реакций или выявить возможное загрязнение детектора:

$$\frac{n_{\beta}(t_B)}{1-\tau_M n_{\beta}(t_B)} = \sum_{k=0}^m n_{\beta}^{(k)}(t_B = 0) \exp[-\lambda_k t_B]. \quad (1.3.1.1)$$

Значение скорости счета определяют в момент окончания облучения для рассматриваемой реакции. Если измеряемый изотоп – продукт реакции имеет много больший период полураспада, чем остальные, зависимость скорости счета измеряется для времен выдержки, при которых влияние остальных изотопов несущественно. При мешающих реакциях с большими или близкими периодами полураспада их вклад вычитают, используя формулу (1.3.1.1), или применяют метод наименьших квадратов (МНК).

Активность связана со скоростью счета в момент окончания облучения следующим соотношением:

$$Q(T, t_B = 0) = k_{\text{сп}} k_1 k_3 n_{\beta}(t_B = 0), \quad (1.3.1.2)$$

где $k_{\text{сп}}$, k_1 и k_3 – поправки на самопоглощение, поглощение в пленке держателя и эффективность регистрации β -частиц, соответственно.

1.3.2 Определение активности по выходу γ -излучения однокристалльным гамма-спектрометром

Для определения активности по γ -излучению, как правило, используют однокристалльный сцинтилляционный или полупроводниковый спектрометр с набором электронной аппаратуры.

Сигналы детектора фотонов можно регистрировать одноканальным анализатором. Одноканальный анализатор, регистрирующий число импульсов в заданных пределах

амплитуд, применяют при относительных измерениях и при измерениях методом замещения. Метод замещения основан на сравнении скоростей счета от измеряемого детектора и аттестованного источника, по форме близкого к активационному детектору и имеющего такую же или мало отличающуюся энергию γ -квантов. Так как метод замещения возможен лишь для ограниченного числа детекторов, то в γ -спектрометрии обычно применяют многоканальные амплитудные анализаторы. С последующим подсчетом числа импульсов, зарегистрированных в пике полного поглощения. Чаще всего спектр зарегистрированных импульсов обрабатывается на компьютере. Применение ПК облегчает обработку спектров, а для полупроводникового спектрометра, пик полного поглощения которого асимметричен, является практически единственно возможным методом (при высокой точности измерений числа импульсов в пике полного поглощения).

Активность детектора связана с числом импульсов в пике полного поглощения от γ -квантов с энергией E следующим соотношением:

$$Q(T, t_B) = \frac{k_{\text{сн}} k_{\Delta t} k_c k_d S_{\gamma}(t_B)}{(\Delta t - t_M) p_{\gamma}(E) \epsilon(E)}, \quad (1.3.2.1)$$

где $Q(T, t_B)$ – активность детектора при времени экспозиции T , через время t_B после окончания облучения и с соответствующими поправками; $k_{\text{сн}}$ – поправка на самопоглощение γ -квантов, $k_{\Delta t}$ – поправка на распад изотопа во время измерения, k_c – поправка на суммирование каскадных γ -квантов; k_d – поправка, учитывающая отличие размеров детекторов от размеров калибровочных источников; $\Delta t, t_M$ – время измерения и мертвое время анализатора; $p_{\gamma}(E)$ – выход γ -квантов с энергией E на распад; $\epsilon(E)$ – эффективность регистрации γ -квантов с энергией E .

1.4 Детекторы для определения характеристик поля быстрых нейтронов

Для определения плотности потока (флюенса) и энергетического спектра быстрых нейтронов применяют пороговые реакции с испусканием заряженных частиц, двух нейтронов (n, α) , (n, p) , $(n, 2n)$, неупругого рассеяния нейтронов (n, n') и деления (n, f) .

Сечения пороговых реакций, используемых для определения характеристик поля быстрых нейтронов, подбираются исходя из исследуемой области нейтронного поля. В настоящее время имеется ряд библиотек оцененных сечений как общего назначения, так и специально предназначенных для определения спектра нейтронов.

Авторами работы [4] рекомендуются энергетические зависимости сечений 19 пороговых реакций, наиболее часто применяющихся для активационной спектрометрии

быстрых нейтронов. Ниже приведены характеристики некоторых реакций и детекторов на их основе, применяемых авторами при измерениях спектров быстрых нейтронов.

1.4.1 Реакции деления (n, f)

Основные пороговые реакции деления ^{237}Np (n,f), ^{238}U (n,f), ^{232}Th (n,f). Применяют также всеволновые детекторы с реакциями ^{239}Pu (n,f), ^{235}U (n,f), у которых пороговый вид энергетической зависимости сечения формируется фильтром из обогащенного ^{10}B .

1.4.2 Реакции неупругого рассеяния (n, n')

Число (n,n') - реакций, образующих изомеры с удобными для измерения периодами полураспада (несколько десятков минут и больше), невелико. Кроме того, энергетическая зависимость сечений многих из них недостаточно изучена.

Реакция ^{103}Rh (n,n') $^{103\text{m}}\text{Rh}$ характеризуется одним из самых низких порогов регистрации. Активность $^{103\text{m}}\text{Rh}$ регистрируют по характеристическому излучению (20 кэВ) или по выходу конверсионных электронов. При экспозиции в кадмиевом фильтре основная мешающая реакция ^{103}Rh (n, γ) $^{104\text{m}}\text{Rh}$ ($T_{1/2} = 4,4$ мин) и реакция, идущая на примесях иридия, ^{193}Ir (n, γ) ^{194}Ir ($T_{1/2} = 19$ ч).

Широко применяют также реакцию ^{115}In (n,n') $^{115\text{m}}\text{In}$. Активность измеряют однокристалльным спектрометром. Необходимо учитывать самопоглощение γ -квантов. Основные мешающие реакции ^{115}In (n, γ) $^{116\text{m}}\text{In}$ ($T_{1/2} = 54$ мин) и ^{113}In (n, γ) $^{114\text{m}}\text{In}$ ($T_{1/2} = 50$ суток). Оптимальный расчет проводят через (20 – 40) часов после облучения.

Реакция ^{204}Pb (n,n') $^{204\text{m}}\text{Pb}$. Практическое отсутствие мешающих реакций при облучении под кадмием для детекторов из особо чистого свинца позволяет легко регистрировать γ -излучение. Чувствительность значительно повышается при применении детекторов, обогащенных изотопом ^{204}Pb .

Реакция ^{111}Cd (n,n') $^{111\text{m}}\text{Cd}$ перспективная и тоже часто используется. Необходимо облучение под ^{10}B . Вклад мешающей реакции ^{110}Cd (n, γ) $^{111\text{m}}\text{Cd}$ может быть учтен применением детекторов с известным содержанием изотопов ^{111}Cd и ^{110}Cd .

1.4.3 Реакции захвата с испусканием протона (n, p)

Одна из таких реакций $^{31}\text{P} (n,p)^{31}\text{Si}$. Основные мешающие реакции $^{31}\text{P}(n, \alpha)^{28}\text{Al}$ ($T_{1/2} = 2,24$ мин) и $^{31}\text{P}(n,\gamma)^{32}\text{P}$ ($T_{1/2} = 14,29$ суток). Вклад реакции (n, α) незначителен и через 30 мин после облучения не существенен. Реакция (n, γ) также имеет малый вклад, который проявляется при больших временах выдержки.

При использовании реакции $^{32}\text{S} (n,p)^{32}\text{P}$ детекторы изготавливают из естественной серы или сернокислого аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Мешающие реакции при временах выдержки (2 – 3) суток не существенны. Детекторы, регистрирующие нейтроны по реакции $^{58}\text{Ni} (n,p)^{58}\text{Co}$, изготавливают из никелевой фольги толщиной (0,2 – 0,4) мм.

При применении реакций $^{64}\text{Zn} (n,p)^{64}\text{Cu}$ детекторы изготавливают из металлического цинка. Основная мешающая реакция $^{68}\text{Zn}(n, \gamma)^{69\text{m}}\text{Zn}$ ($T_{1/2} = 13,8$ ч). При регистрации нейтронов по реакции $^{54}\text{Fe} (n,p)^{54}\text{Mn}$ желательно иметь детекторы, обогащенные изотопом ^{54}Fe . Основная мешающая реакция $^{58}\text{Fe} (n,\gamma)^{59}\text{Fe}$ ($T_{1/2} = 45,6$ суток).

При реакции $^{27}\text{Al} (n, p)^{27}\text{Mg}$ детекторы изготавливают из алюминиевой фольги (20 – 150) мг/см². Основные мешающие реакции $^{27}\text{Al}(n, \gamma)^{28}\text{Mg}$ ($T_{1/2} = 2,24$ мин) и $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ ($T_{1/2} = 15,0$ ч).

При реакции $^{56}\text{Fe} (n,p)^{56}\text{Mn}$ активность может быть измерена методом β - γ -совпадений и по выходу γ - и β -излучения. Мешающие реакции при временах выдержки (0,5 – 3) ч практически не проявляются.

1.4.4 Реакции захвата нейтрона с испусканием α -частицы (n, α)

Широко используется реакция $^{27}\text{Al} (n,\alpha)^{24}\text{Na}$. Активность измеряют по выходу γ - и β -излучения, а также методом β - γ -совпадений. Вклад мешающих реакций при временах выдержки (3 – 4) ч пренебрежимо мал.

1.4.5 Реакции захвата с испусканием двух нейтронов (n, 2n)

Реакции обладают наиболее высокими порогами регистрации. Число применяемых реакций ограничено чувствительностью детекторов и возможностью точного измерения наведенной активности. Спектр в этом диапазоне энергий резко спадает.

$^{19}\text{F}(n,2n)^{18}\text{F}$ – наиболее часто применяемая (n,2n) – реакция. Полное отсутствие мешающих реакций с заметными периодами полураспада. Активность может быть измерена методом γ - γ -совпадений. Детекторы часто изготавливают из тефлона.

Реакция $^{64}\text{Zn} (n,2n) ^{63}\text{Zn}$ – мало используемая, но перспективная реакция с одним из наиболее высоких порогов.

1.5 «Восстановление» спектров быстрых нейтронов с применением компьютерных программ

Сущность задачи получения (восстановления) спектра нейтронов из измеренных активационных интегралов реакций с различающимися энергетическими зависимостями сечений заключается в решении уравнения Фредгольма первого рода

$$q_i = \int_0^{\infty} \sigma_i(E) \varphi(E) dE, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1.5.1)$$

где $\sigma_i(E)$ – энергетическая зависимость сечения i -й пороговой реакции; q_i – активационный интеграл/скорость реакции.

Решение данного уравнения строго математически не является корректным, так как существует множество решений, удовлетворяющих (1.5.1). Для получения физически обоснованных результатов требуются дополнительные предположения о ядре уравнения; например, это гладкость спектра решения, его неотрицательность и ограниченность, дифференцируемость и т.д.

Погрешность восстановления спектра зависит от точности определения скоростей реакций, точности используемых сечений и степени сходимости алгоритма метода решения. Следует отметить, что точность знания сечения может быть неодинаковой в рассматриваемом диапазоне энергий. Максимальная точность требуется в области максимума подынтегральной функции. В настоящее время для большинства используемых реакций сечения в этой области энергий известны с погрешностью не более (5 – 10) %. Скорости реакций могут быть измерены с погрешностью (1 – 5) %. Таким образом, методы восстановления спектров нейтронов должны обладать хорошей устойчивостью к погрешностям в исходных данных.

Ниже рассмотрены только те методы, которые обеспечивают получение достоверных результатов и являются наиболее популярными в последние годы. Описание этих методов дается по обзорным работам [5, 6].

1.5.1 Метод SAND

Используется итерационный поиск решения, удовлетворяющего условию

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i \left(\frac{q_i - \sum_{j=1}^m \sigma_{ij} \varphi_j^{k+1}}{q_i} \right)^2 \leq \delta_0. \quad (1.5.1.1)$$

Значения спектра, полученные в $(k + 1)$ – приближении и удовлетворяющие условию (1.5.1.1), получаются из значений спектра, выбранного в качестве начального приближения φ_j^1 :

$$\varphi_j^{k+1} = \varphi_j^1 \exp \left[\sum_{z=1}^k \beta_j^z \right],$$

$$\beta_j^k = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{ij}}{q_i^k} \ln \frac{q_i}{q_i^k} / \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{ij}}{q_i^k}, \quad (1.5.1.2)$$

где

$$q_i^k = \sum_{j=1}^m \sigma_{ij} \varphi_j^k. \quad (1.5.1.3)$$

Алгоритм метода SAND реализован в программах: SAND II, SANDDC, SANDMX, ITER-2 и ПРОСПЕКТ-1 и других. Шкалу энергии разбивают на 620 интервалов; максимальное число детекторов 35. Метод устойчив к погрешностям в исходных данных. Алгоритм исключает появление отрицательных решений. Можно считать метод SAND лучшим методом восстановления спектра из применяемых за рубежом.

1.5.2 МНР (метод направленного расхождения)

Математическое обоснование метода разработано М.З. Тараско. Модификации МНР получили широкое распространение. Рассмотрим алгоритм метода на примере программ ММП и ЛИКМЕТ.

Значения искомого спектра φ_j^{k+1} должны удовлетворять условию

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^m \sigma_{ij} \varphi_j^{k+1}}{q_i} \right)^2 \leq \delta_0. \quad (1.5.2.1)$$

Значения δ_0 задается априорно. В указанных программах оно определяется следующим образом:

$$\delta_0 = k_\delta \sum_{i=1}^n [s^2(q_i)]^{-1}, \quad (1.5.2.2)$$

где: $s^2(q_i)$ – относительная дисперсия измеренных скоростей активации; k_δ – коэффициент, определяемый из тестовых восстановлений спектра; обычно $k_\delta = (0.25 \div 1)$.

Алгоритм получения значений φ_j^{k+1} находим из следующих преобразований.

Пусть искомые значения φ_j^{k+1} минимизируют функционал

$$\Delta = \sum_{i=1}^n \left[1 - \frac{\sum_{j=1}^n \sigma_{ij} \varphi_j^{k+1}}{q_i} \right]^2. \quad (1.5.2.3)$$

Значение этого минимума определяется функцией φ_j^k . Очевидно, что выполнения условия (1.5.2.1) можно достигнуть итерационным процессом следующего вида:

$$\varphi_j^{k+1} = \varphi_j^1 \prod_{z=1}^k \left[\frac{\sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{ij}}{q_i^z}}{\sum_{i=0}^n \frac{\sigma_{ij}}{q_i}} \right], \quad (1.5.2.3)$$

где φ_j^1 – спектр, выбранный в начальном приближении, а

$$q_i^z = \sum_{j=1}^m \sigma_{ij} \varphi_j^z.$$

Следует отметить, что алгоритмы методов SAND и МНР, разработанные независимо, очень близки. Сравнение методов [7] при восстановлении спектра быстрых нейтронов из измеренных скоростей активации показало, что для одинаковых начальных приближений результаты отличаются друг от друга незначительно.

1.5.3 Метод статистической регуляризации

Как уже упоминалось выше, системе уравнений (1.5.1) удовлетворяет множество решений [8]. Применение вышеописанных методов позволяет получить единственное решение системы. Но это решение часто бывает осциллирующим. Метод регуляризации позволяет определить единственное решение системы уравнений, которое является неосциллирующим и в пределах погрешностей удовлетворяет системе уравнений (1.5.1). Сущность метода заключается в следующем. Решение $\varphi(E)$ ищется на множестве гладких функций, т. е. $\varphi(E)$ определяется из минимума функционала

$$I[\varphi(E)] = \sum_{i=1}^n \left[A_i - \int \sigma_i(E) \varphi(E) dE \right]^2 \omega_i + \alpha \int \rho(E) [\varphi'(E)]^2 dE. \quad (1.5.3.1)$$

Здесь ω_i – статистический вес A_i ; $\rho(E)$ – весовая функция; α – параметр регуляризации.

Второй член функционала (1.5.3.1) ограничивает значение производной функции $\varphi(E)$ и позволяет избавиться от осцилляции решения. Весовая функция $\rho(E)$ учитывает априорную информацию о спектре. Например, до опыта известно, что в некоторой области энергий спектр имеет провал. Если положить $\rho(E) = 1$, то этот провал сгладится, и полученный спектр будет в этой области существенно отличаться от истинного. Но если выбрать $\rho(E)$ в этой области так, что $\rho(E)[\varphi'(E)]^2$ мало, хотя $[\varphi'(E)]^2$ и велико, то провал будет наблюдаться и в решении. Решение находится следующим образом. Пусть, например, мы используем многогрупповой метод. Для каждого α , начиная с 0, находим решение из условия минимума функционала (1.5.3.1). Затем, используя полученное решение, находим значение $I[\varphi(E)]$. За конечное решение берется то решение, при котором

$$I[\varphi(E)] \approx \sum_i \omega_i D(A_i), \quad (1.5.3.2)$$

где $D(A_i)$ – дисперсия A_i .

Применение данного метода позволяет получить хорошие результаты, свободные от описанных выше недостатков. Единственная трудность, с которой сталкиваются при применении данного метода, это то, что он требует много компьютерного времени и в отдельных случаях необоснованно «заглаживает» решение.

1.6 Метод «эффективных» пороговых сечений

Метод эффективных пороговых сечений – наиболее простой способ получения информации о плотности потока и спектре быстрых нейтронов. Он основан на представлении энергетической зависимости сечения реакции ступенчатой функцией вида

$$\sigma(E) = \begin{cases} 0, & E < E_{\text{эф}}, \\ \sigma_{\text{эф}}, & E \geq E_{\text{эф}}. \end{cases} \quad (1.6.1)$$

Значения $\sigma_{\text{эф}}$ и $E_{\text{эф}}$ могут быть выбраны таким образом, чтобы активационный интеграл не изменялся:

$$\int_0^{\infty} \sigma(E)\varphi(E) dE = \sigma_{\text{эф}} \int_{E_{\text{эф}}}^{\infty} \varphi(E) dE. \quad (1.6.2)$$

При этом подходе существует некоторый произвол выбора эффективных сечений (порогов). Кроме того, при фиксированных сечениях (порогах) значения вычисляемых порогов (сечений) будут зависеть от вида спектра.

Одна из методик определения эффективного порога и сечения состоит в следующем: подбирается широкий класс различающихся реакторных спектров, полученных расчетным или экспериментальным путем, и рассчитываются активационные интегралы по используемым энергетическим зависимостям сечений реакций для подобранных спектров. Для каждого спектра нейтронов подсчитывается зависимость вида

$$\sigma_{\text{эф}}^i(E_{\text{эф}}) = f_i(E_{\text{эф}}) = \int_0^{\infty} \varphi_i(E) \sigma(E) dE / \int_{E_{\text{эф}}}^{\infty} \varphi_i(E) dE. \quad (1.6.3)$$

Эффективный порог выбирают из условия минимального разброса значений в зависимости (1.6.3), а значения эффективного сечения выбирают в пределах разброса расчета сечения для ряда спектров.

