

Желателно е в тези области да се използва точната формула, предложена в настоящата работа, особено в близкия район до източника (зоната от 2 до 10 km)

Литература

1. Pasquill F. Atmospheric diffusion. D.V.Nostrand, 1962, p. 297.
2. Лайхтман Д.А. Физика пограничного слоя атмосферы. Гидрометиздат, 1970, с 341
3. Hanna S. Review of atmospheric diffusion models for regulatory applications Technical Note 177. WMO-581, 1992.
4. Syrakov D., Yordanov D., Kolarova M. On the long-term distribution of windborn material around a single source. Compt. Rend. Bulg. Acad. Sci., 1993, 6.

BG9300353

Програмни системи за оперативно и прецизно пресмятане на основните неутронно-физически характеристики, избор на оптимални картограми за презареждане на активните зони, анализ и обосновка на режимите на експлоатация на действащите и перспективни реактори от типа ВВЕР

**Т. Апостолов, К. Иванов, Р. Проганова,
М. Манолова, Т. Петрова, Г. Алекова**

Институт за ядрени изследвания и ядрена енергетика - БАН

Тенденциите в развитието на ядрените горивни технологии съчетават стратегията за ефективно използване на ядреното гориво с повишаването на изискванията за ядрена безопасност. Новите технологии променят в една или друга степен неутронно-физическите характеристики на активната зона. Това прави анализа на процесите в активните зони и обосновката на горивните зареждания много по-трудна задача и изисква нови търсения и решения в две направления:

- анализ и оценка на реалните горивни зареждания и режимите на експлоатация на реакторите ВВЕР-440 и ВВЕР-1000 на АЕЦ-Козлодуй в рамките на съвременните принципи на безопасност и норми на експлоатация на АЕЦ. За тази цел са необходими програмни системи, детайлно верифицирани на базата на експериментални данни от действащите реактори и даващи възможност за пресмятане на широк кръг от характеристики. В рамките на преоценката на безопасността на реакторите ВВЕР и на основата на сравнение с практиката на развитите страни и анализ на физическите особености на активните зони на реакторите от типа ВВЕР е необходимо да се разшири набора от лимитиращи параметри при избор на горивни зареждания и да се приведат техните стойности към световните стандарти;
- изследвания, свързани с развитието на съвременни програмни системи за анализ на активните зони на реактори от типа ВВЕР с перспективни концепции, включващи: нови конструктивни решения и материали за горивни касети и касети от системата за контрол и управление (СУЗ), повишаване на обогатяването на свежото гориво, използване на изгарящи поглъщатели в две модификации - интегрирани и дискретни и др. Еволюцията в проектирането и внедряването на нови горивни технологии има за цел да се увеличи ефективността при използване на горивото на основата на по-малко паразитно поглъщане в конструкционните материали, по-добро изравняване на полето на енергоотделяне, по-малко неутронно изтичане извън активната зона и увеличаване на запасите до допустимите параметри, гарантиращи ядрената безопасност.

В продължение на много години специалисти от проблемна група "Реакторна физика" в ИЯИЯЕ работят по развитието, тестването и приложението на изчислителни програми за реакторно-физични пресмятания на ВВЕР. На базата на тримерната дифузионна програма БИПР-5, моделираща физическите процеси в активните зони на тези реактори, бяха развити ефективни версии - БИПР-5К и БИПР-5АК, получили международно признание и внедрени в АЕЦ-Козлодуй.

Като домакин-организатор на библиотека от реакторни програми и файлове данни на международния колектив за съвместни изследвания на неутронно-физическите проблеми на ядрената безопасност на ВВЕР в проблемната група е създаден фонд от над 100 програмни продукти [1]. Библиотеката съдържа:

