

КОМПЛЕКС ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ОПЕРАТОРА ВВР-ц. ОПЫТ СОЗДАНИЯ ПЕРВОЙ ВЕРСИИ

И.Н. Козиев*, О.Ю. Кочнов*, Е.С. Старизный*, Ю.В. Волков**

** Филиал ГНЦ РФ-НИФХИ им. Л.Я. Карпова, г. Обнинск*

*** Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск*



Обсуждается проблема повышения надежности работы реактора ВВР-ц. Показана возможность улучшения эксплуатации исследовательского реактора путем создания "Комплекса информационной поддержки оператора". Описаны основные принципы построения системы. Представлены результаты первого этапа решения проблемы.

ВВЕДЕНИЕ

Общепризнано, что роль оперативного персонала в обеспечении безопасности эксплуатации исследовательского ядерного реактора (ИЯР) как в случае нормальной эксплуатации, так и в аварийных ситуациях очень высока.

Важным направлением в повышении эффективности действий персонала является организация информационной поддержки оператора. При проектировании систем контроля и управляющих систем безопасности целесообразно оптимизировать ту информацию, которую получает оператор. Указанная информация должна быть минимально необходима для распознавания сложившейся ситуации и не приводить к стрессовым состояниям обилием сигналов [1].

Анализ существующих систем поддержки оператора [2,3] показал, что каждая из них является узконаправленной и приспособленной под конкретную установку. Перенос этих систем на реактор ВВР-ц НИФХИ им.Л.Я.Карпова [4] нерационален. Поэтому было решено создать для него комплекс информационной поддержки оператора (КИПО). Он должен включать в себя

- систему "советчик оператора";
- набор прикладных программ для оптимизации режимов работы реактора.

Система "советчик оператора" представляет собой набор разработанных методик и программ, позволяющих при снятии минимального набора данных с контролирующей аппаратуры оценить текущее состояние комплекса реактора и предсказать будущее состояние в основном и переходном режимах работы ИЯР и в аварийной ситуации. В ней учтены основные рекомендации, предъявляемые к подобным системам [5,6], а также разработанные авторами дополнительные требования.

Основная цель создания КИПО состояла в том, чтобы при аварийном заглушении ИЯР за счет автоматизации некоторых алгоритмизируемых диагностических операций снизить вероятность ошибки оператора при оценке ситуации, избавить его от отвлекающей работы, тем самым направив все его усилия на устранение

© И.Н. Козиев, О.Ю. Кочнов, Е.С. Старизный, Ю.В. Волков, 2000

неисправности. Таким образом минимизируется величина потерь выпускаемой продукции (например, радиофармпрепаратов - РФП), что приведет к ощутимому экономическому эффекту. Кроме того повышается безопасность эксплуатации установки.

Для того, чтобы наиболее эффективно представить текущую обстановку оператору, не отвлекая его на работу с терминалом, система снабжена речевым выводом сообщений, позволяющим получить необходимую информацию. Эта особенность полезна не только в случае аварийного заглушения реактора, но и в нормальном режиме работы, когда необходимо быстро привлечь внимание оператора к изменениям ситуации, не дожидаясь, пока он сам увидит сообщение на экране монитора.

Первая версия КИПО для реактора ВВР-ц находится в рабочем состоянии и постоянно подвергается модификациям и совершенствованию. При этом учитываются рекомендации (экспертные оценки) опытного сменного персонала. Важным фактором является то, что авторы комплекса сами работают на реакторе и на собственном опыте представляют особенности управления ИЯР и роль, которую может сыграть любая форма информационной поддержки оператора в случае аварийной ситуации.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пока ИЯР работает на заданном уровне мощности, роль старшего инженера управления реактором (СИУР) сводится к контролю за процессами, которые развиваются достаточно медленно. Однако, как только происходит срабатывание аварийной защиты, роль СИУРа резко возрастает. Необходимо разобраться в ситуации, устранить неисправность и после этого по возможности восстановить мощность реактора. Аварийное заглушение - редкая, нестандартная ситуация, характеризующаяся рядом особенностей:

- это всегда неожиданное событие, что вызывает определенный психологический стресс у СИУРа;
- за пультом управления реактором может оказаться один лишь СИУР, в то время как начальник смены и прочий сменный персонал может отсутствовать непосредственно на рабочих местах, находясь на текущих работах;
- имеется временное ограничение на действия СИУРа до попадания в "йодную яму", зависящее от предшествующего режима работы реактора.