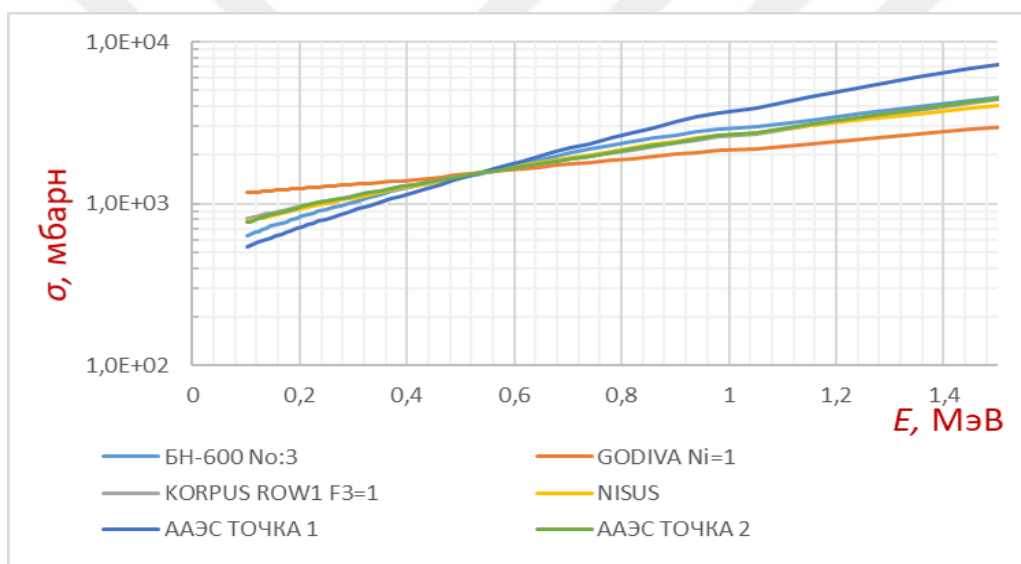


Рисунок 1.1 Зависимость эффективных сечений от эффективной энергии для реакции $^{237}\text{Np}(n, f)$ для 6 выбранных спектров.

На рисунке 1.1 в качестве примера представлены такие зависимости для ядерной реакции $^{237}\text{Np}(n, f)$ для 6 выбранных спектров. Здесь достаточно четко прослеживается область сгущения функций вблизи энергии 0,55 МэВ.

Применяя метод эффективного порогового сечения, можно определить значения плотности потока нейтронов с энергией, большей энергии эффективного порога для применяемых реакций:

$$\Phi(E > E_{\text{эф}}^i) = \int_{E_{\text{эф}}^i}^{\infty} \varphi(E) dE = q_i / \sigma_{\text{эф}}^i. \quad (1.6.4)$$

Глава 2 Оценка эффективных сечений пороговых реакций

2.1 Расчетный блок

Для поставленных целей были отобраны 30 спектров ядерно-физических установок и 17 сечений ядерных реакций из библиотеки программ информационно-вычислительного комплекса «MIXER». Выбранные следующие реакции: $^{19}\text{F}(n, 2n)$, $^{27}\text{Al}(n, a)$, $^{27}\text{Al}(n, p)$, $^{31}\text{P}(n, p)$, $^{32}\text{S}(n, p)$, $^{48}\text{Ti}(n, p)$, $^{54}\text{Fe}(n, p)$, $^{56}\text{Fe}(n, p)$, $^{58}\text{Ni}(n, p)$, $^{63}\text{Cu}(n, \alpha)$, $^{90}\text{Zr}(n, 2n)$, $^{93}\text{Nb}(n, 2n)$, $^{103}\text{Rh}(n, n')$, $^{111}\text{Cd}(n, n')$, $^{115}\text{In}(n, n')$, $^{204}\text{Pb}(n, n')$, $^{237}\text{Np}(n, f)$.

Для определения эффективных сечений для ряда ядерных реакций, соответствующих эффективным энергиям, в работе над проектом написана программа в среде Excel. Реализован алгоритм экспрессного метода и метода пороговых сечений в соответствии с рассмотренным подходом в параграфе 1.6. В качестве начальных параметров введены матрицы сечений указанных реакций в зависимости от энергии. Проведены предварительные расчеты зависимостей сечений от энергии для выбранных реакций для всего набора из 30 выбранных спектров. По выбранному ранее алгоритму затем рассчитаны эффективные сечения для выбранных реакций и соответствующие им эффективные энергии. Пример расчетов по разработанному в данной работе алгоритму представлен в Приложении.

Построены графики эффективных сечений в зависимости от эффективной энергии нейтронов для каждой реакции. В графиках имеется выраженная область сгущения с минимальным разбросом параметров. Эта область соответствует искомым значениям эффективных сечений и энергий.

Проведен расчет неопределенности эффективных сечений по формуле:

$$\Delta = \sqrt{\frac{\Delta_{\sigma}^2 + \Delta_{\varphi}^2 + \Delta_{\text{ста}}^2}{n - 1}}. \quad (2.1.1)$$

Где Δ_{σ} – погрешность сечения реакции (3%), Δ_{φ} – погрешность определения спектров (6%), n – количество составляющих элементов погрешности результатов, $\Delta_{\text{ста}}$ – разброс результатов вблизи точки сгущения.

$$\Delta_{\text{ста}} = \frac{\Delta\sigma_{\text{эфф}}}{\sigma_{\text{эфф}}} * 100\%. \quad (2.1.2)$$

Где $\Delta\sigma_{эфф}$ – разброс эффективных сечений реакции, $\sigma_{эфф}$ – среднее значение эффективных сечений с минимальным разбросом. Рассчитанные значения $\Delta\sigma_{эфф}$, $\sigma_{эфф}$ и $E_{эф}$ для всех выбранных 17 реакций представлены в части Приложения в таблицах 1-17.

Ниже в таблице 2.1 представлены рассчитанные по разработанной программе значения эффективных сечений и их неопределенности для 17 реакций.

Таблица 2.1 Эффективные сечения реакций (расчет)

Реакция	Рассчитанные эффективные сечения $\sigma_{эфф}$. (с оцененными значениями неопределенности).	Реакция	Рассчитанные эффективные сечения $\sigma_{эфф}$. (с оцененными значениями неопределенности).
19F(n,2n)	61,9 мб ($\pm 5,0\%$)	63Cu(n, α)	23,1 мб ($\pm 5,4\%$)
27Al(n, α)	84,6 мб ($\pm 5,0\%$)	90Zr(n,2n)	903 мб ($\pm 5\%$)
27Al(n,p)	69,4 мб ($\pm 5,8\%$)	93Nb(n,2n)	422 мб ($\pm 5\%$)
31P (n, p)	101 мб ($\pm 6\%$)	103Rh(n,n')	743 мб ($\pm 9\%$)
32S (n, p)	221 мб ($\pm 6\%$)	111Cd(n, n')	306 мб ($\pm 6\%$)
48Ti(n,p)	27,8 мб ($\pm 6\%$)	115In(n, n')	295 мб ($\pm 6\%$)
54Fe(n,p)	294 мб ($\pm 6,2\%$)	204Pb(n, n')	177 мб ($\pm 7\%$)
56Fe(n,p)	56,4 мб ($\pm 5,3\%$)	237Np(n, f)	1430 мб ($\pm 6\%$)
58Ni(n,p)	324 мб ($\pm 7\%$)		

2.2 Анализ результатов расчетов

В данной работе определены эффективные сечения и эффективные энергии с учетом базы спектров из информационно-вычислительного комплекса (ИВК) программ «MIXER» по написанной программе в среде Excel для 17 ядерных реакций по 30 исходным спектрам. Полученные данные занесены в таблицу 2.2, в которой представлены также данные разных авторов для указанных реакций.

На рисунках (2.1 – 2.17) также даны обобщенные результаты расчетов эффективных сечений в зависимости от эффективной энергии нейтронов для реакций из выбранной номенклатуры. Результаты представлены для всего набора 30 предварительно отобранных спектров из ИВК «MIXER».

Таблица 2.2 Эффективные сечения и эффективные энергии для ряда ядерных реакций

Эффективные пороги и сечения реакций по данным разных авторов										
Авторы	[9]		[10]		[11]		[12]		[отчет]	
Реакция	$E_{эф}, \text{МэВ}$	$\sigma_{эф}, \text{Мб}$	$E_{эф}, \text{МэВ}$	$\sigma_{эф}, \text{Мб}$	$E_{эф}, \text{МэВ}$	$\sigma_{эф}, \text{Мб}$	$E_{эф}, \text{МэВ}$	$\sigma_{эф}, \text{Мб}$	$E_{эф}, \text{МэВ}$	$\sigma_{эф}, \text{Мб}$
19F(n,2n)	12,80	50±8	12,80	50±2	12,80	51,9±1,0	–	–	13,15	61,9±5
27Al(n, α)	7,40	75,5±3,2	7,45	77±7	7,20	65,7±2,0	7,20	66±4	7,55	84,6±5
27Al(n,p)	4,50	51,3±4,5	4,50	48±4	4,40	51±5	4,40	47±3	4,95	69,4±5,8
31P (n,p)	–	–	2,55	116±10	2,30	101±5	2,40	114±9	2,25	101±6
32S (n,p)	2,60	232±37	2,65	250±5	3,00	306±25	2,90	295±16	2,45	221±6
48Ti(n,p)									7,25	27,8±6
54Fe(n,p)	3,00	398±36	3,00	370±20	3,00	386±23	3,10	401±25	2,55	294±6,2
56Fe(n,p)	6,60	65,3±4,8	6,60	60±5	6,40	56,6±3,4	6,00	40±3	6,45	56,4±5,3
58Ni(n,p)	2,60	232±37	2,65	250±5	3,00	306±25	2,90	295±16	2,25	324±7
63Cu(n, α)									6,25	23,1±5,4
90Zr(n,2n)									13,35	903±5
93Nb(n,2n)									10,35	422±5
103Rh(n,n')	0,80	935±45	0,80	950±50	0,70	920±37	0,80	962±50	0,4875	743±9
111Cd(n,n')									1,15	306±6
115In(n,n')	1,15	285±10	1,15	290±10	1,20	288±25	1,20	303±13	1,15	295±6
204Pb(n,n')									3,85	177±7
237Np(n,f)	0,60	1620±80	0,65	1500±100	0,58	1600±48	0,60	1575±60	0,4625	1430±6

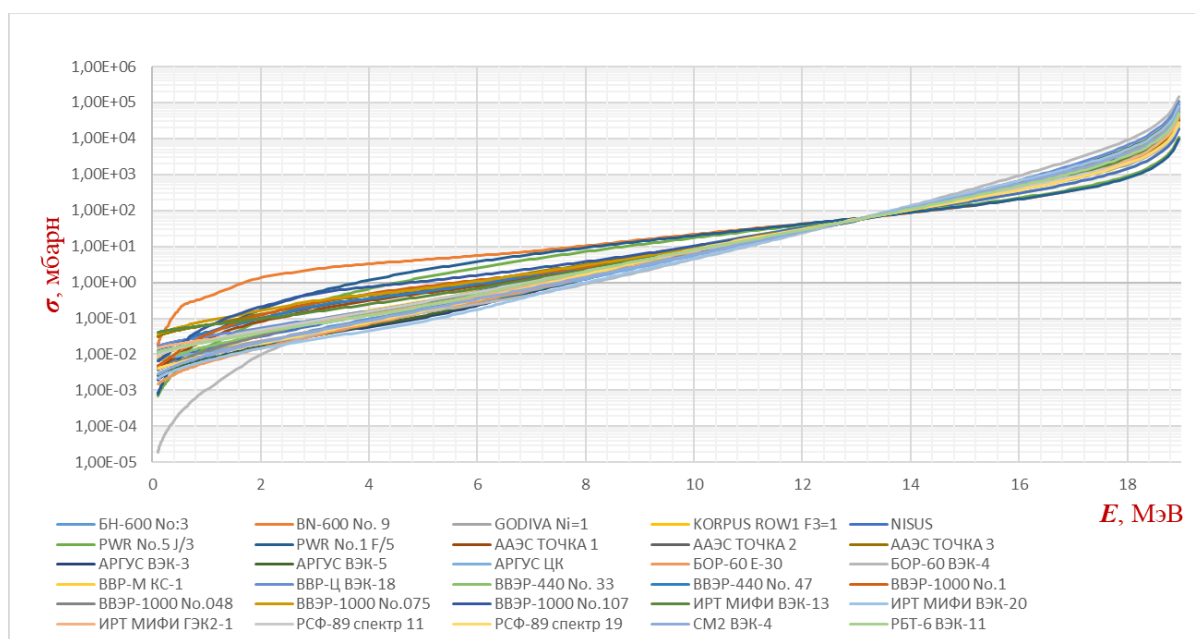


Рисунок 2.1 Эффективные сечения в зависимости от эффективной энергии нейтронов для реакции $^{19}\text{F}(n,2n)$

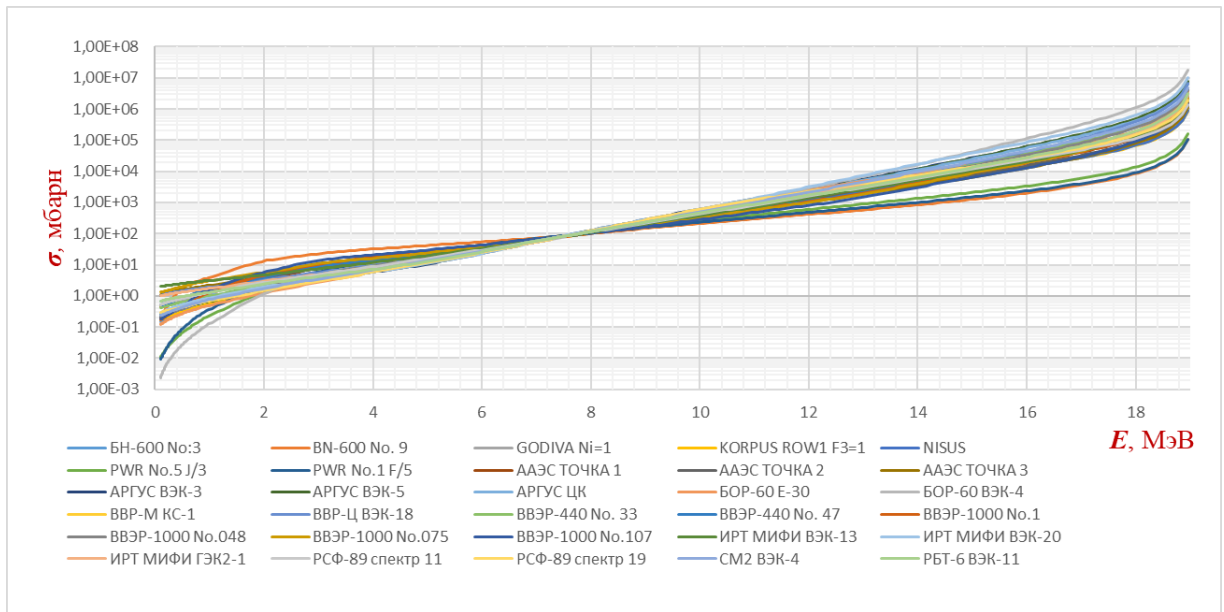


Рисунок 2.2 Эффективные сечения в зависимости от эффективной энергии нейтронов для реакции $^{27}\text{Al}(n, \alpha)$

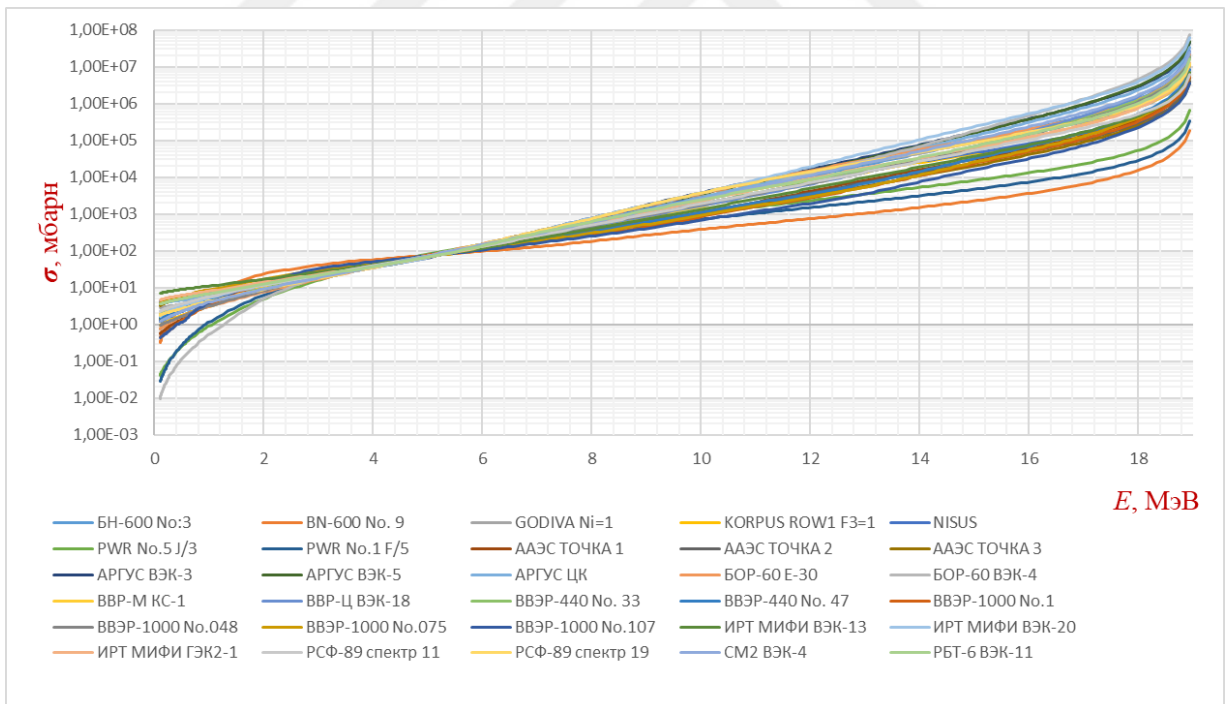


Рисунок 2.3 Эффективные сечения в зависимости от эффективной энергии нейтронов для реакции $^{27}\text{Al}(n, p)$

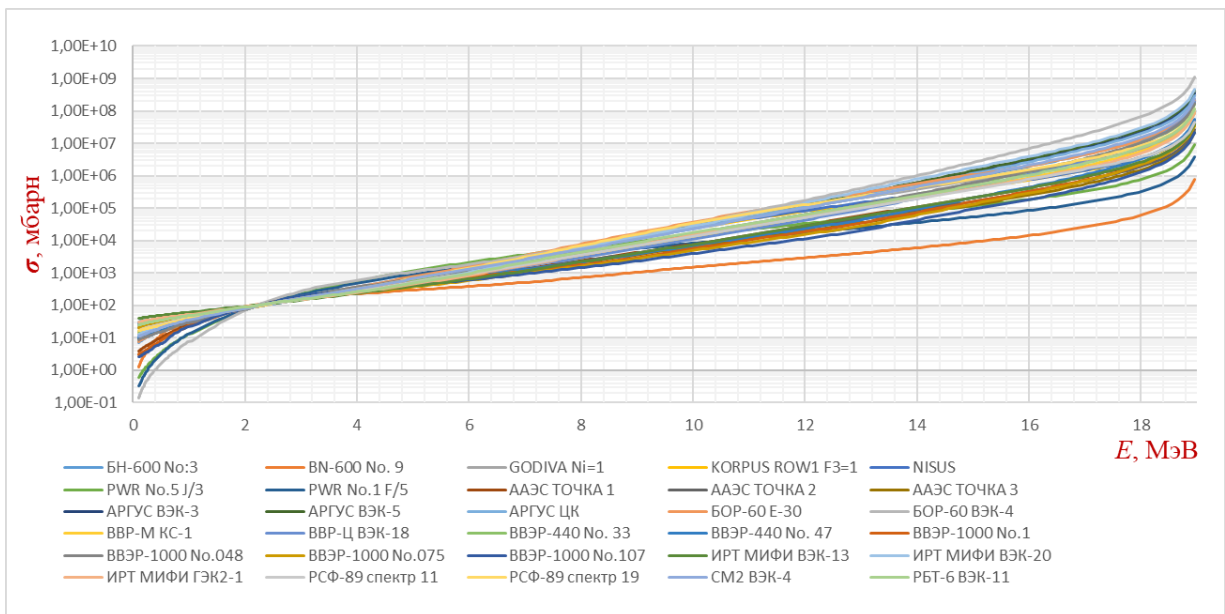


Рисунок 2.4 Эффективные сечения в зависимости от эффективной энергии нейтронов для реакции $^{31}\text{P}(n,p)$