- файлове експлоатационни данни, библиотеки от константи и програми за тяхната подготовка: АЕС, ВНАВ, НИП, КОРТ, КОРТ-А, ЛІРАР-2, НОРД, НВАЕС4, RFIT, RFIT-ED, ВАК-SPPS-0, VRI, EBO, MAGRU-S, MAGRU-440, MAGRU-VVER-1000P, АЕЦ ПАКШ (от 1-ва до 3-та кампания), EBO4 (IV блок, от 1-ва до 3-та кампания), АЕЦ-Козлодуй (V блок, 1-ва кампания), АЕЦ-Калинин (I блок, 1-ва кампания);
- спектрални и свързани с тях програми: APRO, BETTY, KROS, COMPAR FEDGROUP-3, KASSETA, MIKROS, MICROBE-01, NESSEL-4, NESSEL-IV-EC, OKA, TANIA, THERMOS, THESEUS, UNIRASOS, PREPAR-77, MOKA, RESTORE, RETINA, REMO, PRAKTINEC;
- транспортни и дифузионни програми: BIPR-5, BIPR-5A, BIPR-5K, BIPR-5AK, BIPR-5/EC, BIPR-6, BIPR-6S, BIPR-7, BITEPS-1, BORIVJ, BRETISLAV, DERAB-II-E, FEM-2, FEM-3, FEM-3DE, FLEX, HEXAB-II-30E, HEXAB-II-30K, HEXAB-III-30, HEXAGA-II, HEXAGA-II, HEXAGA-IPBF, HEXALOK, HEXBU-2D, HADES, KSENIA, KRAMS, MOBY DICK, MCU, NI-7000, OSKAR-2, PYTHIA-4R, PYTHIA-4S, PYTHIA-Q, PERMAK, POLEX, REKINUR, SPPS-0, SNAP-3D, TPHEX, STAKS-1M;
- програми за решаване на оптимизационни задачи: ALKASS, LIZA, ORAKS, OPTIM, PROROK-1, TICMUS, ADAGIO, LARGO, OPTICON, PUSPOLIN.

В резултат на двустранни сътрудничества в проблемната група са получени и се усвояват програмните системи WIMS-D4 и MOBY DICK. Програмата WIMS-D4 [2] се използва за получаване на усреднени малогрупови константи, като използва 69-групова библиотека ядрени константи (14 бързи, 13 резонансни, 42 топлинни). Основното усъвършенстване на програмата е по-точното пресмятане на резонансните ефекти, както и пресмятането в топлинната област. При определянето на хомогенизираните групови константи се използва теоремата на еквивалентност и методът на вероятностите за първи удар при пресмятане на скоростите на реакциите.

MOBY-DICK [3] е модулна система за решаване на многогруповата система от дифузионни уравнения (от 2 до 10 енергийни групи), използвайки модификация на приближението на Боресен при прилагане на метода на крайните разлики. Модулната система позволява използването на дву- и тримерни подходи с два типа мрежи:

- триъгълни (решения на цялата зона по груба мрежа с разделяне на касетите на $6k^2$ ($k=1, \dots, n$) триъгълни елемента);
- хексагонални (пресмятания на зоната или на нейни подобласти по фина мрежа т.е. по топлоотделящи елементи - ТОЕЛ).

Системата се използва за: пресмятане на изгаряне, преходни процеси с нестационарно отравяне и др.; анализи на характеристиките на зоната в даден момент (включително и пресмятане на коефициентите на реактивност по теория на възмущенията); пресмятания без обратни връзки. Използвани са следните итерационни методи: за вътрешните итерации - методът на свръхрелаксация; за външните итерации - методът на постепенната апроксимация. Ускоряването на външните итерации се управлява чрез процедурата СЕВАСС, даваща възможност да бъдат използвани полиноми на Чебишев, метода на Люстерник (линейни изрази) или полиноми, създадени от потребителя. MOBY DICK позволява преход от двумерна към тримерна геометрия. Двумерните

пресмятания са реализирани по два начина: като пресмятания с параметри, усреднени по активната зона; като решения на избран хоризонтален слой със зададена мощност.

Пресмятанията на зоната в процеса на изгарянето се състоят от две части:

- тримерни решения по груба мрежа (минимум 6 точки на касета);
- потвелни пресмятания на избрани хоризонтални слоеве на зоната, свързани с тримерните решения по груба мрежа.

В зависимост от типа на пресмятания реактор, MOBY DICK използва две библиотеки от дифузионни константи: библиотека за ВВЕР-440 - MAGDA-2 - двугрупови константи за хомогенизирани касети и необходимите гранични условия във вид на гама-матрици; библиотека за ВВЕР-1000 - MAGRU - четиригрупови данни за хомогенизирани касети, за топлоотделящи елементи, за каналите на поглъщащите елементи и др.