Понятно, что в такой ситуации требуется поэтапное принятие единственно правильных решений. Время для принятия решений ограничено. В условиях психологического дискомфорта СИУРу не только важно грамотно оценить обстановку и принять правильные решения, но еще важнее не принять неправильных решений. Счет времени здесь идет на минуты, и опыт показывает, что без дополнительных средств временной и информационной избыточности не всегда можно справиться с задачей. Поэтому внедрение системы, которая в максимально короткий срок произведет правильную оценку истинного состояния некоторых важных параметров объекта и облегчит быстрое принятие правильного решения, окажется экономически оправданным.

ФУНКЦИИ КИПО

Создаваемый программный комплекс должен выполнять следующие функции

1. Оптимальное отображение текущего и предыдущего состояний основных параметров ИЯР.
2. Выдача сообщений (речью и на экране монитора) при приближении к зоне уставок, если ситуация будет развиваться без вмешательства СИУРа.

3. Расстановка по приоритетам и сообщение об аварийных и предупредительных сигналах (АС и ПС) речевым выводом в случаях аварийных заглушений, а также сообщение о неявном снятии ПС.

4. Расчет времени до попадания в “яму”, до подъема АЗ, стоянки в “яме” и представление результатов расчетов СИУРу в удобной форме.

5. Быстрое прогнозирование поведения ИЯР для того, чтобы СИУР мог переключить КИПО в любой момент времени в режим тренажера (без нарушения выполнения комплексом основных функций) и в ускоренном режиме времени увидеть результат развития процессов.

6. Обработка запросов о том, какое оборудование находится в работе в данный момент, и выработка с помощью встроенной экспертной системы совета по использованию элементов оборудования, которые можно включить или отключить для улучшения текущей ситуации.

7. Работа в качестве “черного ящика” с просмотром параметров и истории развития ситуации, фиксация времени срабатывания АЗ и подсчет энерговыработки (МВт·ч) с учетом изменения мощности.

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА КИПО

1. Комплекс используется только в режиме советчика и не вмешивается напрямую, автоматически, в процесс управления технологическим оборудованием реактора, не влияет на функционирование и не ухудшает характеристики СУЗ (системы управления и защиты) реактора.

2. Выполняя автоматически прогнозирование и избавляя оператора от отвлекающей работы при аварийных заглушениях и нестандартных ситуациях, КИПО ускоряет процесс принятия правильных решений.

3. КИПО расширяет каналы восприятия информации (дополняет зрительный канал оператора слуховым).

4. КИПО вычленяет из обилия сигналов при аварийном заглушении самые необходимые и доводит их в приоритетном порядке до СИУРа.

5. КИПО реализует максимально упрощенные математические модели, учитывающие минимальный набор физических эффектов реактора и в то же время достаточные для надежного прогнозирования состояния реактора.

6. КИПО разработан таким образом, что сбой компьютерной системы (аппаратный или программный) не должен приводить к нарушению нормальной эксплуатации или усугублять развитие аварийной ситуации.

7. КИПО разработан на основе инженерно-психологических требований, предъявляемых к информационным моделям, и требований, предъявляемых к рабочему месту оператора [5], например,

- графический вывод построен таким образом, чтобы не раздражать и не утомлять СИУР;
- необходимые элементы выделены цветом и интенсивностью;
- звуковому сообщению предшествует предупреждающий сигнал;
- речевая информация не отвлекает, не мешает выполнять основную задачу;
- сообщения носят информационно-рекомендательный характер.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КИПО

В настоящее время авторами разработан программный комплекс, ставший частью начального варианта КИПО (рис.1). Система представляет собой набор программ, разработанных для реактора ВВР-ц, набор датчиков, посредством которых система получает необходимую информацию, компьютер с устройством речевого

вывода информации. В состав КИПО кроме программы, работающей в режиме online, входят коды, с помощью которых возможно решать различные оптимизационные задачи для реактора ВВР-ц: по загрузке топлива, по режиму работы и т.д. Кроме того в состав комплекса включен набор программ, демонстрирующих в режиме тренажера базовые физические процессы ядерного реактора (отравление,