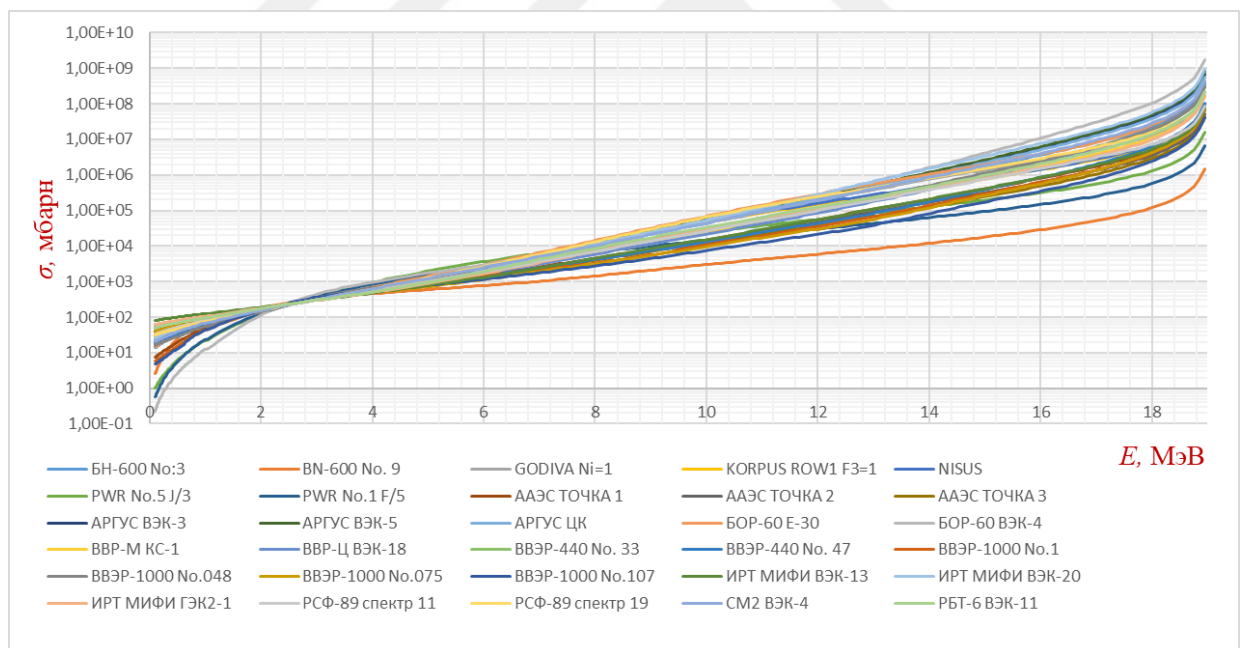


Рисунок 2.5 Эффективные сечения в зависимости от эффективной энергии нейтронов для реакции $^{32}\text{S}(n,p)$

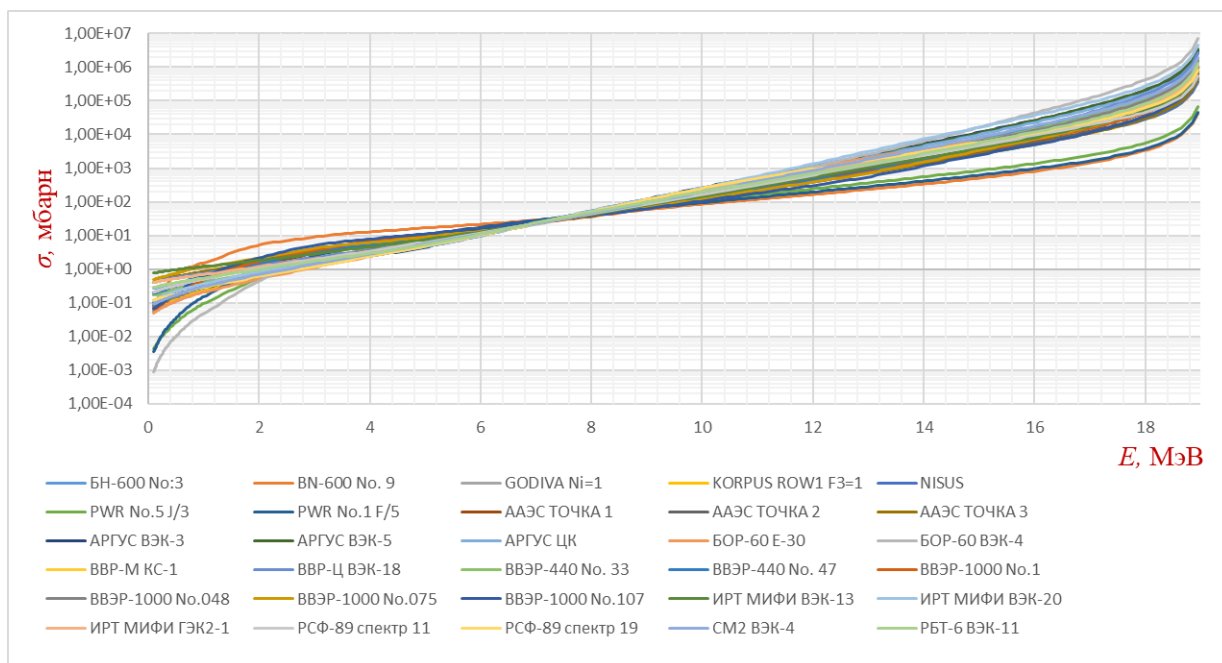


Рисунок 2.6 Эффективные сечения в зависимости от эффективной энергии нейтронов для реакции $^{48}\text{Ti}(n, p)$

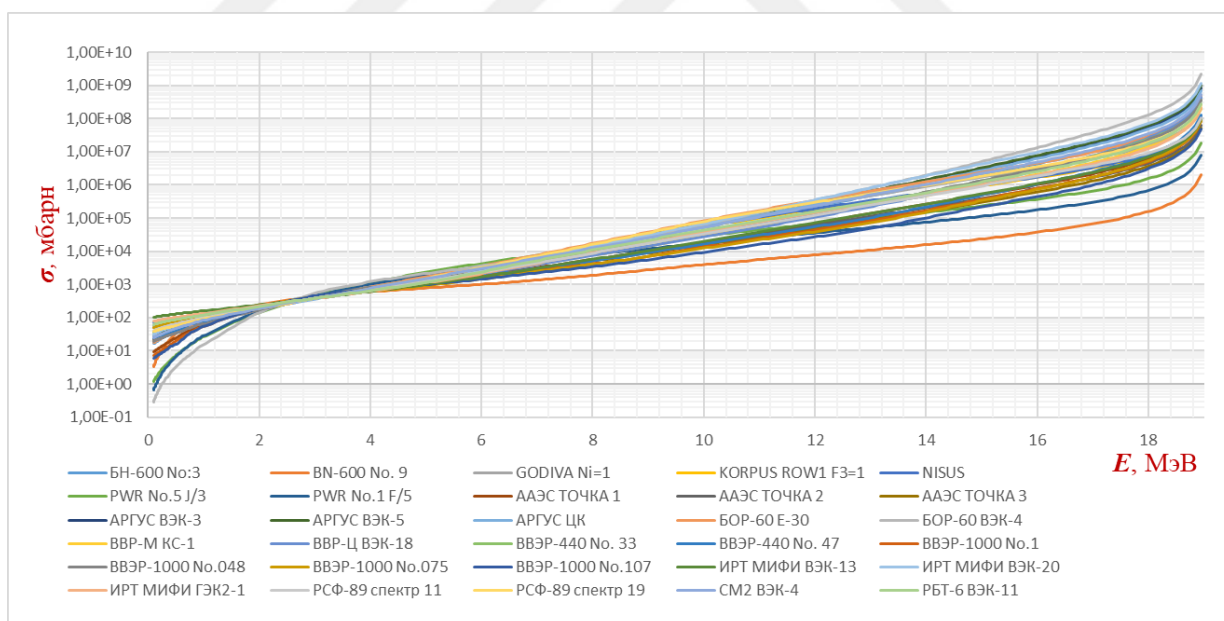


Рисунок 2.7 Эффективные сечения в зависимости от эффективной энергии нейтронов для реакции $^{54}\text{Fe}(n, p)$

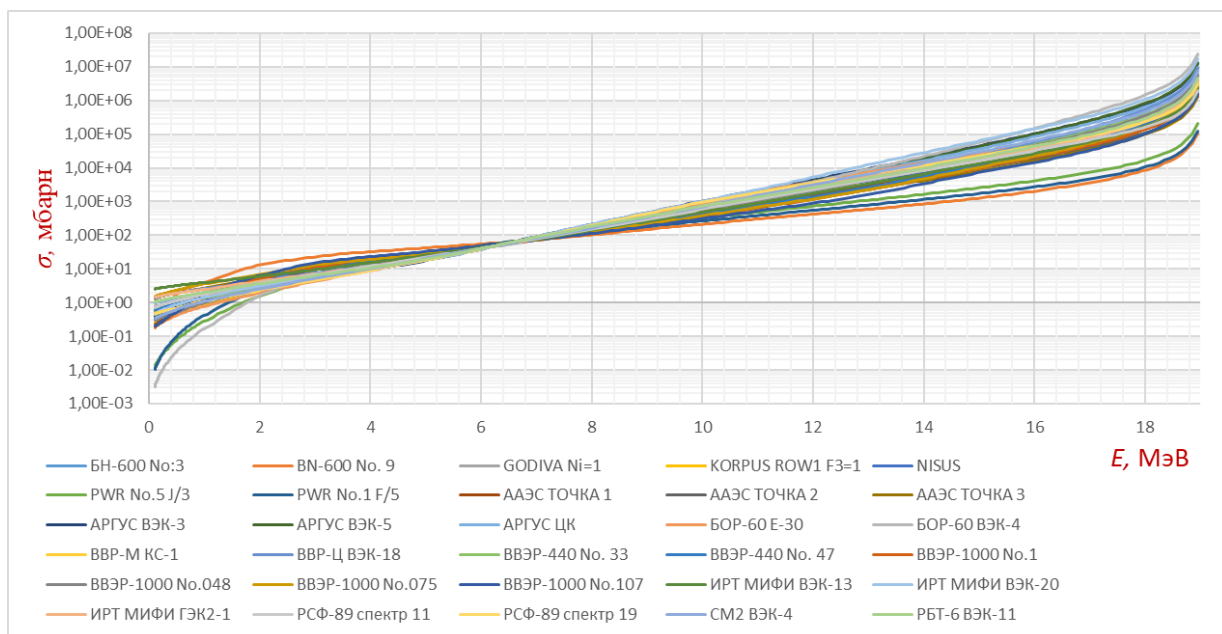


Рисунок 2.8 Эффективные сечения в зависимости от эффективной энергии нейтронов для реакции $^{56}\text{Fe}(n, p)$

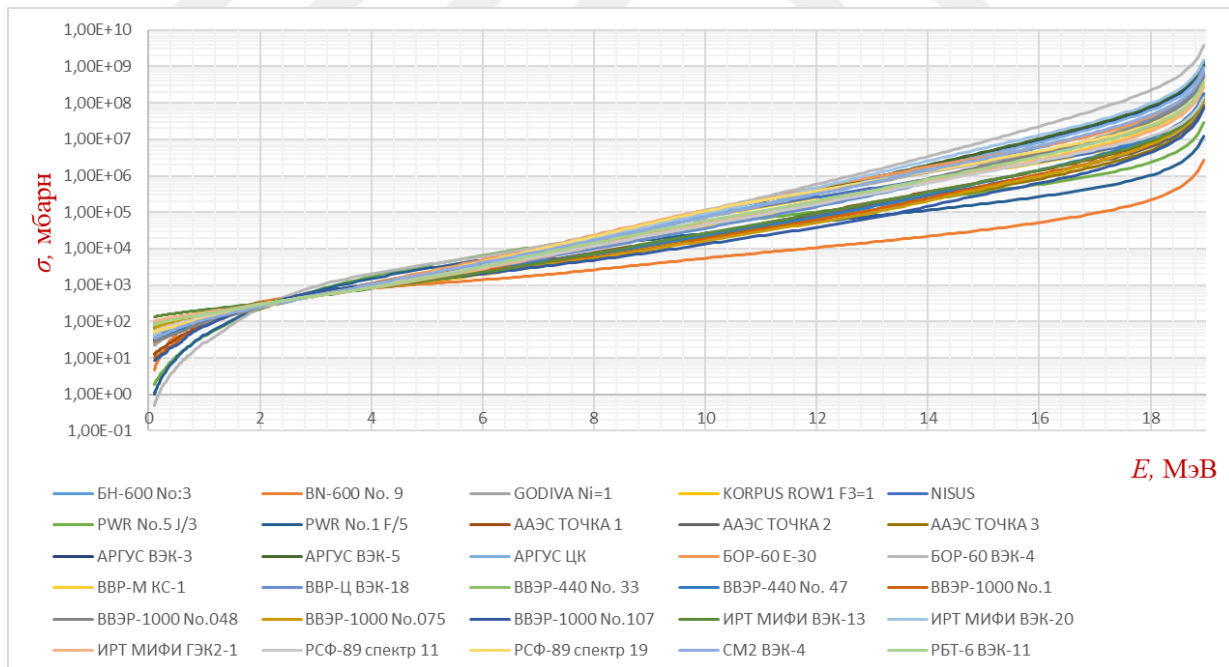


Рисунок 2.9 Эффективные сечения в зависимости от эффективной энергии нейтронов для реакции $^{58}\text{Ni}(n, p)$

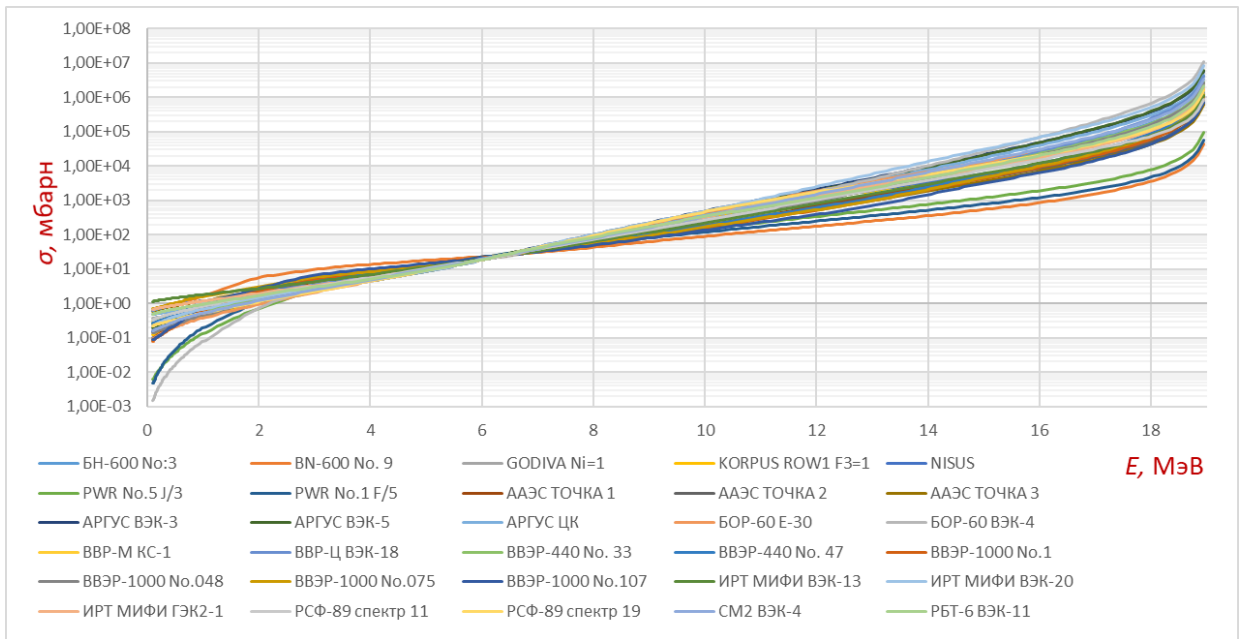


Рисунок 2.10 Эффективные сечения в зависимости от эффективной энергии нейтронов для реакции $^{63}\text{Cu}(n, \alpha)$

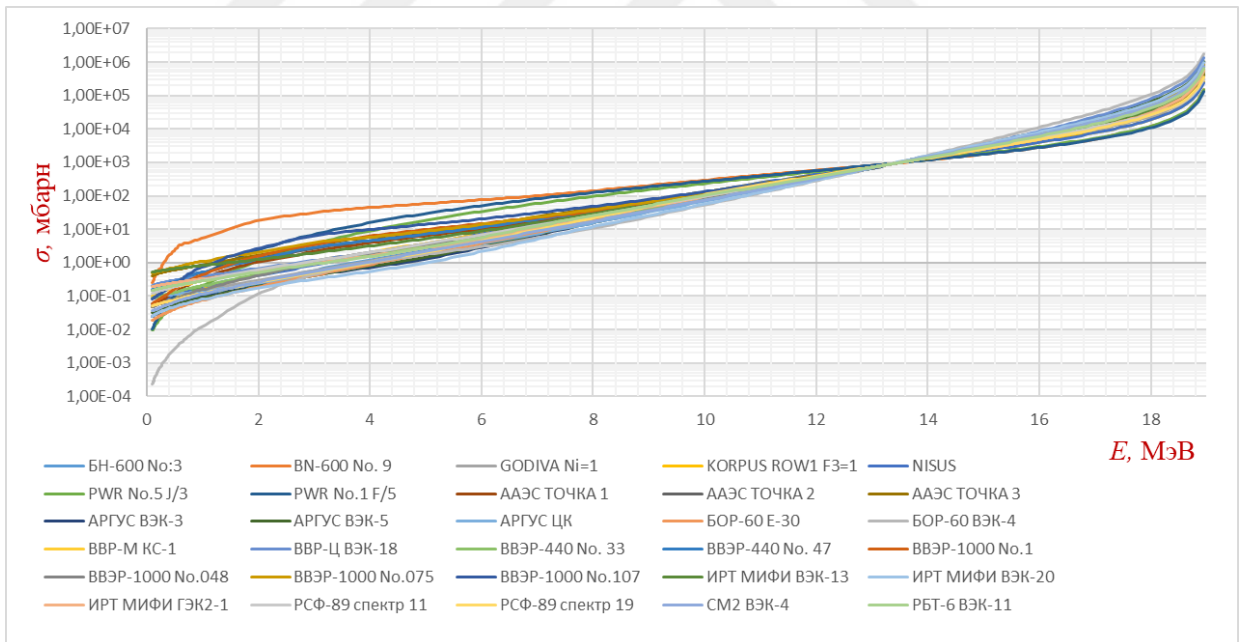


Рисунок 2.11 Эффективные сечения в зависимости от эффективной энергии нейтронов для реакции $^{90}\text{Zr}(n,2n)$