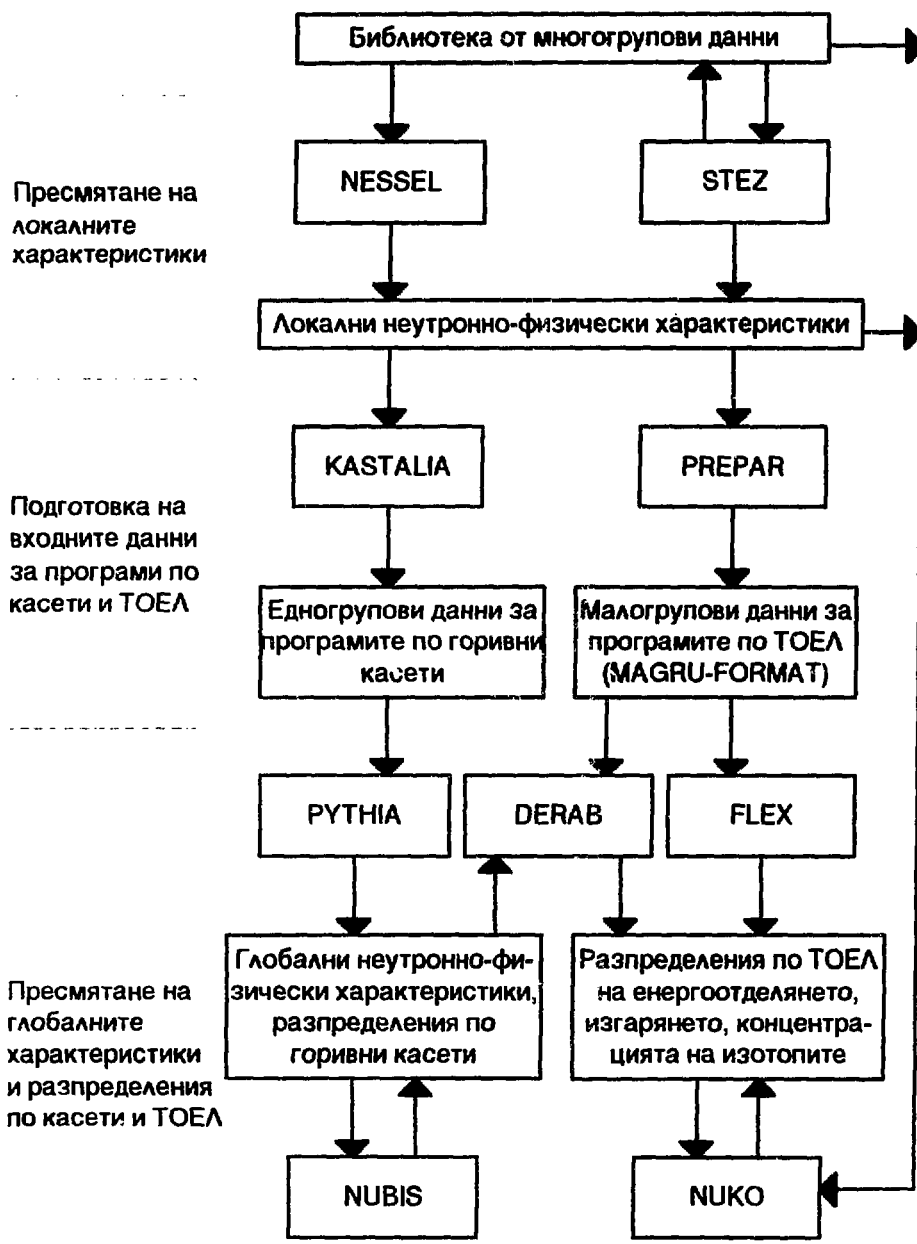
В резултат на многогодишно сътрудничество със специалисти от К.А.В. - Берлин, Германия в областта на реакторно-физичните пресмятания са усвоявани, развивани и тествани програмите NESSEL-4, PYTHIA и DERAB. По линия на програмата PHARE е предложен съвместен проект ASPERCA за провеждане на цялостни реакторно-физични пресмятания с програмната система PHUBER за повишаване на степента на безопасност и надеждността на експлоатация на АЕЦ-Козлодуй.