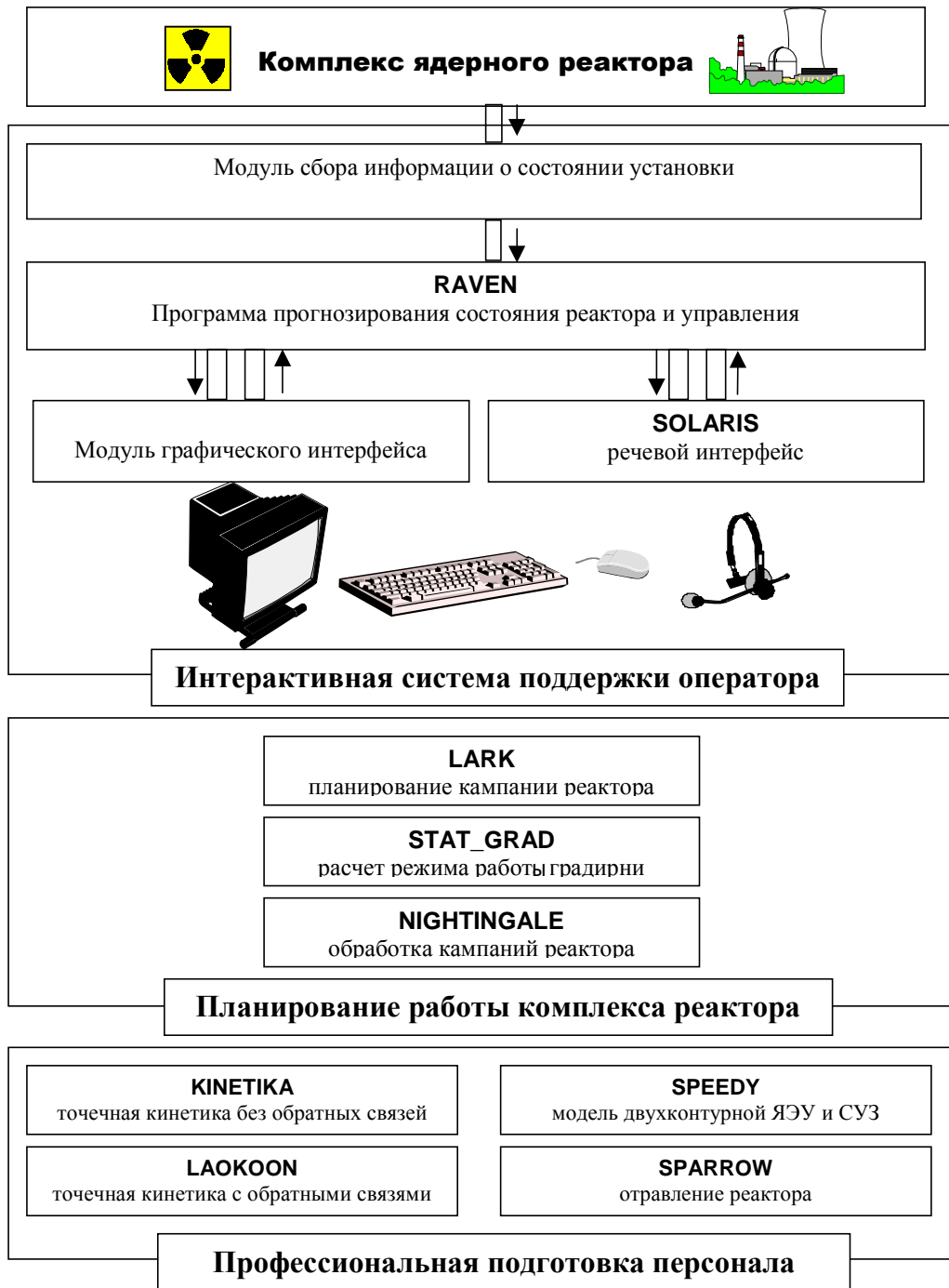


Рис.1. Схема комплекса информационной поддержки оператора

температурные эффекты, кинетика с учетом запаздывающих нейтронов). Все это позволяет повысить культуру безопасности и поддерживать на должном уровне квалификацию персонала, от которой зависит безаварийная работа ИЯР.