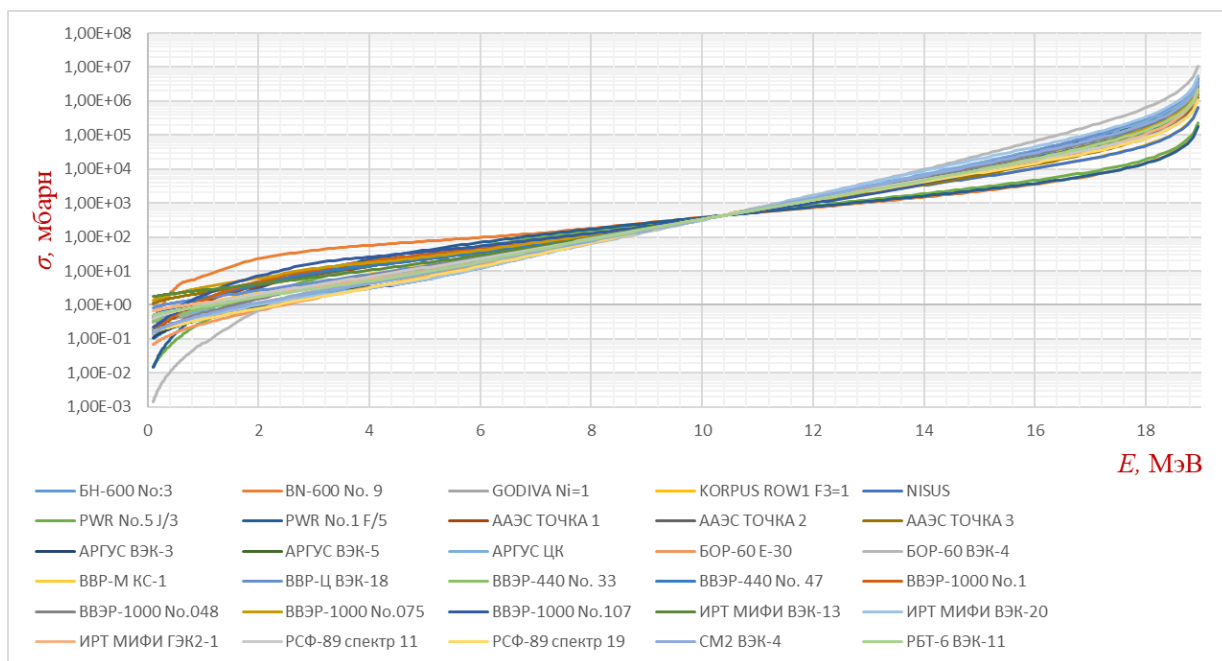


Рисунок 2.12 Эффективные сечения в зависимости от эффективной энергии нейтронов для реакции $^{93}\text{Nb}(n,2n)$

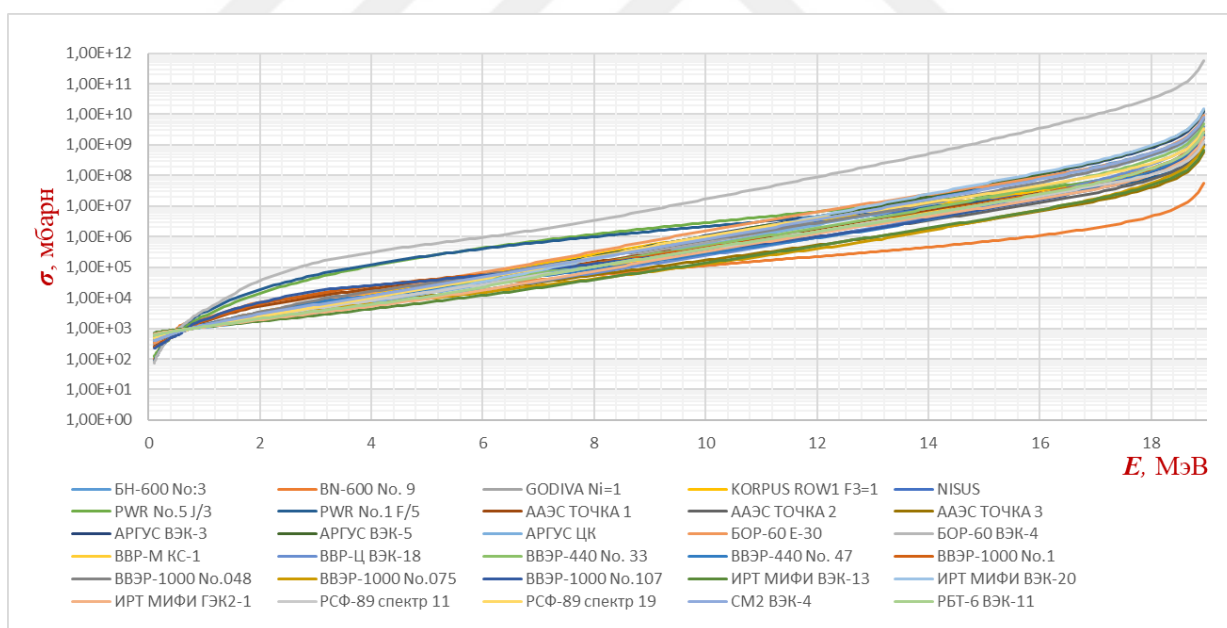


Рисунок 2.13 Эффективные сечения в зависимости от эффективной энергии нейтронов для реакции $^{103}\text{Rh}(n, n')$

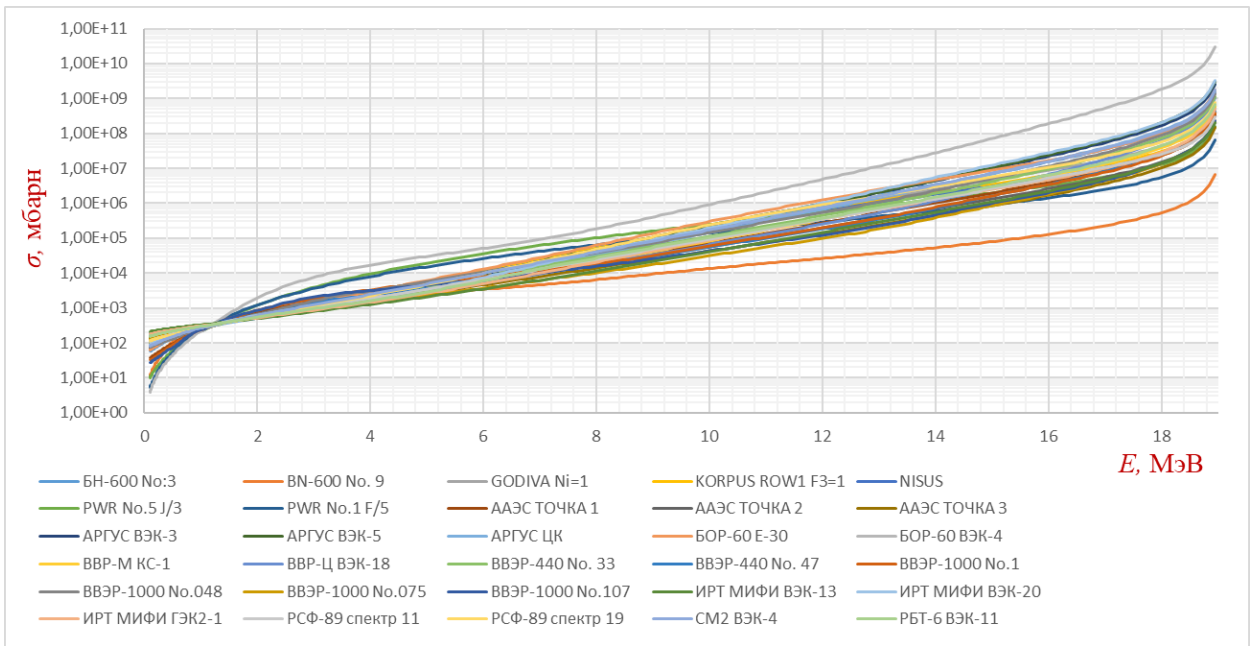


Рисунок 2.14 Эффективные сечения в зависимости от эффективной энергии нейтронов для реакции $^{111}\text{Cd}(n, n')$

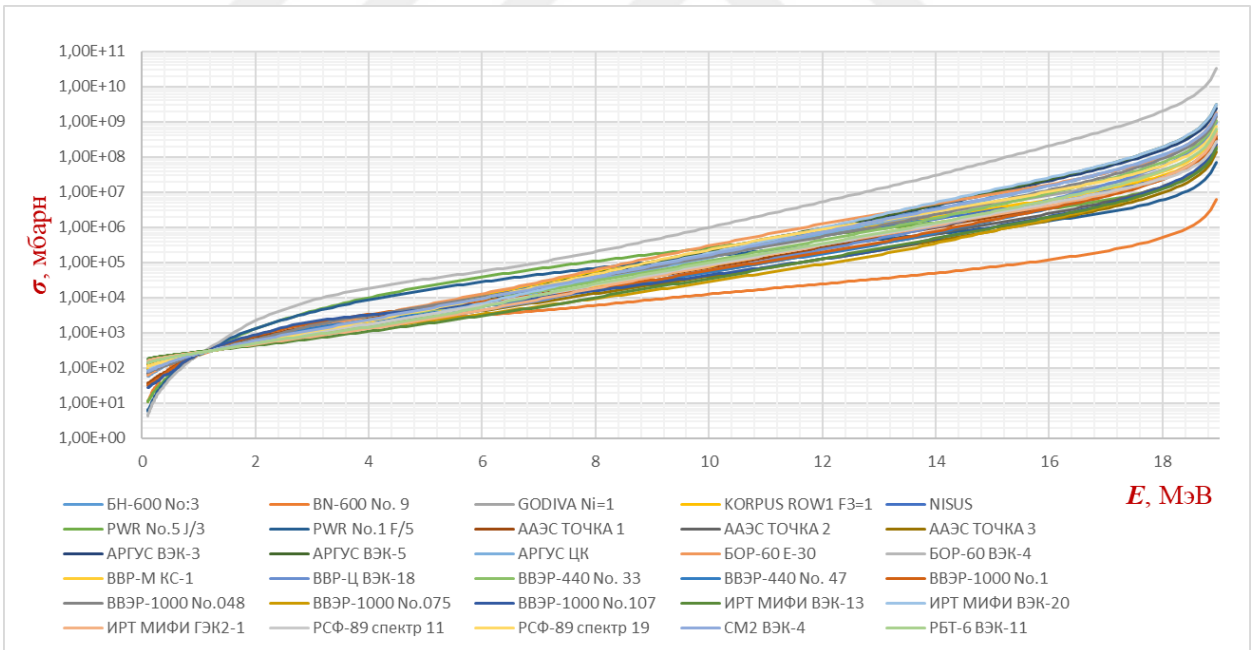


Рисунок 2.15 Эффективные сечения в зависимости от эффективной энергии нейтронов для реакции $^{115}\text{In}(n, n')$

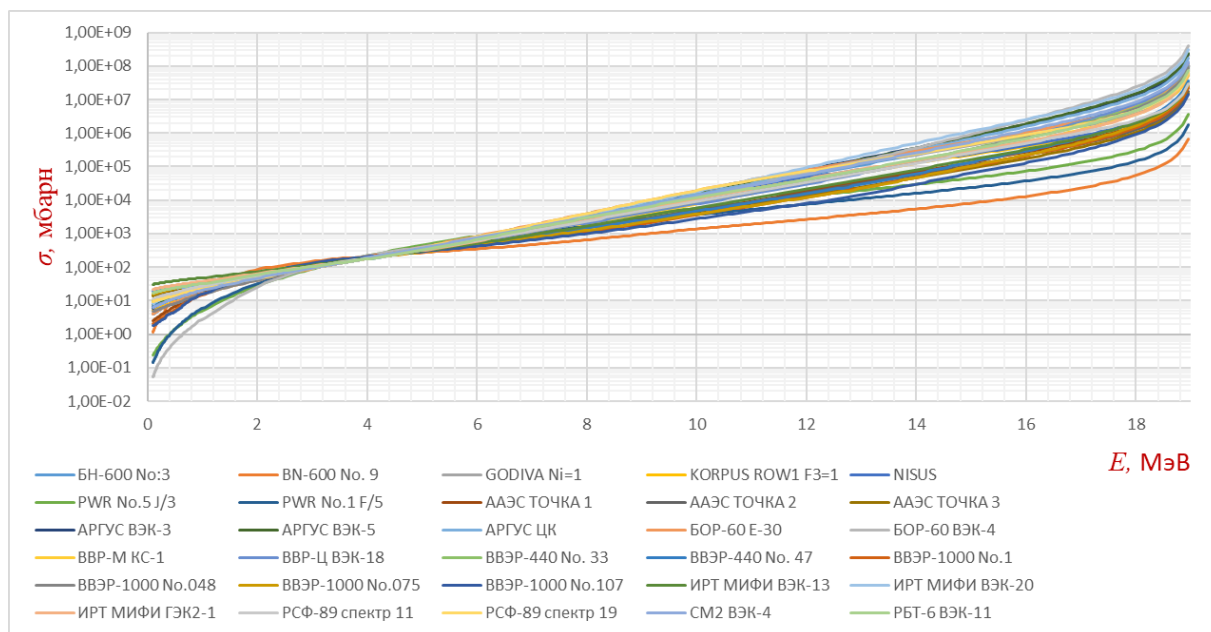


Рисунок 2.16 Эффективные сечения в зависимости от эффективной энергии нейтронов для реакции $^{204}\text{Pb}(n, n')$

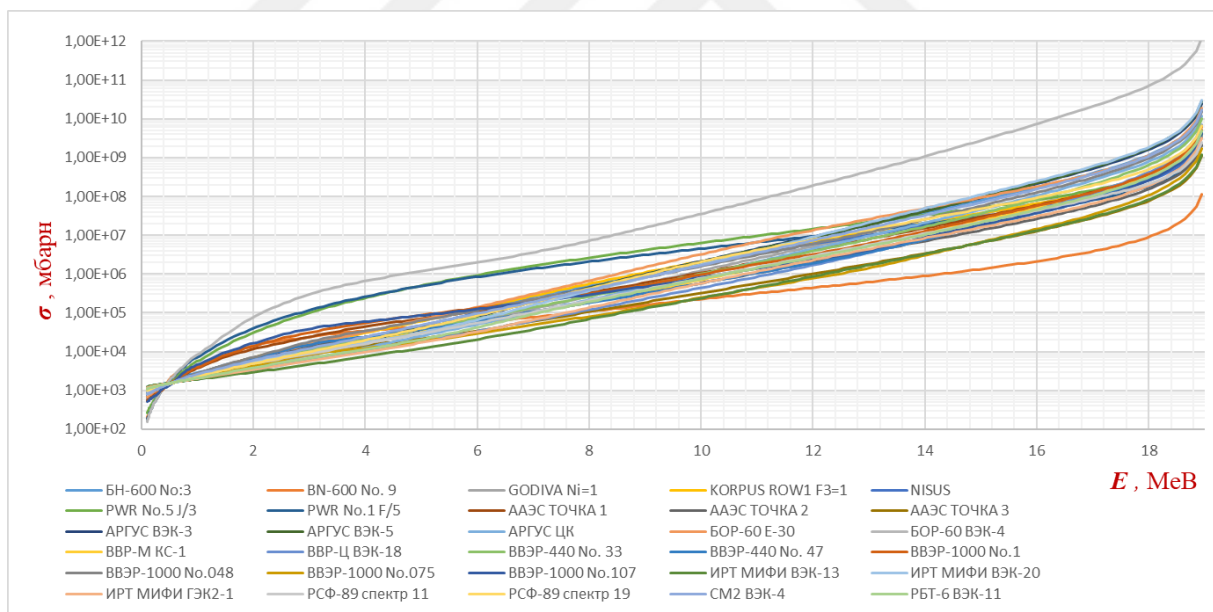


Рисунок 2.17 Эффективные сечения в зависимости от эффективной энергии нейтронов для реакции $^{237}\text{Np}(n, f)$

Полученные результаты представляют собой библиотеку данных по эффективным сечениям с соответствующими значениями эффективных энергий. Отметим, что для отдельных реакций результаты оценки мало отличаются от данных других авторов. Это прежде всего такие реакции, как $^{31}\text{P}(n, p)$, $^{32}\text{S}(n, p)$, $^{56}\text{Fe}(n, p)$, $^{115}\text{In}(n, p)$.

Для второй группы реакций получены другие значения, расходящиеся от автора к автору. Это может быть связано в том числе и с конкретным выбором набора исходных спектров. Однако в данном случае не идет речь о несогласованных данных. В работе получены данные с другими значениями эффективных сечений и энергий, но согласованных друг с другом. Проверка качества и надежности результатов может быть проведена только через расчет реального интегрального спектра и сравнение с данными, полученными по другим методикам. Об этом пойдет речь в следующей главе настоящей работы.

Глава 3 Определение интегральных спектров нейтронов для ядерно-физических установок

3.1 РБТ реактор

Реакторы с водяным охлаждением бассейнового типа РБТ предназначены для долгосрочных экспериментов. Высокое содержание ^{235}U в этих топливных сборках обеспечивает плотность потока нейтронов на уровне $(10^{13} - 10^{14}) \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

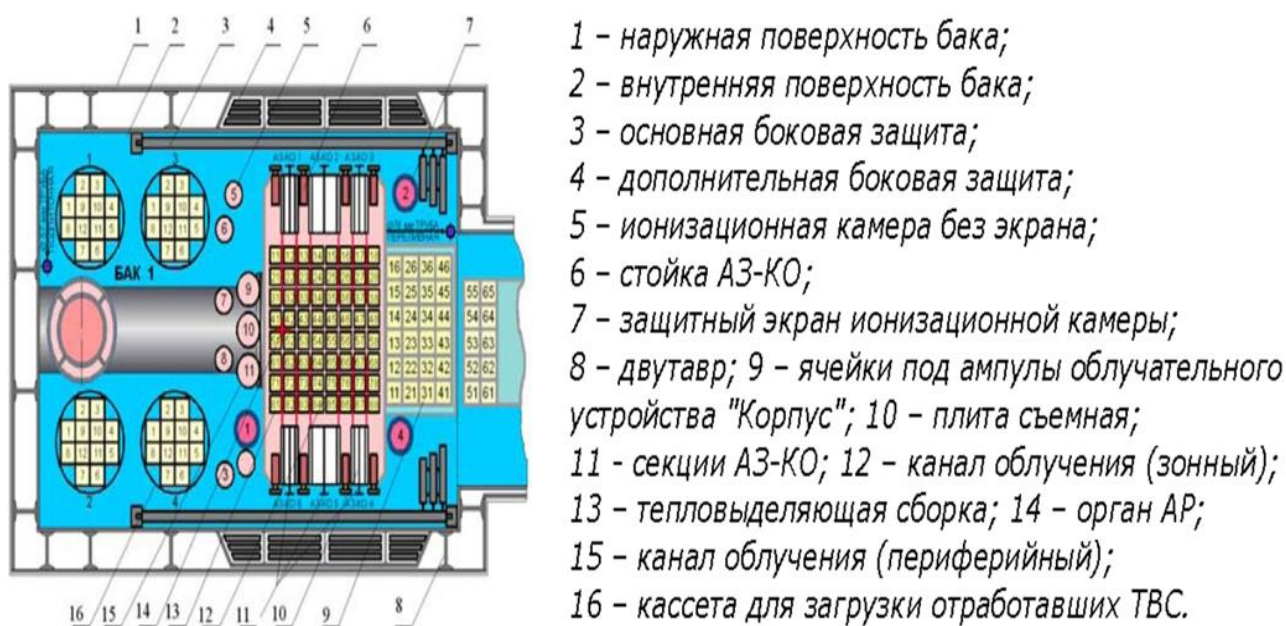


Рисунок 3.1 Расположение оборудования в баке реактора РБТ-6

3.2 Опорное поле (ОП-4) в реакторе РБТ-6

Аттестованное нейтронное поле ОП-4 создано в НИИАР на реакторе РБТ-6 в вертикальном канале ВЭК-11 в водяном отражателе за слоем воды толщиной 80 мм от активной зоны [13].