PHUBER-VVER [4] е съвременна лицензирана програмна система, алтернативна на прилаганите в АЕЦ-Козлодуй, която може да се използва от КИАЕМЦ в изпълнение на неговите функции на контрол и регламентиране на обосновката на реалните горивни зареждания и режимите на експлоатация. PHUBER-VVER пресмята широк кръг от квазистационарни неутронно-физични характеристики на ядрени реактори тип ВВЕР: по касетно и по твелно разпределение на енергоотделянето и изгарянето в активната зона; основни параметри на кампаниите на реакторите и техните контролни характеристики; оптимални картограми за зареждане на активната зона; изотопен състав на отработеното ядрено гориво и други. Тези характеристики са основа за: избор на оптимални картограми за презареждане на активните зони, анализ и обосновка на режимите на експлоатация, анализи на преходни и аварийни процеси. Структурата на програмната система PHUBER е показана на Фиг. 1.

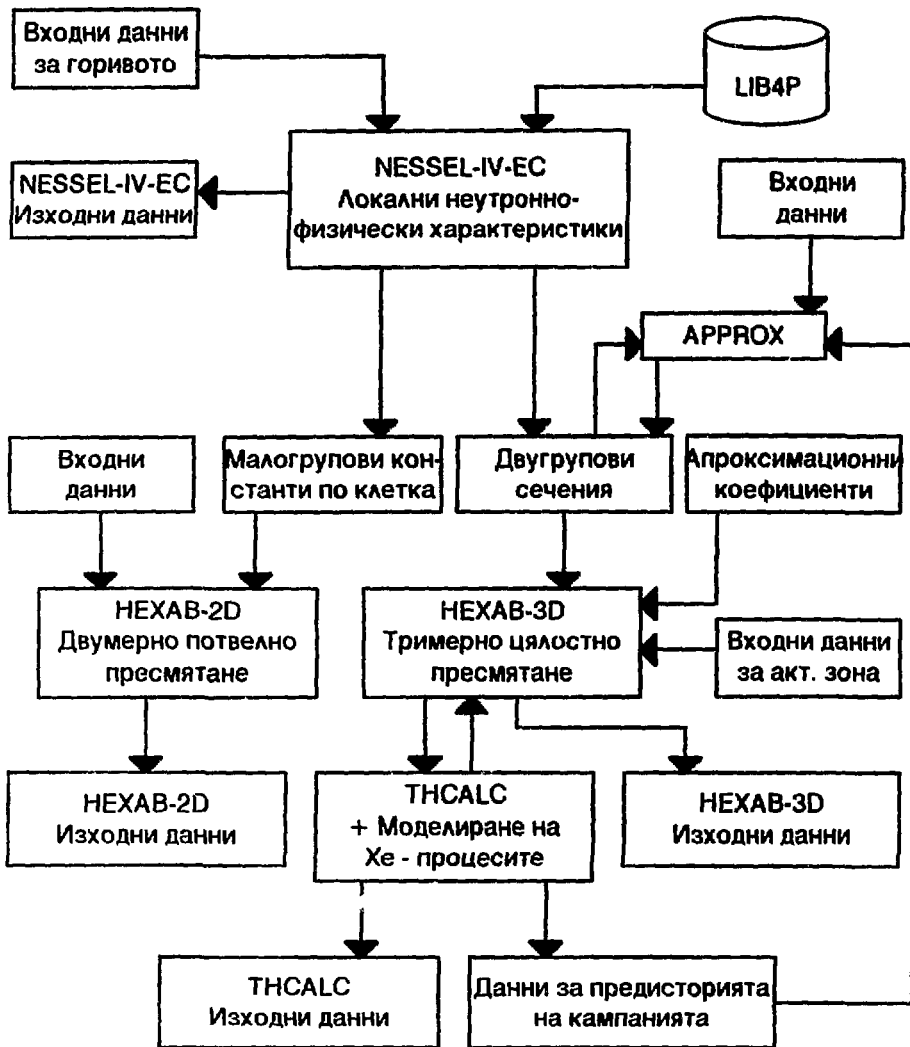
С помощта на програмите NESSEL или STEZ, като се използват многогрупови данни от съответна библиотека, а така също и параметри, характеризиращи геометрията, състава и състоянието на АЗ, се подготвят ефективни малогрупови параметри за горивни касети и отделни части от тях или дължините на екстраполация за отражателя и поглъщащите касети. Тези резултати постъпват в съответните библиотеки, откъдето могат да се използват за различни цели. Така пресметнатите локални данни се подготвят от програмата KASTALIA във вид, необходим за входните данни на еднотрупови дифузионни програми по груба мрежа от тип PYTHIA за пресмятане на глобалните характеристики на активната зона. За решаване на груповото дифузионно уравнение в тази програма се прилага усъвършенстван метод на крайните разлики от по-висок клас. Характерна особеност е, че в използвания градиентен итерационен метод няма разделяне на външни и вътрешни итерации. С този тип програми е свързана интерполационната програма NUBIS.

Програмата PREPAR подготвя необходимите малогрупови характеристики (в MAGRU-формат) за пресмятания по топлоотделящи елементи, на основата на вече определените локални неутронно-физични характеристики. Тези параметри се използват от програмите FLEX и DERAB, които пресмятат разпределението на плътността на мощността и микроразпределението на изгарянето в горивни касети или отделни участъци от активната зона. С тях е свързана програмата NUKO за определяне на микроразпределението на изотопните концентрации на горивото в зависимост от изгарянето.

В рамките на изследователска програма на МААЕ и на основата на файл от измерени данни бяха разработени тримерни реални физически модели задачи (benchmarks) за ВВЕР-440 (II блок на АЕЦ-Козлодуй) и ВВЕР-1000 (V блок на АЕЦ-Козлодуй) [5].



Фиг. 1. Структура на програмната система PHYBER-VVER



Фиг. 2. Структура на програмната система HEXANES

С програми от системата RHYBER бяха извършени тестови пресмятания за 4 кампании на II блок и за 2 кампании на V блок на АЕЦ-Козлодуй, а също така и за 3 кампании на I блок (ВВЕР-1000) на Калининската АЕЦ, Русия. Детайлното сравнение на получените резултати с измерени данни и резултати от други програмни системи, ще бъдат публикувани в специално издание на МААЕ.

Въвеждането на нови горивни технологии, включително използването на пасивни компоненти и изменението на активните системи за безопасност, води до усложняване на анализа на активната зона. Това изисква прилагането на тримерен усъвършенстван

модел и на разширени библиотеки с уточнени данни. Съобразно тези изисквания се развива програмната система HEXANES [6,7], която включва 4 програми: спектралната програма NESSEL-IV-EC, дву- и тримерната дифузионни програми HEXAB-2D [8] и HEXAB-3D и програмата T-CALC за термохидравличен анализ. Структурата на програмната система е показана на Фиг. 2.

Чрез програмата NESSEL-IV-EC [9] се пресмятат локалните неутронно-физични характеристики (ефективни маоогрупови дифузионни параметри и изгаряне на ядреното гориво) не само за дадена подзона, но и за цялата горивна касета, отчитайки силните нееднородности, присъщи за леководните реактори от типа ВВЕР. Тя използва многогруппова библиотека микроскопични сечения LIB4P (12 бързи, 12 резонансни и 10 топлинни) съдържаща данни за 200 изотопа. Енергетичното разпределение на неутронния поток се пресмята чрез многогрупповата апроксимация на уравнението на неутронния пренос, а пространствената зависимост - чрез метода на стъпаловидната хомогенизация. За получаване на по-точни резултати в топлинната област, особено при пресмятане с изгарящи поглътители, зоните които ги съдържат се разделят на по-голям брой (около 40) фини математически зони и се използва методът на вероятностите за първи удар при решаване на интегралното транспортно уравнение.

Основен модул в системата е програмата HEXAB-3D [10], в която са приложени усъвършенствуван модел за повишаване на точността на решение на тримерната дифузионна задача в хексагонална геометрия по груба мрежа и ефективни итерационни методи за решаване на дискретната форма на задачата.

Програмата HEXAB-3D е предназначена за пресмятане на основните неутронно-физически характеристики, като: ефективния коефициент на размножение, тримерните разпределения на неутронния поток и енергоотделянето, ефективността на организмите от системата СУЗ и др. Разработени са две версии на програмата: HEXAB-III-30 - областта на решение в хоризонтален план е 30°-сектор от активната зона; HEXAB-III-360 - цялата активна зона.