Активная зона состоит из 56 тепловыделяющих сборок, 6 компенсирующих органов (КО) и совмещенных с ними органов аварийной защиты (АЗ), одного стержня автоматического регулирования мощности и 8 экспериментальных каналов с вытеснителями.

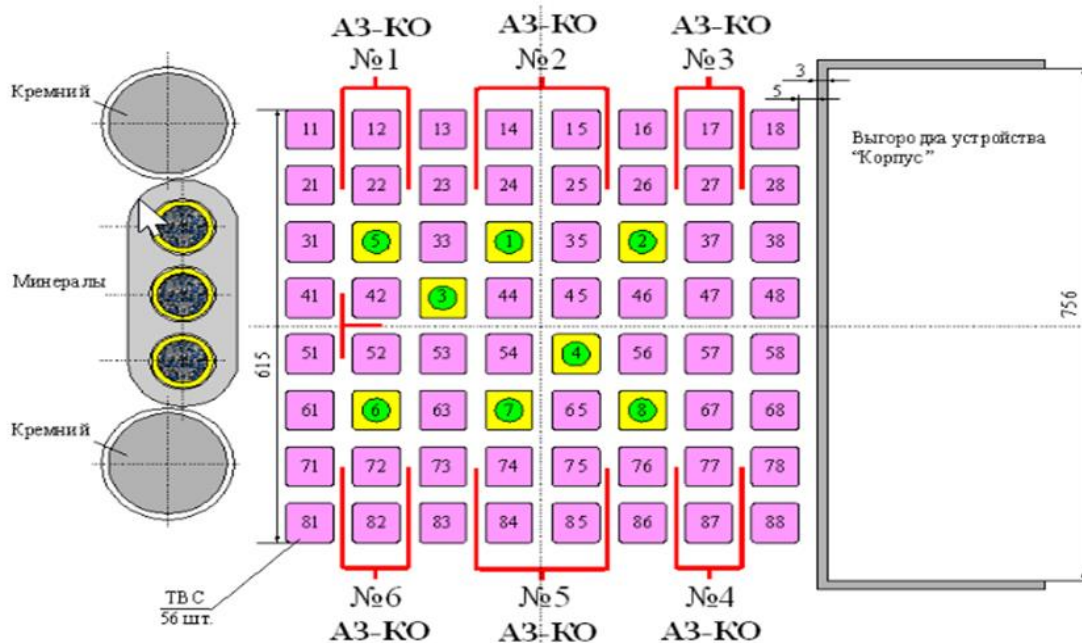


Рисунок 3.2 Опорная конструкция активной зоны реактора РБТ-6

Схема поперечного сечения активной зоны реактора РБТ-6 показана на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 Поперечное сечение активной зоны реактора РБТ-6

Опорное поле представляет собой цилиндрическую полость, ограниченную стенками канала (диаметр 38 мм), и высотой 1000 мм с центром на середине высоты активной зоны реактора. В этой области экспериментально определен спектр нейтронов в диапазоне энергии 0,5 эВ – 19 МэВ.

Активационные интегралы для (n, γ) – реакций получены облучением ДНА в стандартных кадмиевых экранах, приведены к порогу кадмиевой отсечки $E_{Cd} = 0,5$ эВ и исправлены на самоэкранирование.

3.3 Устройство КОРПУС на реакторе РБТ-6

Основная цель создания устройства КОРПУС – моделирование радиационных и температурных условий работы корпусов реакторов типа ВВЭР-440 и ВВЭР-1000.

В устройстве создавали условия облучения, эквивалентные условиям эксплуатации корпусов реакторов. Устройство состоит из четырёх рядов отдельных ампул размером 110x110 мм² каждая, размещённых в бассейне реактора РБТ-6 рядом с активной зоной. Первый ряд ампул отделён от активной зоны реактора стенкой из нержавеющей стали толщиной 3 мм и свинцовым экраном толщиной 10 мм. Свинцовый экран облицован листовой нержавеющей сталью толщиной 2 мм. Для охлаждения экрана с обеих сторон предусмотрен слой воды толщиной около 3 мм. Наличие экрана снижает радиационный нагрев первого ряда ампул от реакторного гамма-излучения и облегчает создание регулируемого и стабильного температурного режима по всему объёму металла в ампулах; особенно это важно для ампул первого ряда. Температурный режим обеспечивается встроенными в ампулы нагревателями. Для охлаждения ампул водой бассейна реактора между ними предусмотрен зазор величиной (2 – 3) мм.

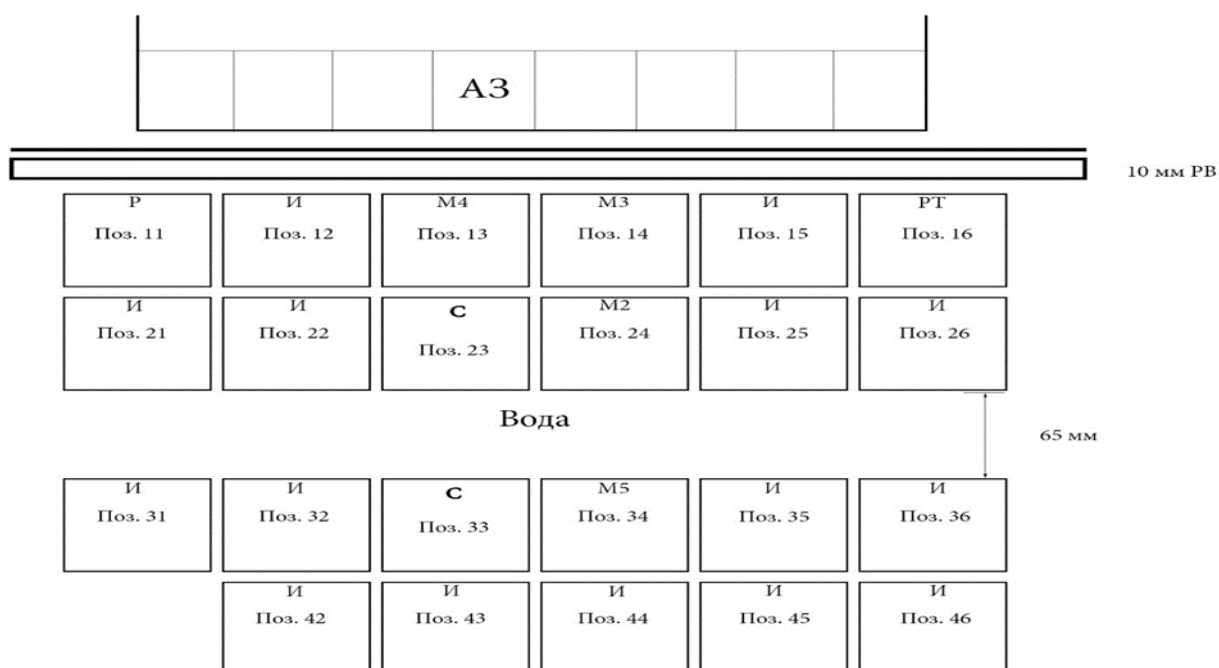


Рисунок 3.4 Компоновка стенда КОРПУС на реакторе РБТ-6 при проведении экспериментов по облучению образцов корпусной стали

И – ампулы-имитаторы; Р, РТ, С – ампулы дозиметрические для измерения нейтронно-физических характеристик нейтронного поля; М2 – М5 – ампулы с исследуемыми образцами.

Полномасштабная спектрометрия была выполнена нейтронно-активационным методом во всех рядах устройства КОРПУС. В результаты измерений вводили поправки на геометрию измерений, на просчёты, на суммирование и самопоглощение.

Полную погрешность значения активационного интеграла определяли как сумму случайных и систематических составляющих на уровне доверительной вероятности 0,95. Восстановление спектров проведено по программе MIXER [14].



Глава 4 Оценка спектров нейтронов ядерных установок по интегральным данным экспериментов

4.1 Полномасштабное восстановление спектра по ИВК MIXER

Для выбранных экспериментальных каналов KORPUS ROW 1 Ni=1 и ОП-4 НИИАР Ni=1 в таблице 4.1 представлены измеренные значения активационных интегралов для этих установок.

Таблица 4.1 Активационные интегралы для каналов KORPUS ROW 1 Ni=1 и ОП-4 НИИАР Ni=1

Реакции	q(1/c)	
	KORPUS ROW 1 Ni=1	ОП-4 НИИАР Ni=1
19F(n,2n)	1,326E-28	1,229E-28
27Al(n, α)	6,019E-27	8,205E-27
27Al(n,p)	3,335E-26	4,317E-26
31P (n,p)	3,220E-25	3,048E-25
32S (n,p)	5,992E-25	5,940E-25
48Ti(n,p)	2,490E-27	3,428E-27
54Fe(n,p)	7,257E-25	7,476E-25
56Fe(n,p)	9,047E-27	1,270E-26
58Ni(n,p)	1,000E-24	1,000E-24
63Cu(n,a)	4,348E-27	5,980E-27
90Zr(n,2n)	1,737E-27	1,549E-27
93Nb(n,2n)	4,539E-27	5,884E-27
103Rh(n,n')	1,371E-23	7,252E-24
111Cd(n,n')	2,761E-24	1,948E-24
115In(n,n')	2,639E-24	1,738E-24
204Pb(n,n')	1,751E-25	2,050E-25
237Np(n,f)	2,943E-23	1,375E-23

В таблицах 4.2 и 4.3 приведена информация об оцененных интегральных спектрах установок, полученных с использованием данных настоящей работы и по расчетам по программам из ИВК «MIXER». Дополнительно приведено отношение результатов с целью оценки отклонений.

Таблица 4.2 Интегральные спектры для установки KORPUS ROW 1 Ni=1

KORPUS ROW 1 Ni=1			
E , МэВ	Φ расчет *	Φ програм*	$\Phi(\text{расч})/\Phi(\text{програм})$
0,4625	2,058E+01	2,033E+01	1,013E+00
0,4875	1,845E+01	1,962E+01	9,407E-01
1,15	8,946E+00	8,965E+00	9,979E-01
1,15	9,021E+00	8,965E+00	1,006E+00
2,25	3,083E+00	3,289E+00	9,374E-01
2,25	3,188E+00	3,289E+00	9,693E-01
2,45	2,711E+00	2,794E+00	9,703E-01
2,55	2,468E+00	2,579E+00	9,573E-01
3,85	9,886E-01	9,729E-01	1,016E+00
4,95	4,805E-01	4,453E-01	1,079E+00
6,25	1,886E-01	1,805E-01	1,045E+00
6,45	1,604E-01	1,574E-01	1,019E+00
7,25	8,951E-02	9,147E-02	9,786E-01
7,55	7,115E-02	7,464E-02	9,533E-01
10,35	1,076E-02	1,049E-02	1,026E+00
13,15	2,142E-03	2,298E-03	9,324E-01
13,35	1,924E-03	1,998E-03	9,631E-01

Таблица 4.3 Интегральные спектры для установки ОП-4 НИИАР Ni=1

ОП-4 НИИАР Ni=1			
E	Φ расчет*	Φ програм*	$\Phi(\text{расч})/\Phi(\text{програм})$
0,4625	9,615E+00	9,211E+00	1,044E+00
0,4875	9,760E+00	9,033E+00	1,081E+00
1,15	5,892E+00	5,772E+00	1,021E+00
1,15	6,365E+00	5,772E+00	1,103E+00
2,25	3,083E+00	3,001E+00	1,028E+00
2,25	3,018E+00	3,001E+00	1,006E+00
2,45	2,687E+00	2,671E+00	1,006E+00
2,55	2,543E+00	2,520E+00	1,009E+00
3,85	1,157E+00	1,173E+00	9,868E-01
4,95	6,220E-01	5,923E-01	1,050E+00
6,25	2,594E-01	2,518E-01	1,030E+00
6,45	2,251E-01	2,202E-01	1,022E+00
7,25	1,232E-01	1,286E-01	9,582E-01
7,55	9,699E-02	1,050E-01	9,241E-01
10,35	1,395E-02	1,394E-02	1,001E+00
13,15	1,985E-03	2,014E-03	9,858E-01
13,35	1,716E-03	1,757E-03	9,764E-01

*Спектры нормированы по реакции $^{58}\text{Ni}(n, p)$.

По полученным эффективным значениям сечений и энергий проведено восстановление с использованием метода «эффективных» пороговых сечений. Данные представлены на рисунках 4.1 и 4.2.

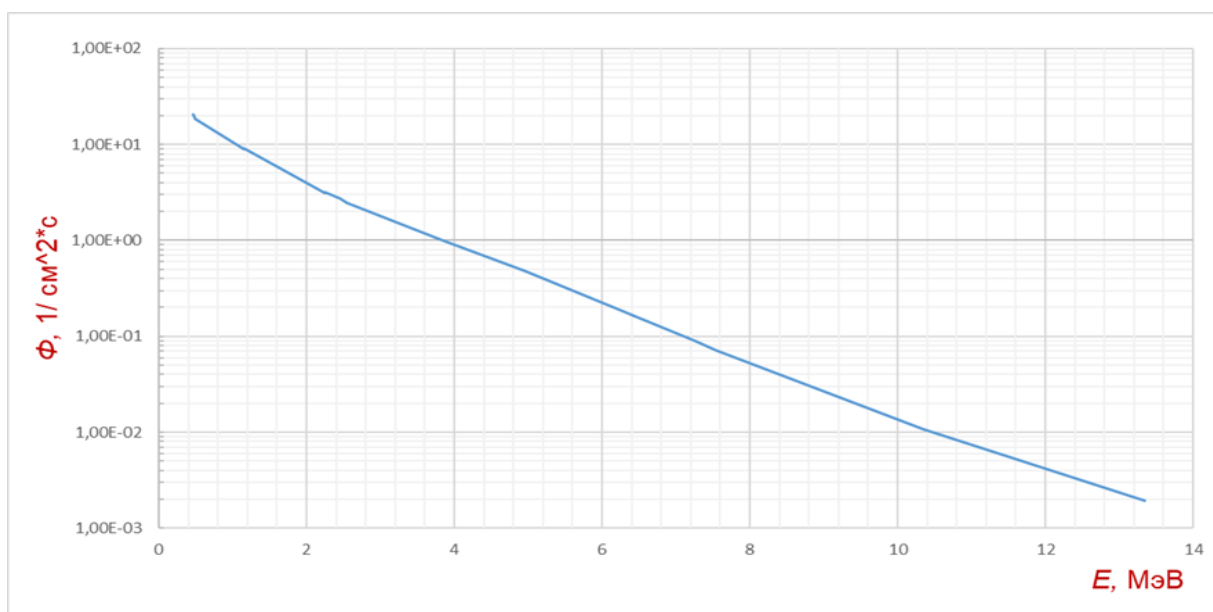


Рисунок 4.1 Зависимость интегрального спектра KОРPUS ROW 1 Ni=1 от энергии нейтронов

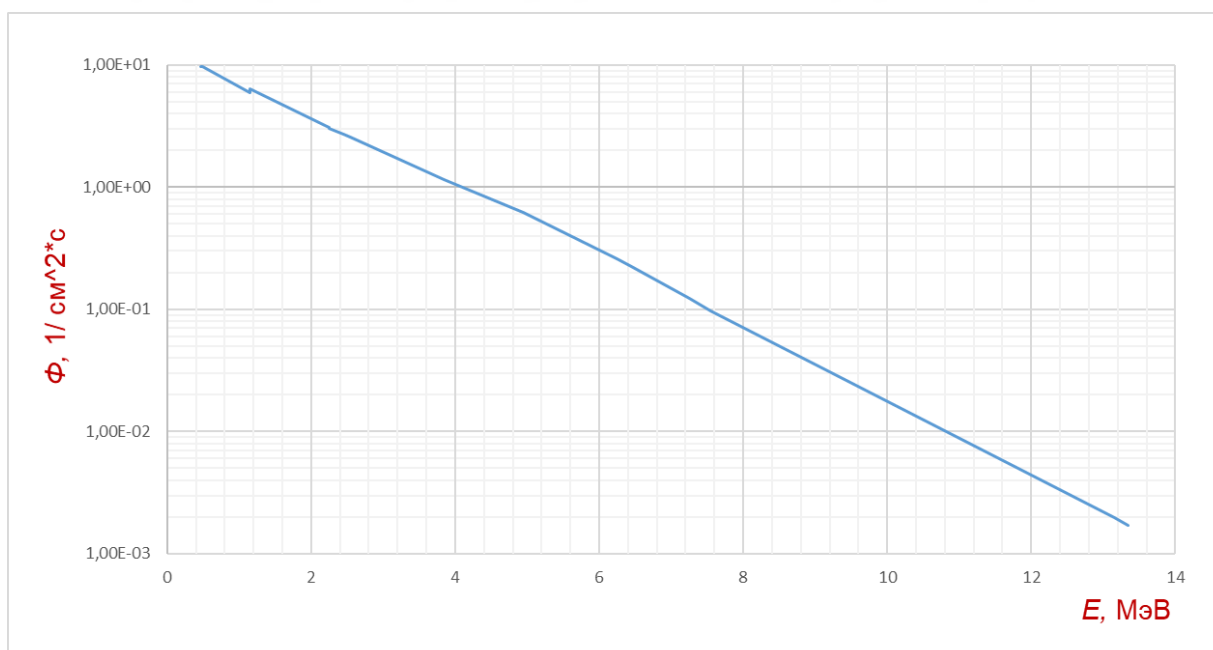


Рисунок 4.2 Зависимость интегрального спектра ОП-4 НИИАР Ni=1 от энергии нейтронов

На рисунках 4.3 и 4.4 одновременно представлены спектры, полученные по методу пороговых сечений и ИВК MIXER.