За решаване на груповите дифузионни уравнения се прилага 9-точкова схема на крайните разлики (една точка на касета в хоризонтален план). Разработен е ефективен подход [12] за повишаване на точността на пресмятаните интегрални и локални реакторни параметри, без значително увеличаване на изискванията към машинната памет и времето на пресмятане. Разработената схема на корекция притежава положителното свойство на компенсация на грешките от използването на метода на крайните разлики по груба мрежа и на дифузионното приближение.

За решаване на дискретната форма на груповите дифузионни уравнения се прилага оптимизирана итерационна стратегия [13] на три нива. За вътрешните итерации са използват два метода на непънатата факторизация - AGA и MAGA, ускорени с процедура на двойна свръхрелаксация. Теоретично обоснования ефективен итерационен метод MAGA [14] е развит на основата на модификация на итерационната схема на метода AGA, която увеличава скоростта на сходимост и намалява времето на пресмятане. За външните итерации се прилага степенен метод, който може да бъде ускорен чрез двуили трислоен методи на полиномите на Чебишев. В най-външния итерационен цикъл се организира пресмятането на корекционните параметри по физически зони и енергийни групи и три до пет итерации са достатъчни за тяхното определяне с достатъчна за практиката точност.

Програмата HEXAB-3D е детайлно тествана на тримерни модели на енергийни реактори с хексагонална конфигурация в хоризонтален план и хетерогенна слоеста структура в аксиално направление [9]. Получените резултати са сравнявани с експериментални данни и резултати от други програми. Програмата HEXAB-3D е получила международно признание и е приета в световно известните библиотечни фондове на Oak Ridge National Laboratory, САЩ и Nea Data Bank, Франция [11].

С цел провеждане на изследвания, свързани с прилагането на изгарящи поглътите-

ли във ВВЕР, библиотеката от микроскопични данни LIB4P бе разширена с необходимите многогруппови данни за най-важните изотопи на гадолия Gd-155 и Gd-157. В рамките на изследователска програма на МААЕ се извършват пресмятания с програмната система HEXANES за анализ на влиянието на изгарящите поглътители върху неутронно-физическите характеристики на различни конфигурации от хексагонални решетки [15].

Обосновката на горивните зареждания и оценката на режимите на работа на активната зона на реакторите ВВЕР изисква анализ на преходни процеси, нарушения на нормалната експлоатация и аварийни състояния. За тази цел се усвоява програмата DYN 3D/M2 [16], предназначена за пресмятане на преходни и аварийни реактивностни процеси в активни зони с хексагонална геометрия. Структурата на програмата е дадена на фиг. 3. Програмата се състои от две части:

- модел на тримерна неутронна кинетика, който се основава на решаването на временозависимите двугруппови дифузионни уравнения чрез използване на нодален метод NEM;
- термохидравлична част, която включва моделиране на двуфазния поток на топлоносителя и поведението на ТОЕЛ и карта на режимите на толопренасяне. Тя е свързана с неутронната кинетика чрез неутронно-физичните константи (параметризирана зависимост от термохидравличните параметри).

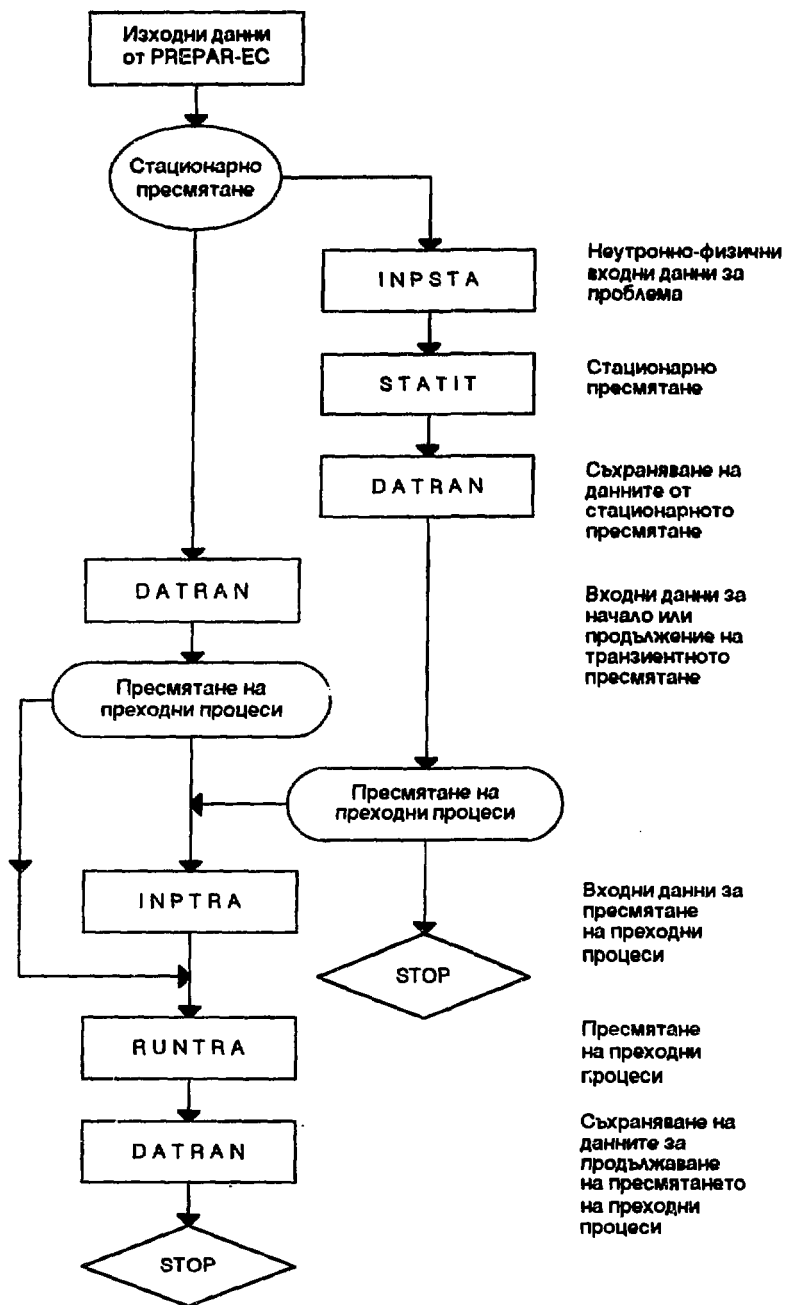
Малогрупповите дифузионни параметри и апроксимационните параметри за тяхната параметризация са подготвени като входни данни на отделен файл чрез програмата PREPAR-EC на основата на библиотеката MAGRU.

Програмата DYN 3D/M2 е верифицирана чрез сравнение с резултати от други програми и експериментални данни. Областта на приложение включва анализа на реактивностни преходни и аварийни процеси в активната зона, вследствие на: движение на единични органи или групи органи от СУЗ; изменение на входната температура на толоносителя; изменение на концентрацията на борната киселина и т.н.

Разширяването и осъвременяването на регламентиран набор от критерии и границите на тяхното изменение при избор на горивни зареждания на ВВЕР е свързано с дефинирането на необходимите неутронно-физически параметри като входни данни и основа за по-нататъшни анализи на безопасността. Това е особено актуално във връзка с използването на нови горивни технологии и промените в стратегиите за използване на ядреното гориво. За тази цел точността на пресмятаните неутронно-физически параметри и моделите, приложени в програмните системи трябва да бъдат анализирани и оценени. Наличието на този набор от лимитиращи параметри ще гарантира, че физичните процеси в активната зона с избрано горивно зареждане ще бъдат в рамките на предварителните анализи на безопасността.

Литература

1. Библиотека программ ВМК, София, 1989.
2. Askew, J.R., F.J. Fayers, F.B. Kernshell, J. Brit. Nucl. Energy Soc., 5-4:564, 1966.
3. В. Крысл, М. Леман, Я. Махачек, KFKI-ZR-6-551/1987.
4. А.Мюллер, Г. Агте, Р. Бекер, Г. Хайнрих, В. Меллер, З. Томас, KFKI-ZR-6-548/1987, Будапешт, 1987.
5. Т. Apostolov, K. Ivanov, R. Prodanova, G. Alekova, IAEA Res. Contract No.5598/R2/RB.
6. Т. Apostolov, K. Ivanov, R. Prodanova, IAEA-TECDOC-678, p.82, December, 1992.
7. Т.Г. Апостолов, К.Н. Иванов, М.А. Манолова, Р.И. Проданова, Ядерная энергия, 32 (в печат).
8. Т.Г. Апостолов, М.А. Манолова, К.Н. Иванов, KFKI-ZR-6-562/1989, Будапешт, 1989.
9. Р. Проданова, Т. Апостолов, Ядерная энергия, 28, стр.19, 1991.
10. K. Ivanov, T. Apostolov, M. Manolova, Nucl. Sci. Eng. (accepted to be published).
11. K. Ivanov, T. Apostolov, M. Manolova, RSIC Newsletter No.324, p.4, November 1991.