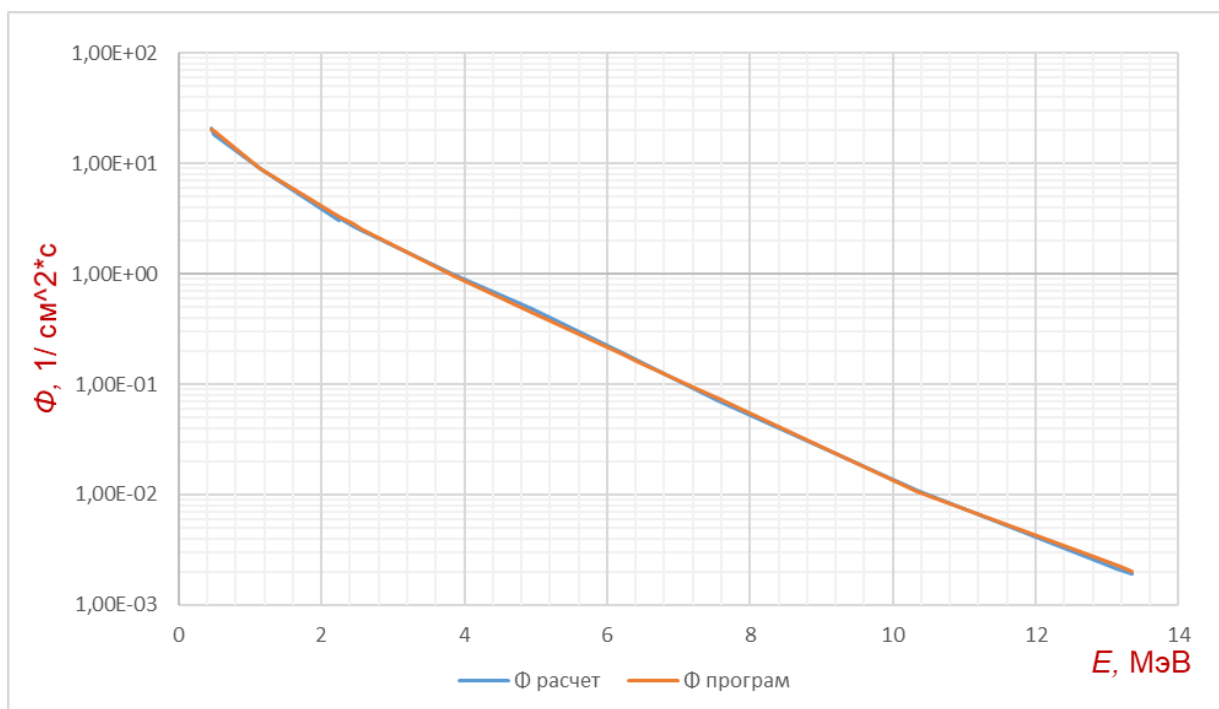


Рисунок 4.3 Интегральные спектры нейтронов для канала KORPUS ROW 1 Ni=1 по данным настоящей работы и программе MIXER

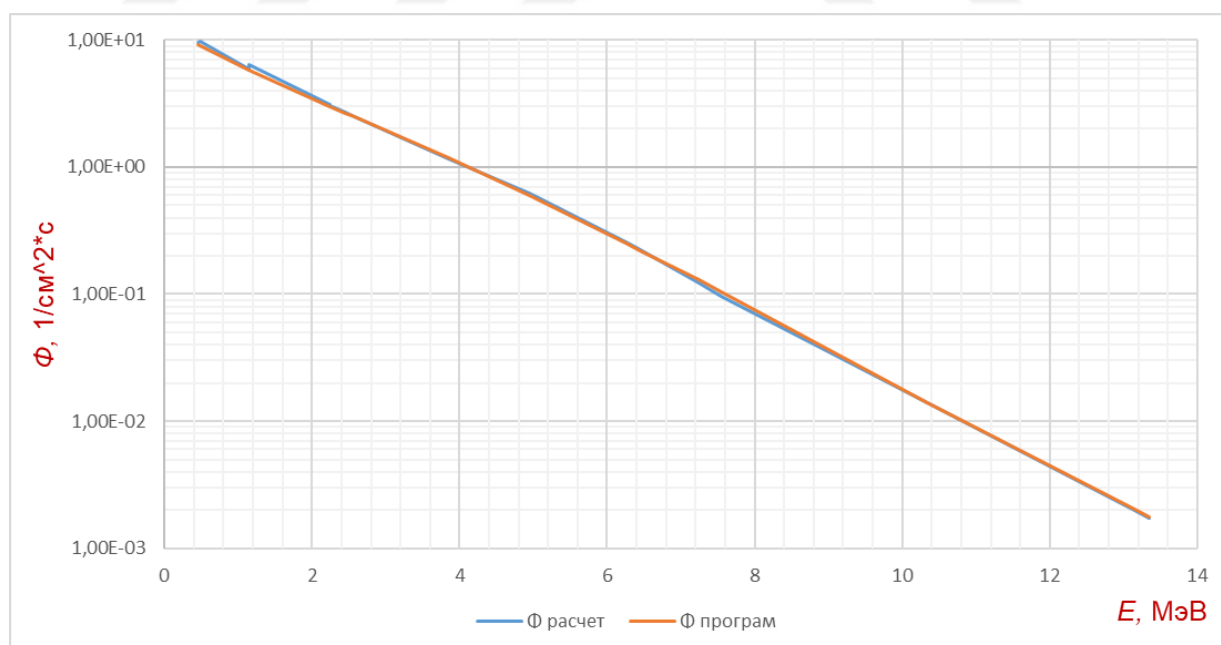


Рисунок 4.4 Интегральные спектры нейтронов для канала ОП-4 НИИАР Ni=1 по данным настоящей работы и программе MIXER

Также на рисунке 4.5 представлена зависимость отклонения спектров друг от друга. Как видно из рисунков, отмечается достаточно хорошее согласие. Отклонение не превышает (4 – 5)% и только для отдельных диапазонов несколько выше (до 8%).

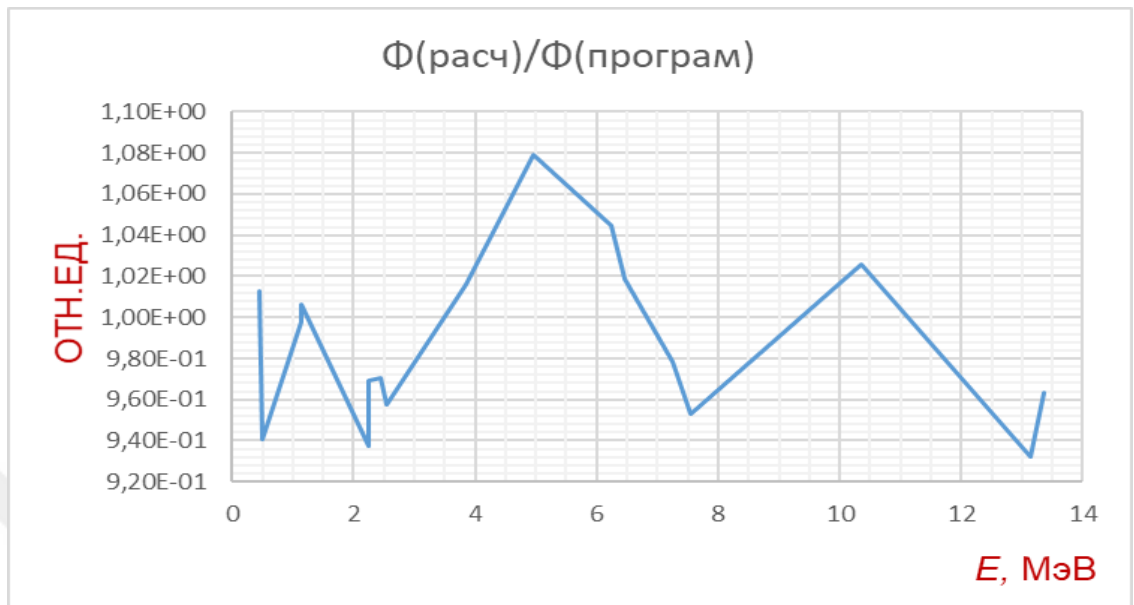


Рисунок 4.5 Отношение спектров для канала KORPUS ROW 1 Ni=1 по рассчитанным данным и программе MIXER

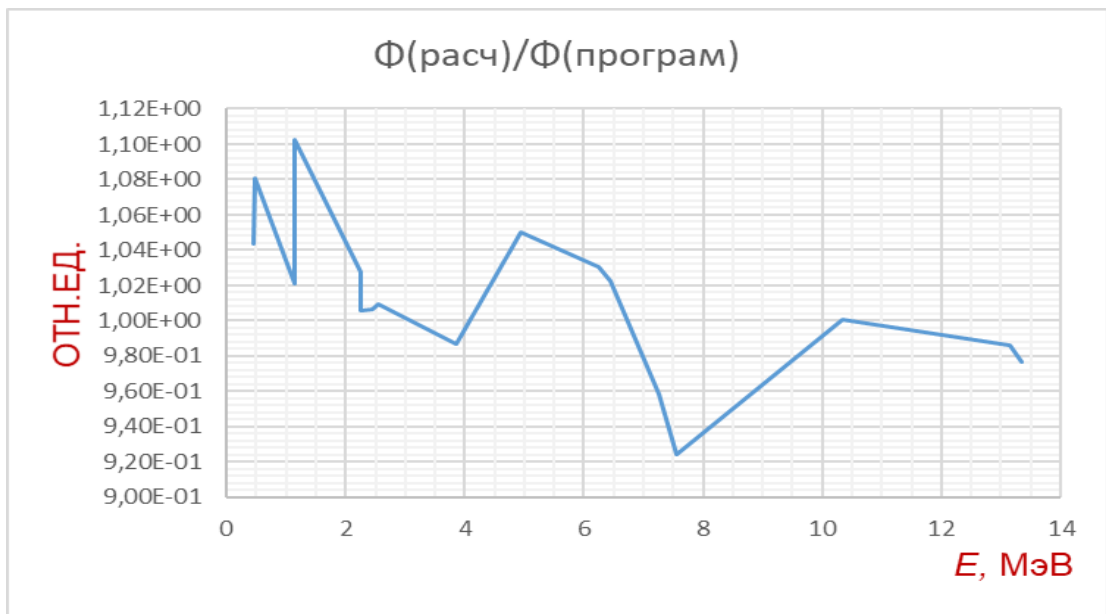


Рисунок 4.6 Отношение спектров для канала ОП-4 НИИАР Ni=1 по рассчитанным данным и программе MIXER

4.2 Обсуждение результатов. Рекомендации по использованию констант

На основании проведённых измерений получены значения активационных интегралов, которые представлены в таблице 4.1. По данным активационным интегралам и с использованием полученных данных по эффективным сечениям проведено восстановление спектров двух энергетических установок KORPUS ROW 1 Ni=1 и ОП-4 НИИАР Ni=1, а для сравнения проведено дополнительное восстановление этих спектров по ИВК МИХЕР. Результаты представлены в таблицах 4.2 и 4.3. По этим результатам построены графики отношения спектров, полученных с использованием информации данной работы, и результатов, полученных по программе МИХЕР. Для сравнения данных получено отношение результатов. Полученные результаты доказывают, что получена самосогласованная система эффективных сечений ядерных реакций, позволяющая достаточно надежно проводить восстановление интегральных спектров с использованием «экспрессного» метода и метода эффективных пороговых сечений.

В отдельных областях энергий отличие результатов друг от друга несколько выше. Здесь требуется дополнительный анализ. Во-первых, это можно объяснить в том числе и недостатком экспериментальных информации в этом диапазоне энергий. Введение дополнительных реакций с функцией чувствительности из малоинформативного диапазона могло бы существенно исправить ситуацию. Во-вторых, имеет смысл рассмотреть и другой подход к оценке эффективных сечений через специализированный выбор библиотечных спектров. Это могут быть спектры со схожими условиями формирования, замедления, а также расположения каналов относительно активной зоны. В этом случае могут быть получены альтернативные данные, использование которых будет зависеть от конкретного типа и характеристик исследуемой области установки.

Полученные в работе результаты восстановления спектров показывают, что спектры достаточно гладкие без каких-либо необоснованных выбросов и искажения формы. На визуальном плане нет противоречий при восстановлении спектров с результатами, полученными по программе MIXER, то есть полномасштабное восстановление с учетом энергетического хода сечений для тех же скоростей счета хорошо согласуется с оцененными данными работы. Близкие результаты подтверждают надежность полученных данных.

В дальнейшем номенклатура реакций может быть расширена. Отдельные реакции могут быть дополнены данными других авторов. При этом особое внимание при практических исследованиях спектров должно уделяться выбору реакций, функции

чувствительности которых должны максимально полно перекрывать исследуемый энергетический диапазон.



Заключение

Основные результаты проделанной работы:

- Разработан алгоритм и написана программа в среде Excel для расчета эффективных сечений и энергий пороговых ядерных реакций.
- Проведена выборка и приведение к соответствующим форматам 30 расчетных спектров из библиотеки ИВК «MIXER».
- Выбраны сечения 17 пороговых реакций из библиотеки ИВК «MIXER».
- Проведены расчеты по разработанной программе эффективных сечений и эффективных энергий для 17 выбранных реакций.
- Построены графические зависимости $\sigma_{эф}$ от $E_{эф}$ и выявлены точки сгущения результатов.
- Проведено сравнение полученных результатов с данными других авторов.
- Проведено восстановление спектров для двух энергетических установок с использованием полученных в работе величин.
- Проведены полномасштабные расчеты спектров двух установок по программам ИВК «MIXER».
- Проведена оценка отклонения результатов, полученных по двум методам. Подтверждено их хорошее взаимное согласие.
- Даны рекомендации по использованию полученной системы констант для восстановления спектров реальных ядерно-физических установок.

Список литературы

1. Брискман Б.А., Генералова В.В., Крамер-Агеев Е.А., Трошин В.С. Внутрореакторная дозиметрия. М.: Энергоатомиздат, 1985, с. 127-174.
2. Гарновский Г.Б., Ярына В.П. Учет влияния кадмиевых экранов в нейтронно-активационных измерениях.- В кн.: Тезисы докладов 3 Всесоюзного совещания по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. М.: ЦНИИАтоминформ, 1982, с.77.
3. Крамер-Агаев Е. А., Трошин В. С., Тихонов Е. Г. Активационные методы спектрометрии нейтронов. М.: Атомиздат, 1976.
4. Бондарс Х. Я., Лапенас А. А. Рекомендованные сечения активационных детекторов. – В кн.: Тезисы докладов III Всесоюзного совещания по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. М.: ЦНИИАтоминформ, 1982, с. 149.
5. Крамер-Агаев Е. А., Трошин В. С. Восстановление спектра быстрых нейтронов по результатам измерений активационными детекторами. В кн.: Метрология нейтронных измерений на ядерно-физических установках. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1976, т. 1.
6. Zijp W. L., Nolthenius H. J. Intercomparison of unfolding procedures (programs and libraries). R. M. G. Note 76\09 Stitching reactors centrum, Nederland.
7. Применение методов SAND-II и ММП для восстановления спектров нейтронов / Х. Я. Бондарс, В. А. Камнев, А. А. Лапенас и др. Изв. АН Латвийской ССР. Сер. Физ. и техн. наук, 1980, вып.4, с.3-7.
8. Ломакин С. С., Петров В. И., Самойлов П. С. Радиометрия нейтронов активационным методом. М., Атомиздат, 1975, с. 159-160.
9. Лапенас А. А. Измерение спектров нейтронов активационным методом. Рига: ЗИНАТНЕ, 1975, с. 85.
10. Крамер-Агаев Е. А., Трошин В. С., Тихонов Е. Г. Активационные методы спектрометрии нейтронов. М.: Атомиздат, 1976.
11. Закомский Л. Л., Крайтор С. Н., Кушнерева К. К. Особенности пропускания нейтронов сферическими борными фильтрами. – В кн.: Метрология нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. М.: ЦНИИАтоминформ, 1974, т. 1, с. 43.
12. Fabry A., McElroy W. e. a. Review of microscopic integral cross-section data in fundamental reactor dosimetry benchmark neutron fields. – In: Neutron cross-sections for reactor dosimetry. Vienna: IAEA, v. 1, p. 233 – 263.

13. Рязанов Д.К., Личадеев В.В., Павлов В.В., Шиманский Г.А., Чернышёва Т.И..Метрологические характеристики опорного нейтронного поля на реакторе РБТ-6 // Сборник трудов. Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 2006. Вып. 3. С. 51-61.
14. Брегадзе Ю.И., Степанов Э.К., Ярына В.П. Прикладная метрология ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1990.



Приложение

В таблицах 1–17 приведены результаты расчетов эффективных сечений и энергий.

Расчеты эффективного сечения для реакций $^{19}\text{F}(n,2n)$, $^{27}\text{Al}(n,\alpha)$, $^{27}\text{Al}(n,p)$.

Таблица 1

Таблица 2

Таблица 3

E*MeV	$\langle\sigma\rangle$	DELTA(σ)	E*MeV	$\langle\sigma\rangle$	DELTA(σ)	E*MeV	$\langle\sigma\rangle$	DELTA(σ)
11,15	1,75E+01	4,81E+00	5,55	2,47E+01	7,27E+00	3,25	2,63E+01	5,79E+00
11,25	1,86E+01	4,83E+00	5,65	2,61E+01	7,28E+00	3,35	2,79E+01	5,84E+00
11,35	1,98E+01	4,84E+00	5,75	2,77E+01	7,28E+00	3,45	2,96E+01	5,83E+00
11,45	2,10E+01	4,84E+00	5,85	2,93E+01	7,26E+00	3,55	3,14E+01	5,79E+00
11,55	2,24E+01	4,82E+00	5,95	3,11E+01	7,21E+00	3,65	3,32E+01	5,70E+00
11,65	2,38E+01	4,78E+00	6,05	3,30E+01	7,13E+00	3,75	3,52E+01	5,58E+00
11,75	2,53E+01	4,73E+00	6,15	3,50E+01	7,02E+00	3,85	3,72E+01	5,44E+00
11,85	2,69E+01	4,65E+00	6,25	3,72E+01	6,89E+00	3,95	3,93E+01	5,28E+00
11,95	2,86E+01	4,56E+00	6,35	3,96E+01	6,72E+00	4,05	4,16E+01	5,10E+00
12,05	3,05E+01	4,44E+00	6,45	4,21E+01	6,52E+00	4,15	4,40E+01	4,91E+00
12,15	3,25E+01	4,29E+00	6,55	4,48E+01	6,27E+00	4,25	4,65E+01	4,71E+00
12,25	3,46E+01	4,12E+00	6,65	4,77E+01	5,98E+00	4,35	4,92E+01	4,49E+00
12,35	3,68E+01	3,91E+00	6,75	5,08E+01	5,63E+00	4,45	5,21E+01	4,25E+00
12,45	3,92E+01	3,68E+00	6,85	5,41E+01	5,24E+00	4,55	5,51E+01	4,01E+00
12,55	4,18E+01	3,40E+00	6,95	5,77E+01	4,77E+00	4,65	5,84E+01	3,76E+00
12,65	4,46E+01	3,09E+00	7,05	6,14E+01	4,25E+00	4,75	6,18E+01	3,54E+00
12,75	4,76E+01	2,74E+00	7,15	6,55E+01	3,66E+00	4,85	6,55E+01	3,37E+00
12,85	5,08E+01	2,35E+00	7,25	6,98E+01	3,04E+00	4,95	6,94E+01	3,31E+00
12,95	5,42E+01	1,96E+00	7,35	7,44E+01	2,42E+00	5,05	7,36E+01	3,42E+00
13,05	5,79E+01	1,59E+00	7,45	7,93E+01	1,95E+00	5,15	7,81E+01	3,76E+00
13,15	6,19E+01	1,40E+00	7,55	8,46E+01	1,94E+00	5,25	8,28E+01	4,35E+00
13,25	6,62E+01	1,57E+00	7,65	9,02E+01	2,56E+00	5,35	8,79E+01	5,19E+00
13,35	7,07E+01	2,14E+00	7,75	9,62E+01	3,62E+00	5,45	9,34E+01	6,26E+00
13,45	7,57E+01	2,98E+00	7,85	1,03E+02	4,97E+00	5,55	9,93E+01	7,56E+00
13,55	8,10E+01	4,03E+00	7,95	1,10E+02	6,55E+00	5,65	1,06E+02	9,09E+00
13,65	8,67E+01	5,27E+00	8,05	1,17E+02	8,35E+00	5,75	1,12E+02	1,08E+01
13,75	9,28E+01	6,70E+00	8,15	1,25E+02	1,04E+01	5,85	1,20E+02	1,28E+01
13,85	9,94E+01	8,32E+00	8,25	1,33E+02	1,26E+01	5,95	1,27E+02	1,51E+01
13,95	1,07E+02	1,02E+01	8,35	1,42E+02	1,51E+01	6,05	1,36E+02	1,76E+01
14,05	1,14E+02	1,22E+01	8,45	1,52E+02	1,78E+01	6,15	1,45E+02	2,04E+01
14,15	1,23E+02	1,45E+01	8,55	1,62E+02	2,08E+01	6,25	1,55E+02	2,36E+01
14,25	1,31E+02	1,71E+01	8,65	1,74E+02	2,42E+01	6,35	1,65E+02	2,71E+01
14,35	1,41E+02	2,01E+01	8,75	1,85E+02	2,78E+01	6,45	1,76E+02	3,10E+01
14,45	1,51E+02	2,33E+01	8,85	1,98E+02	3,18E+01	6,55	1,88E+02	3,53E+01
14,55	1,63E+02	2,69E+01	8,95	2,12E+02	3,63E+01	6,65	2,01E+02	4,00E+01
14,65	1,75E+02	3,10E+01	9,05	2,27E+02	4,11E+01	6,75	2,15E+02	4,53E+01
14,75	1,88E+02	3,54E+01	9,15	2,42E+02	4,64E+01	6,85	2,30E+02	5,10E+01
14,85	2,02E+02	4,04E+01	9,25	2,59E+02	5,21E+01	6,95	2,46E+02	5,74E+01
14,95	2,17E+02	4,60E+01	9,35	2,78E+02	5,85E+01	7,05	2,63E+02	6,44E+01
15,05	2,33E+02	5,21E+01	9,45	2,97E+02	6,53E+01	7,15	2,82E+02	7,21E+01
15,15	2,51E+02	5,89E+01	9,55	3,18E+02	7,29E+01	7,25	3,02E+02	8,06E+01

Расчеты эффективного сечения для реакций $^{31}\text{P}(n,p)$, $^{32}\text{S}(n,p)$, $^{48}\text{Ti}(n,p)$.

Таблица 4

E*MeV	$\langle\sigma\rangle$	DELTA(σ)
1,75	6,80E+01	8,55E+00
1,85	7,39E+01	7,44E+00
1,95	8,01E+01	6,25E+00
2,05	8,66E+01	5,05E+00
2,15	9,36E+01	3,93E+00
2,25	1,01E+02	3,36E+00
2,35	1,09E+02	4,09E+00
2,45	1,18E+02	6,09E+00
2,55	1,27E+02	8,82E+00
2,65	1,37E+02	1,20E+01
2,75	1,47E+02	1,56E+01
2,85	1,58E+02	1,95E+01
2,95	1,70E+02	2,38E+01
3,05	1,82E+02	2,83E+01
3,15	1,94E+02	3,31E+01
3,25	2,08E+02	3,81E+01
3,35	2,21E+02	4,33E+01
3,45	2,36E+02	4,88E+01
3,55	2,51E+02	5,46E+01
3,65	2,66E+02	6,07E+01
3,75	2,83E+02	6,73E+01
3,85	3,00E+02	7,45E+01
3,95	3,18E+02	8,22E+01
4,05	3,37E+02	9,04E+01
4,15	3,58E+02	9,91E+01
4,25	3,80E+02	1,08E+02
4,35	4,03E+02	1,18E+02
4,45	4,27E+02	1,28E+02
4,55	4,54E+02	1,39E+02
4,65	4,82E+02	1,50E+02
4,75	5,11E+02	1,62E+02
4,85	5,43E+02	1,75E+02
4,95	5,77E+02	1,88E+02
5,05	6,13E+02	2,03E+02
5,15	6,51E+02	2,18E+02
5,25	6,92E+02	2,35E+02
5,35	7,36E+02	2,52E+02
5,45	7,83E+02	2,71E+02
5,55	8,33E+02	2,91E+02
5,65	8,87E+02	3,13E+02
5,75	9,45E+02	3,37E+02

Таблица 5

E*MeV	$\langle\sigma\rangle$	DELTA(σ)
1,35	9,17E+01	2,43E+01
1,45	1,00E+02	2,38E+01
1,55	1,09E+02	2,31E+01
1,65	1,19E+02	2,21E+01
1,75	1,29E+02	2,09E+01
1,85	1,40E+02	1,95E+01
1,95	1,51E+02	1,80E+01
2,05	1,64E+02	1,62E+01
2,15	1,76E+02	1,41E+01
2,25	1,90E+02	1,18E+01
2,35	2,05E+02	9,53E+00
2,45	2,21E+02	8,24E+00
2,55	2,38E+02	8,98E+00
2,65	2,56E+02	1,17E+01
2,75	2,76E+02	1,60E+01
2,85	2,96E+02	2,12E+01
2,95	3,18E+02	2,71E+01
3,05	3,40E+02	3,36E+01
3,15	3,63E+02	4,05E+01
3,25	3,88E+02	4,78E+01
3,35	4,13E+02	5,55E+01
3,45	4,40E+02	6,37E+01
3,55	4,67E+02	7,24E+01
3,65	4,96E+02	8,19E+01
3,75	5,27E+02	9,22E+01
3,85	5,59E+02	1,03E+02
3,95	5,93E+02	1,16E+02
4,05	6,28E+02	1,29E+02
4,15	6,66E+02	1,43E+02
4,25	7,07E+02	1,58E+02
4,35	7,50E+02	1,73E+02
4,45	7,95E+02	1,90E+02
4,55	8,44E+02	2,08E+02
4,65	8,96E+02	2,26E+02
4,75	9,51E+02	2,47E+02
4,85	1,01E+03	2,68E+02
4,95	1,07E+03	2,91E+02
5,05	1,14E+03	3,15E+02
5,15	1,21E+03	3,42E+02
5,25	1,29E+03	3,70E+02
5,35	1,37E+03	4,01E+02

Таблица 6

E*MeV	$\langle\sigma\rangle$	DELTA(σ)
5,75	1,10E+01	2,70E+00
5,85	1,16E+01	2,68E+00
5,95	1,23E+01	2,65E+00
6,05	1,31E+01	2,61E+00
6,15	1,39E+01	2,56E+00
6,25	1,48E+01	2,50E+00
6,35	1,57E+01	2,42E+00
6,45	1,67E+01	2,34E+00
6,55	1,78E+01	2,24E+00
6,65	1,90E+01	2,12E+00
6,75	2,02E+01	2,00E+00
6,85	2,15E+01	1,87E+00
6,95	2,30E+01	1,73E+00
7,05	2,45E+01	1,60E+00
7,15	2,61E+01	1,50E+00
7,25	2,78E+01	1,46E+00
7,35	2,97E+01	1,51E+00
7,45	3,16E+01	1,68E+00
7,55	3,37E+01	1,98E+00
7,65	3,60E+01	2,39E+00
7,75	3,84E+01	2,89E+00
7,85	4,10E+01	3,49E+00
7,95	4,38E+01	4,18E+00
8,05	4,67E+01	4,96E+00
8,15	4,99E+01	5,83E+00
8,25	5,33E+01	6,80E+00
8,35	5,69E+01	7,88E+00
8,45	6,08E+01	9,07E+00
8,55	6,50E+01	1,04E+01
8,65	6,95E+01	1,18E+01
8,75	7,42E+01	1,34E+01
8,85	7,94E+01	1,51E+01
8,95	8,49E+01	1,70E+01
9,05	9,08E+01	1,91E+01
9,15	9,71E+01	2,14E+01
9,25	1,04E+02	2,39E+01
9,35	1,11E+02	2,66E+01
9,45	1,19E+02	2,95E+01
9,55	1,27E+02	3,28E+01
9,65	1,36E+02	3,63E+01
9,75	1,46E+02	4,01E+01

Расчеты эффективного сечения для реакций $^{54}\text{Fe}(n,p)$, $^{56}\text{Fe}(n,p)$, $^{58}\text{Ni}(n,p)$.

Таблица 7

E*MeV	< σ >	DELTA(σ)
1,15	9,48E+01	3,19E+01
1,25	1,04E+02	3,17E+01
1,35	1,13E+02	3,14E+01
1,45	1,24E+02	3,09E+01
1,55	1,35E+02	3,03E+01
1,65	1,47E+02	2,94E+01
1,75	1,59E+02	2,83E+01
1,85	1,73E+02	2,71E+01
1,95	1,87E+02	2,57E+01
2,05	2,02E+02	2,41E+01
2,15	2,18E+02	2,22E+01
2,25	2,35E+02	2,00E+01
2,35	2,53E+02	1,79E+01
2,45	2,73E+02	1,66E+01
2,55	2,94E+02	1,65E+01
2,65	3,17E+02	1,81E+01
2,75	3,40E+02	2,14E+01
2,85	3,65E+02	2,62E+01
2,95	3,92E+02	3,21E+01
3,05	4,19E+02	3,89E+01
3,15	4,48E+02	4,62E+01
3,25	4,78E+02	5,41E+01
3,35	5,09E+02	6,24E+01
3,45	5,42E+02	7,13E+01
3,55	5,76E+02	8,09E+01
3,65	6,11E+02	9,13E+01
3,75	6,48E+02	1,03E+02
3,85	6,88E+02	1,15E+02
3,95	7,29E+02	1,29E+02
4,05	7,73E+02	1,44E+02
4,15	8,19E+02	1,60E+02
4,25	8,69E+02	1,77E+02
4,35	9,21E+02	1,95E+02
4,45	9,77E+02	2,14E+02
4,55	1,04E+03	2,34E+02
4,65	1,10E+03	2,56E+02
4,75	1,17E+03	2,79E+02
4,85	1,24E+03	3,03E+02
4,95	1,32E+03	3,30E+02
5,05	1,40E+03	3,58E+02
5,15	1,49E+03	3,89E+02

Таблица 8

E*MeV	< σ >	DELTA(σ)
5,15	2,58E+01	5,35E+00
5,25	2,73E+01	5,27E+00
5,35	2,89E+01	5,17E+00
5,45	3,07E+01	5,03E+00
5,55	3,25E+01	4,86E+00
5,65	3,45E+01	4,65E+00
5,75	3,66E+01	4,41E+00
5,85	3,88E+01	4,13E+00
5,95	4,13E+01	3,80E+00
6,05	4,39E+01	3,43E+00
6,15	4,67E+01	3,03E+00
6,25	4,97E+01	2,61E+00
6,35	5,29E+01	2,23E+00
6,45	5,64E+01	1,96E+00
6,55	6,01E+01	1,96E+00
6,65	6,42E+01	2,33E+00
6,75	6,84E+01	3,04E+00
6,85	7,30E+01	4,00E+00
6,95	7,80E+01	5,16E+00
7,05	8,32E+01	6,51E+00
7,15	8,89E+01	8,04E+00
7,25	9,49E+01	9,77E+00
7,35	1,01E+02	1,17E+01
7,45	1,08E+02	1,38E+01
7,55	1,16E+02	1,62E+01
7,65	1,23E+02	1,88E+01
7,75	1,32E+02	2,17E+01
7,85	1,41E+02	2,49E+01
7,95	1,51E+02	2,83E+01
8,05	1,61E+02	3,21E+01
8,15	1,72E+02	3,62E+01
8,25	1,84E+02	4,08E+01
8,35	1,97E+02	4,57E+01
8,45	2,11E+02	5,11E+01
8,55	2,25E+02	5,70E+01
8,65	2,41E+02	6,34E+01
8,75	2,58E+02	7,04E+01
8,85	2,76E+02	7,80E+01
8,95	2,95E+02	8,63E+01
9,05	3,16E+02	9,54E+01
9,15	3,39E+02	1,05E+02

Таблица 9

E*MeV	< σ >	DELTA(σ)
1,25	1,42E+02	3,96E+01
1,35	1,55E+02	3,86E+01
1,45	1,69E+02	3,74E+01
1,55	1,85E+02	3,58E+01
1,65	2,01E+02	3,40E+01
1,75	2,19E+02	3,18E+01
1,85	2,37E+02	2,95E+01
1,95	2,58E+02	2,75E+01
2,05	2,79E+02	2,57E+01
2,15	3,01E+02	2,42E+01
2,25	3,24E+02	2,37E+01
2,35	3,50E+02	2,52E+01
2,45	3,78E+02	2,93E+01
2,55	4,07E+02	3,59E+01
2,65	4,39E+02	4,44E+01
2,75	4,72E+02	5,45E+01
2,85	5,07E+02	6,60E+01
2,95	5,44E+02	7,88E+01
3,05	5,83E+02	9,25E+01
3,15	6,23E+02	1,07E+02
3,25	6,65E+02	1,22E+02
3,35	7,09E+02	1,38E+02
3,45	7,55E+02	1,54E+02
3,55	8,02E+02	1,71E+02
3,65	8,52E+02	1,89E+02
3,75	9,04E+02	2,09E+02
3,85	9,59E+02	2,31E+02
3,95	1,02E+03	2,54E+02
4,05	1,08E+03	2,79E+02
4,15	1,14E+03	3,05E+02
4,25	1,21E+03	3,33E+02
4,35	1,29E+03	3,62E+02
4,45	1,36E+03	3,92E+02
4,55	1,45E+03	4,24E+02
4,65	1,54E+03	4,58E+02
4,75	1,63E+03	4,93E+02
4,85	1,73E+03	5,31E+02
4,95	1,84E+03	5,71E+02
5,05	1,95E+03	6,14E+02
5,15	2,07E+03	6,59E+02
5,25	2,20E+03	7,08E+02

Расчеты эффективного сечения для реакций $^{63}\text{Cu}(n, \alpha)$, $^{90}\text{Zr}(n, 2n)$, $^{93}\text{Nb}(n, 2n)$.

Таблица 10

E*MeV	$\langle\sigma\rangle$	DELTA(σ)
4,45	8,05E+00	2,11E+00
4,55	8,51E+00	2,12E+00
4,65	9,00E+00	2,12E+00
4,75	9,51E+00	2,12E+00
4,85	1,01E+01	2,10E+00
4,95	1,06E+01	2,08E+00
5,05	1,13E+01	2,05E+00
5,15	1,19E+01	2,01E+00
5,25	1,26E+01	1,95E+00
5,35	1,34E+01	1,89E+00
5,45	1,42E+01	1,81E+00
5,55	1,50E+01	1,71E+00
5,65	1,59E+01	1,60E+00
5,75	1,69E+01	1,47E+00
5,85	1,80E+01	1,33E+00
5,95	1,91E+01	1,18E+00
6,05	2,03E+01	1,03E+00
6,15	2,16E+01	9,07E-01
6,25	2,31E+01	8,49E-01
6,35	2,46E+01	9,09E-01
6,45	2,62E+01	1,10E+00
6,55	2,79E+01	1,42E+00
6,65	2,98E+01	1,82E+00
6,75	3,18E+01	2,31E+00
6,85	3,40E+01	2,87E+00
6,95	3,63E+01	3,51E+00
7,05	3,87E+01	4,23E+00
7,15	4,14E+01	5,03E+00
7,25	4,42E+01	5,92E+00
7,35	4,72E+01	6,91E+00
7,45	5,04E+01	8,00E+00
7,55	5,39E+01	9,21E+00
7,65	5,76E+01	1,05E+01
7,75	6,15E+01	1,20E+01
7,85	6,58E+01	1,36E+01
7,95	7,03E+01	1,53E+01
8,05	7,52E+01	1,72E+01
8,15	8,05E+01	1,93E+01
8,25	8,61E+01	2,16E+01
8,35	9,21E+01	2,40E+01
8,45	9,85E+01	2,67E+01

Таблица 11

E*MeV	$\langle\sigma\rangle$	DELTA(σ)
12,35	4,72E+02	6,42E+01
12,45	5,02E+02	6,18E+01
12,55	5,35E+02	5,88E+01
12,65	5,71E+02	5,53E+01
12,75	6,09E+02	5,12E+01
12,85	6,49E+02	4,63E+01
12,95	6,93E+02	4,08E+01
13,05	7,40E+02	3,44E+01
13,15	7,90E+02	2,71E+01
13,25	8,45E+02	1,93E+01
13,35	9,03E+02	1,22E+01
13,45	9,66E+02	1,23E+01
13,55	1,03E+03	2,20E+01
13,65	1,11E+03	3,59E+01
13,75	1,18E+03	5,24E+01
13,85	1,27E+03	7,14E+01
13,95	1,36E+03	9,30E+01
14,05	1,45E+03	1,17E+02
14,15	1,56E+03	1,45E+02
14,25	1,67E+03	1,76E+02
14,35	1,79E+03	2,10E+02
14,45	1,93E+03	2,48E+02
14,55	2,07E+03	2,91E+02
14,65	2,22E+03	3,39E+02
14,75	2,38E+03	3,93E+02
14,85	2,56E+03	4,52E+02
14,95	2,75E+03	5,18E+02
15,05	2,96E+03	5,91E+02
15,15	3,18E+03	6,72E+02
15,25	3,42E+03	7,61E+02
15,35	3,68E+03	8,61E+02
15,45	3,97E+03	9,71E+02
15,55	4,27E+03	1,09E+03
15,65	4,60E+03	1,23E+03
15,75	4,96E+03	1,38E+03
15,85	5,36E+03	1,55E+03
15,95	5,78E+03	1,74E+03
16,05	6,25E+03	1,95E+03
16,15	6,76E+03	2,18E+03
16,25	7,32E+03	2,44E+03
16,35	7,94E+03	2,74E+03

Таблица 12

E*MeV	$\langle\sigma\rangle$	DELTA(σ)
9,35	2,22E+02	2,67E+01
9,45	2,37E+02	2,54E+01
9,55	2,52E+02	2,39E+01
9,65	2,69E+02	2,21E+01
9,75	2,87E+02	2,00E+01
9,85	3,06E+02	1,76E+01
9,95	3,26E+02	1,48E+01
10,05	3,48E+02	1,17E+01
10,15	3,71E+02	8,34E+00
10,25	3,96E+02	4,87E+00
10,35	4,22E+02	3,44E+00
10,45	4,50E+02	6,98E+00
10,55	4,80E+02	1,24E+01
10,65	5,12E+02	1,87E+01
10,75	5,46E+02	2,59E+01
10,85	5,83E+02	3,39E+01
10,95	6,22E+02	4,29E+01
11,05	6,64E+02	5,29E+01
11,15	7,08E+02	6,41E+01
11,25	7,56E+02	7,65E+01
11,35	8,07E+02	9,03E+01
11,45	8,61E+02	1,06E+02
11,55	9,19E+02	1,22E+02
11,65	9,81E+02	1,41E+02
11,75	1,05E+03	1,62E+02
11,85	1,12E+03	1,85E+02
11,95	1,20E+03	2,10E+02
12,05	1,28E+03	2,38E+02
12,15	1,37E+03	2,68E+02
12,25	1,46E+03	3,02E+02
12,35	1,56E+03	3,38E+02
12,45	1,67E+03	3,78E+02
12,55	1,79E+03	4,22E+02
12,65	1,91E+03	4,71E+02
12,75	2,05E+03	5,23E+02
12,85	2,19E+03	5,81E+02
12,95	2,35E+03	6,44E+02
13,05	2,51E+03	7,13E+02
13,15	2,69E+03	7,89E+02
13,25	2,89E+03	8,71E+02
13,35	3,10E+03	9,62E+02

Расчеты эффективного сечения для реакций $^{103}\text{Rh}(n,n')$, $^{111}\text{Cd}(n,n')$, $^{115}\text{In}(n,n')$.