Фиг. 3. Структура на програмата DYN3D/M2

12. К.Н. Иванов, Т.Г. Апостолов и др., Ядерная энергия, 30, стр. 13-24, 1992.
13. K. Ivanov, M. Manolova, T. Apostolov, Proc. Conf. Math. Methods and Supercomputing in Nuclear Application, 19-23 April, 1993, Karlsruhe, Germany, Vol.1, p.620.
14. M. Manolova, Proc. ITM on Advances in Math., Computations and Reactor Physics, Pittsburgh, USA, Vol.2, p.6.1. 4-1, 1991.
15. R. Prodanova, T. Apostolov, K. Ivanov, IAEA Research Contract No.5599/R2/RB.
16. U. Grundman, U. Rohde, FZR 93-01, Rossendorf, 1993.

BE9300354

Комплекс от програми и данни за пресмятане на неутронния поток и неговите функционали в реакторни и защитни среди

К. Илиева, С. Белоусов, С. Антонов

Институт за ядрени изследвания и ядрена енергетика - БАН

Надеждното определяне на неутронния поток и функционалите му е важен и труден за решаване проблем, възникващ във всички задачи, свързани с реакторни и термоядрени системи. Причина за това са както сложността на изследваните среди (многослойни хетерогенни структури), така и техните размери (до 15-20 средни свободни пробега, т.е. задачи за дълбоко проникване). Адекватното моделиране на неутронния пренос се ограничава и от сложното взаимодействие на неутроните с веществото (което налага повече пресмятания с различни библиотеки входни данни), както и от ограничените възможности на изчислителната техника.

Неутронният пренос се описва от известното кинетично уравнение на Болцман:

$$\frac{1}{v} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \Phi(\mathbf{r}, E, \Omega, t) + \Omega \cdot \nabla \Phi(\mathbf{r}, E, \Omega, t) + \Sigma_t(\mathbf{r}, E) \cdot \Phi(\mathbf{r}, E, \Omega, t) = S(\mathbf{r}, E, \Omega, t) + \iint dE' d\Omega' \cdot \Sigma_s(\mathbf{r}, E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega) \cdot \Phi(\mathbf{r}, E', \Omega', t) \quad (1)$$

където: \mathbf{r} - радиус-векторът на взаимодействието; E - кинетичната енергия на неутрона (гама-кванта); v - скоростта, съответстваща на енергията; Ω - единичният вектор по посока на движението; t - променливата на времето; $\Phi(\mathbf{r}, E, \Omega, t)$ - времезависимият двойнодиференциален поток; $\Sigma_t(\mathbf{r}, E)$ - тоталното сечение на взаимодействие за частицата с енергия E , намиращата се в точка \mathbf{r} ; $\Sigma_s(\mathbf{r}, E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega) dE d\Omega$ - двойнодиференциалното сечение на разсейване; $S(\mathbf{r}, E, \Omega, t) dE d\Omega$ - частиците, излъчени от фиксиран източник в момента t с енергия $E \pm dE$ и посока $\Omega \pm d\Omega$ в същия единичен обем.

Величини като флуенс, биологична доза, радиационни повреждания, скорости на реакции и други, лесно се намират като функционали F на неутронния поток и съответната функция на отклик $P^\Phi(\mathbf{r}, E, \Omega, t)$:

$$F = \iiint P^\Phi(\mathbf{r}, E, \Omega, t) \Phi(\mathbf{r}, E, \Omega, t) d\mathbf{r} dE d\Omega dt \quad (2)$$

За решаване на уравнения (1) и (2) се използват различни числени методи, сред които най-широко приложение има метода на дискретни ординати и прякото моделиране по метод Монте Карло. Входните данни включват описание на геометрията на задачата и описание на свойствата на материалите, представено във вид на ефективни сечения на взаимодействие на ядрата с неутроните. Сеченията се извличат от съществуващите библиотеки от оценени данни като ENDF, ENDL, JENDL, FENDL и др., които се осъвре-