Таблица 13

E*MeV	< σ >	DELTA(σ)
0,35	6,05E+02	1,18E+02
0,37	6,25E+02	1,09E+02
0,39	6,46E+02	1,01E+02
0,4125	6,66E+02	9,42E+01
0,4375	6,91E+02	8,65E+01
0,4625	7,16E+02	8,10E+01
0,4875	7,43E+02	7,95E+01
0,5125	7,72E+02	8,39E+01
0,5375	8,03E+02	9,42E+01
0,5625	8,34E+02	1,07E+02
0,5875	8,67E+02	1,22E+02
0,615	9,00E+02	1,37E+02
0,645	9,42E+02	1,59E+02
0,675	9,86E+02	1,85E+02
0,705	1,03E+03	2,16E+02
0,74	1,08E+03	2,51E+02
0,78	1,14E+03	3,04E+02
0,82	1,21E+03	3,64E+02
0,86	1,27E+03	4,31E+02
0,9	1,35E+03	5,04E+02
0,94	1,42E+03	5,83E+02
0,98	1,50E+03	6,67E+02
1,05	1,58E+03	7,57E+02
1,15	1,80E+03	1,02E+03
1,25	2,05E+03	1,34E+03
1,35	2,33E+03	1,73E+03
1,45	2,65E+03	2,21E+03
1,55	3,01E+03	2,79E+03
1,65	3,41E+03	3,49E+03
1,75	3,86E+03	4,33E+03
1,85	4,35E+03	5,31E+03
1,95	4,90E+03	6,41E+03
2,05	5,48E+03	7,63E+03
2,15	6,11E+03	8,97E+03
2,25	6,78E+03	1,04E+04
2,35	7,51E+03	1,20E+04
2,45	8,31E+03	1,38E+04
2,55	9,18E+03	1,57E+04
2,65	1,01E+04	1,78E+04
2,75	1,11E+04	2,02E+04
2,85	1,22E+04	2,27E+04

Таблица 14

E*MeV	< σ >	DELTA(σ)
0,5125	1,56E+02	5,62E+01
0,5375	1,61E+02	5,54E+01
0,5625	1,66E+02	5,46E+01
0,5875	1,71E+02	5,37E+01
0,615	1,76E+02	5,27E+01
0,645	1,83E+02	5,13E+01
0,675	1,90E+02	4,97E+01
0,705	1,97E+02	4,80E+01
0,74	2,04E+02	4,63E+01
0,78	2,13E+02	4,38E+01
0,82	2,23E+02	4,11E+01
0,86	2,33E+02	3,81E+01
0,9	2,43E+02	3,47E+01
0,94	2,54E+02	3,12E+01
0,98	2,65E+02	2,74E+01
1,05	2,76E+02	2,35E+01
1,15	3,06E+02	1,40E+01
1,25	3,40E+02	1,44E+01
1,35	3,77E+02	3,08E+01
1,45	4,17E+02	5,43E+01
1,55	4,61E+02	8,36E+01
1,65	5,08E+02	1,19E+02
1,75	5,60E+02	1,62E+02
1,85	6,16E+02	2,12E+02
1,95	6,77E+02	2,69E+02
2,05	7,41E+02	3,32E+02
2,15	8,09E+02	4,01E+02
2,25	8,82E+02	4,77E+02
2,35	9,61E+02	5,59E+02
2,45	1,05E+03	6,50E+02
2,55	1,14E+03	7,51E+02
2,65	1,24E+03	8,63E+02
2,75	1,34E+03	9,85E+02
2,85	1,46E+03	1,12E+03
2,95	1,58E+03	1,26E+03
3,05	1,70E+03	1,41E+03
3,15	1,83E+03	1,56E+03
3,25	1,96E+03	1,72E+03
3,35	2,10E+03	1,88E+03
3,45	2,25E+03	2,05E+03
3,55	2,40E+03	2,22E+03

Таблица 15

E*MeV	< σ >	DELTA(σ)
0,4125	1,31E+02	5,07E+01
0,4375	1,35E+02	5,03E+01
0,4625	1,39E+02	4,97E+01
0,4875	1,43E+02	4,90E+01
0,5125	1,48E+02	4,82E+01
0,5375	1,53E+02	4,72E+01
0,5625	1,57E+02	4,62E+01
0,5875	1,62E+02	4,51E+01
0,615	1,68E+02	4,39E+01
0,645	1,74E+02	4,22E+01
0,675	1,81E+02	4,04E+01
0,705	1,88E+02	3,85E+01
0,74	1,95E+02	3,64E+01
0,78	2,04E+02	3,36E+01
0,82	2,13E+02	3,05E+01
0,86	2,23E+02	2,70E+01
0,9	2,33E+02	2,32E+01
0,94	2,44E+02	1,92E+01
0,98	2,54E+02	1,50E+01
1,05	2,65E+02	1,10E+01
1,15	2,95E+02	1,00E+01
1,25	3,28E+02	2,56E+01
1,35	3,64E+02	4,74E+01
1,45	4,04E+02	7,43E+01
1,55	4,48E+02	1,07E+02
1,65	4,95E+02	1,47E+02
1,75	5,47E+02	1,94E+02
1,85	6,03E+02	2,50E+02
1,95	6,63E+02	3,13E+02
2,05	7,28E+02	3,83E+02
2,15	7,96E+02	4,59E+02
2,25	8,70E+02	5,43E+02
2,35	9,49E+02	6,35E+02
2,45	1,04E+03	7,35E+02
2,55	1,13E+03	8,47E+02
2,65	1,23E+03	9,71E+02
2,75	1,34E+03	1,11E+03
2,85	1,45E+03	1,25E+03
2,95	1,57E+03	1,41E+03
3,05	1,69E+03	1,57E+03
3,15	1,83E+03	1,74E+03

Расчеты эффективного сечения для реакций $^{204}\text{Pb}(n, n')$, $^{237}\text{Np}(n, f)$.

Таблица 16

Таблица 17

E*MeV	< σ >	DELTA(σ)	E*MeV	< σ >	DELTA(σ)
2,35	6,69E+01	1,29E+01	0,31	1,12E+03	2,04E+02
2,45	7,20E+01	1,31E+01	0,33	1,16E+03	1,83E+02
2,55	7,74E+01	1,32E+01	0,35	1,20E+03	1,61E+02
2,65	8,32E+01	1,33E+01	0,37	1,25E+03	1,39E+02
2,75	8,92E+01	1,34E+01	0,39	1,29E+03	1,19E+02
2,85	9,56E+01	1,35E+01	0,4125	1,33E+03	9,95E+01
2,95	1,02E+02	1,36E+01	0,4375	1,38E+03	8,05E+01
3,05	1,09E+02	1,36E+01	0,4625	1,43E+03	7,40E+01
3,15	1,17E+02	1,36E+01	0,4875	1,49E+03	8,84E+01
3,25	1,24E+02	1,34E+01	0,5125	1,55E+03	1,22E+02
3,35	1,32E+02	1,31E+01	0,5375	1,61E+03	1,65E+02
3,45	1,40E+02	1,26E+01	0,5625	1,68E+03	2,10E+02
3,55	1,49E+02	1,21E+01	0,5875	1,74E+03	2,54E+02
3,65	1,58E+02	1,15E+01	0,615	1,81E+03	3,01E+02
3,75	1,67E+02	1,11E+01	0,645	1,90E+03	3,61E+02
3,85	1,77E+02	1,10E+01	0,675	1,99E+03	4,29E+02
3,95	1,88E+02	1,14E+01	0,705	2,09E+03	5,03E+02
4,05	1,98E+02	1,22E+01	0,74	2,18E+03	5,85E+02
4,15	2,10E+02	1,35E+01	0,78	2,31E+03	7,05E+02
4,25	2,23E+02	1,52E+01	0,82	2,45E+03	8,37E+02
4,35	2,36E+02	1,74E+01	0,86	2,59E+03	9,84E+02
4,45	2,50E+02	2,00E+01	0,9	2,74E+03	1,14E+03
4,55	2,65E+02	2,29E+01	0,94	2,90E+03	1,31E+03
4,65	2,81E+02	2,62E+01	0,98	3,06E+03	1,49E+03
4,75	2,98E+02	2,99E+01	1,05	3,22E+03	1,69E+03
4,85	3,16E+02	3,41E+01	1,15	3,68E+03	2,24E+03
4,95	3,35E+02	3,88E+01	1,25	4,20E+03	2,93E+03
5,05	3,55E+02	4,40E+01	1,35	4,80E+03	3,76E+03
5,15	3,77E+02	4,98E+01	1,45	5,47E+03	4,78E+03
5,25	4,01E+02	5,63E+01	1,55	6,22E+03	6,01E+03
5,35	4,26E+02	6,34E+01	1,65	7,06E+03	7,50E+03
5,45	4,53E+02	7,14E+01	1,75	8,00E+03	9,26E+03
5,55	4,82E+02	8,02E+01	1,85	9,05E+03	1,13E+04
5,65	5,13E+02	8,99E+01	1,95	1,02E+04	1,37E+04
5,75	5,46E+02	1,01E+02	2,05	1,14E+04	1,62E+04
5,85	5,82E+02	1,13E+02	2,15	1,27E+04	1,91E+04
5,95	6,20E+02	1,26E+02	2,25	1,41E+04	2,22E+04
6,05	6,62E+02	1,40E+02	2,35	1,57E+04	2,55E+04
6,15	7,06E+02	1,56E+02	2,45	1,74E+04	2,92E+04
6,25	7,54E+02	1,74E+02	2,55	1,92E+04	3,33E+04
6,35	8,06E+02	1,94E+02	2,65	2,12E+04	3,78E+04

Структура разработанной программы (основной блок) расчета эффективных сечений реакций на примере расчета эффективного сечения для реакции $^{237}\text{Np}(n, f)$. Данные приведены для спектра ААЭС ТОЧКА 1.

E	E*MeV	$\sigma(E)$	$\sigma^*(E)$	$\varphi(E)$	$\varphi^*(E)$	DELTA(E)	qi	q	$\phi1(>E\text{эфф})$	$\sigma1\text{эфф}$
0,1	0,1025	1,854E-02	1,91E-02	1,44E+02	1,42E+02	0,005	1,36E-02	2,49E-23	4,58E+01	5,43E-25
0,105	0,1075	1,957E-02	2,06E-02	1,40E+02	1,38E+02	0,005	1,42E-02	2,49E-23	4,50E+01	5,52E-25
0,11	0,1125	2,163E-02	2,24E-02	1,36E+02	1,34E+02	0,005	1,51E-02	2,49E-23	4,44E+01	5,61E-25
0,115	0,1175	2,318E-02	2,39E-02	1,33E+02	1,31E+02	0,005	1,56E-02	2,49E-23	4,37E+01	5,69E-25
0,12	0,12375	2,467E-02	2,55E-02	1,29E+02	1,27E+02	0,0075	2,42E-02	2,49E-23	4,30E+01	5,78E-25
0,1275	0,13125	2,624E-02	2,70E-02	1,24E+02	1,22E+02	0,0075	2,47E-02	2,49E-23	4,21E+01	5,91E-25
0,135	0,13875	2,782E-02	2,86E-02	1,19E+02	1,17E+02	0,0075	2,52E-02	2,49E-23	4,12E+01	6,04E-25
0,1425	0,14625	2,940E-02	3,03E-02	1,15E+02	1,13E+02	0,0075	2,57E-02	2,49E-23	4,03E+01	6,17E-25
0,15	0,155	3,123E-02	3,23E-02	1,11E+02	1,09E+02	0,01	3,51E-02	2,49E-23	3,94E+01	6,31E-25
0,16	0,165	3,333E-02	3,44E-02	1,06E+02	1,04E+02	0,01	3,58E-02	2,49E-23	3,83E+01	6,48E-25
0,17	0,175	3,543E-02	3,65E-02	1,02E+02	9,98E+01	0,01	3,64E-02	2,49E-23	3,73E+01	6,67E-25
0,18	0,185	3,753E-02	3,86E-02	9,77E+01	9,58E+01	0,01	3,70E-02	2,49E-23	3,63E+01	6,85E-25
0,19	0,195	3,963E-02	4,17E-02	9,38E+01	9,20E+01	0,01	3,84E-02	2,49E-23	3,53E+01	7,03E-25
0,2	0,205	4,380E-02	4,69E-02	9,03E+01	8,86E+01	0,01	4,16E-02	2,49E-23	3,44E+01	7,22E-25
0,21	0,215	5,003E-02	5,31E-02	8,69E+01	8,53E+01	0,01	4,54E-02	2,49E-23	3,35E+01	7,41E-25
0,22	0,225	5,626E-02	5,94E-02	8,38E+01	8,23E+01	0,01	4,89E-02	2,49E-23	3,27E+01	7,61E-25
0,23	0,235	6,249E-02	6,64E-02	8,09E+01	7,95E+01	0,01	5,28E-02	2,49E-23	3,19E+01	7,80E-25
0,24	0,2475	7,029E-02	7,50E-02	7,81E+01	7,62E+01	0,015	8,57E-02	2,49E-23	3,11E+01	8,00E-25
0,255	0,2625	7,963E-02	8,35E-02	7,42E+01	7,25E+01	0,015	9,08E-02	2,49E-23	2,99E+01	8,31E-25
0,27	0,275	8,742E-02	9,21E-02	7,07E+01	6,96E+01	0,01	6,41E-02	2,49E-23	2,88E+01	8,62E-25
0,28	0,29	9,677E-02	1,05E-01	6,85E+01	6,64E+01	0,02	1,40E-01	2,49E-23	2,81E+01	8,83E-25
0,3	0,31	1,138E-01	1,25E-01	6,43E+01	6,25E+01	0,02	1,56E-01	2,49E-23	2,68E+01	9,27E-25
0,32	0,33	1,354E-01	1,46E-01	6,06E+01	5,89E+01	0,02	1,72E-01	2,49E-23	2,56E+01	9,72E-25
0,34	0,35	1,571E-01	1,68E-01	5,72E+01	5,55E+01	0,02	1,86E-01	2,49E-23	2,44E+01	1,02E-24
0,36	0,37	1,787E-01	1,90E-01	5,38E+01	5,25E+01	0,02	1,99E-01	2,49E-23	2,33E+01	1,07E-24
0,38	0,39	2,003E-01	2,28E-01	5,12E+01	5,00E+01	0,02	2,28E-01	2,49E-23	2,22E+01	1,12E-24
0,4	0,4125	2,561E-01	3,01E-01	4,88E+01	4,75E+01	0,025	3,57E-01	2,49E-23	2,12E+01	1,17E-24
0,425	0,4375	3,460E-01	3,91E-01	4,62E+01	4,50E+01	0,025	4,40E-01	2,49E-23	2,00E+01	1,24E-24
0,45	0,4625	4,358E-01	4,81E-01	4,39E+01	4,26E+01	0,025	5,12E-01	2,49E-23	1,89E+01	1,31E-24
0,475	0,4875	5,257E-01	5,64E-01	4,13E+01	4,00E+01	0,025	5,64E-01	2,49E-23	1,79E+01	1,39E-24
0,5	0,5125	6,026E-01	6,35E-01	3,86E+01	3,73E+01	0,025	5,91E-01	2,49E-23	1,69E+01	1,48E-24
0,525	0,5375	6,664E-01	6,98E-01	3,59E+01	3,46E+01	0,025	6,05E-01	2,49E-23	1,59E+01	1,56E-24
0,55	0,5625	7,303E-01	7,62E-01	3,33E+01	3,22E+01	0,025	6,13E-01	2,49E-23	1,51E+01	1,65E-24
0,575	0,5875	7,941E-01	8,26E-01	3,10E+01	2,99E+01	0,025	6,18E-01	2,49E-23	1,43E+01	1,74E-24
0,6	0,615	8,588E-01	8,92E-01	2,88E+01	2,77E+01	0,03	7,40E-01	2,49E-23	1,35E+01	1,84E-24
0,63	0,645	9,243E-01	9,57E-01	2,65E+01	2,55E+01	0,03	7,32E-01	2,49E-23	1,27E+01	1,96E-24
0,66	0,675	9,898E-01	1,02E+00	2,45E+01	2,35E+01	0,03	7,21E-01	2,49E-23	1,19E+01	2,09E-24
0,69	0,705	1,053E+00	1,08E+00	2,26E+01	2,18E+01	0,03	7,08E-01	2,49E-23	1,12E+01	2,22E-24
0,72	0,74	1,114E+00	1,15E+00	2,09E+01	1,99E+01	0,04	9,16E-01	2,49E-23	1,06E+01	2,36E-24
0,76	0,78	1,185E+00	1,22E+00	1,89E+01	1,80E+01	0,04	8,73E-01	2,49E-23	9,75E+00	2,55E-24
0,8	0,82	1,246E+00	1,27E+00	1,70E+01	1,62E+01	0,04	8,23E-01	2,49E-23	9,04E+00	2,75E-24
0,84	0,86	1,300E+00	1,33E+00	1,53E+01	1,46E+01	0,04	7,72E-01	2,49E-23	8,39E+00	2,96E-24
0,88	0,9	1,352E+00	1,37E+00	1,38E+01	1,31E+01	0,04	7,22E-01	2,49E-23	7,81E+00	3,19E-24
0,92	0,94	1,394E+00	1,41E+00	1,25E+01	1,19E+01	0,04	6,73E-01	2,49E-23	7,28E+00	3,42E-24
0,96	0,98	1,434E+00	1,46E+00	1,13E+01	1,08E+01	0,04	6,31E-01	2,49E-23	6,81E+00	3,65E-24
1	1,05	1,489E+00	1,52E+00	1,03E+01	9,21E+00	0,1	1,40E+00	2,49E-23	6,37E+00	3,90E-24
1,1	1,15	1,551E+00	1,57E+00	8,15E+00	7,35E+00	0,1	1,16E+00	2,49E-23	5,45E+00	4,56E-24
1,2	1,25	1,595E+00	1,61E+00	6,54E+00	5,91E+00	0,1	9,52E-01	2,49E-23	4,72E+00	5,27E-24
1,3	1,35	1,627E+00	1,64E+00	5,28E+00	4,79E+00	0,1	7,86E-01	2,49E-23	4,13E+00	6,02E-24
1,4	1,45	1,653E+00	1,66E+00	4,30E+00	3,93E+00	0,1	6,53E-01	2,49E-23	3,65E+00	6,82E-24
1,5	1,55	1,672E+00	1,68E+00	3,55E+00	3,26E+00	0,1	5,47E-01	2,49E-23	3,26E+00	7,64E-24

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность НИЯУ МИФИ и коллективу кафедры «Радиационной физики и безопасности атомных технологий» за возможность выполнения работы и за качественные знания, полученные за годы учебы в университете.