Ниже дается краткая характеристика программ.

1. Интерактивные программы поддержки оператора

RAVEN - в упрощенном виде реализует разработанную схему комплекса информационной поддержки оператора. Программа функционирует в двух режимах: 1) реального времени со считыванием состояния реактора через плату АЦП, подключаемую к штатной электронной аппаратуре СУЗ реактора ВВР-ц; 2) тренажера с задаваемым масштабом времени и управлением "мощностью" с клавиатуры. Программа содержит предельно упрощенные схемы расчета основных эффектов реактора (для решения систем дифференциальных уравнений используется метод Рунге-Кутты с постоянным шагом 3-го порядка [7]). Она была откалибрована по более точной программе LARK (см. далее). Этот код использует синтезатор речи из состава комплекса SOLARIS (см. далее) для опробования речевого способа представления информации, который будет в более развернутом виде реализован в следующей версии программы. Внешний вид графического интерфейса показан на рис. 2.

2. Программы для планирования работы реактора ВВР-ц

NIGHTINGALE - позволяет по экспериментальным значениям некоторых параметров реактора ВВР-ц получить константы для реализованной в SPARROW и LARK модели отравления. Из-за особого режима работы ИЯР ВВР-ц (недельный цикл работы, перегрузки ТВС раз в 1-2 недели, перегрузки облучаемых образцов) материальный состав активной зоны изменяется за несколько кампаний так, что рас-

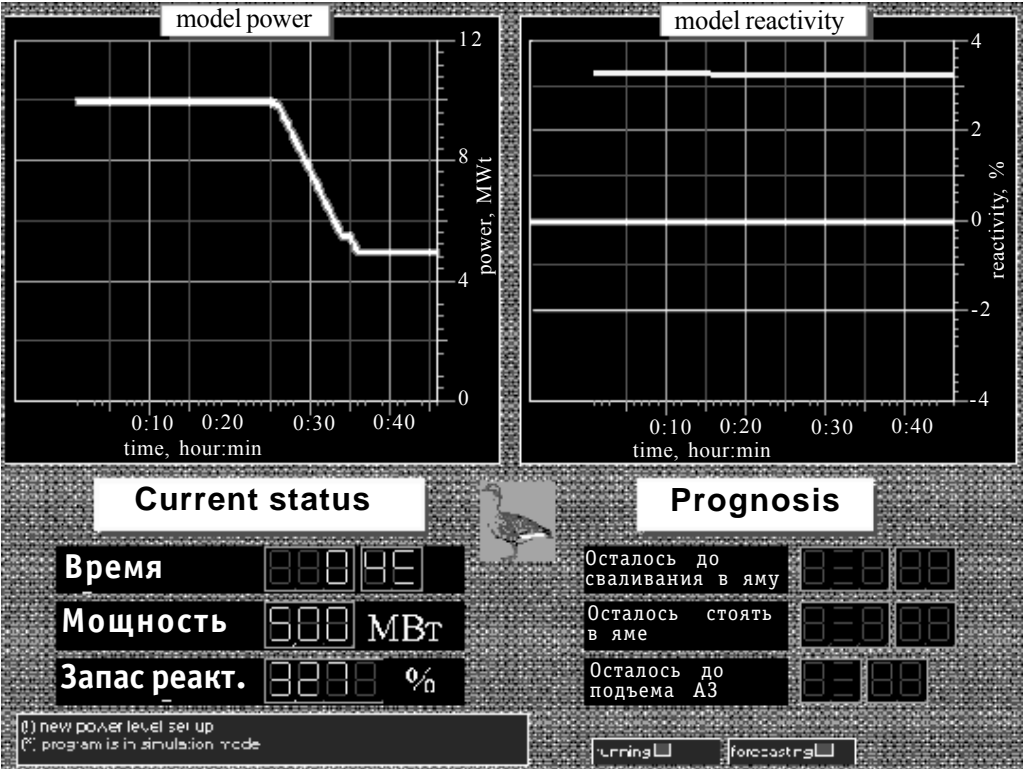


Рис. 2. Графический интерфейс программы RAVEN

чет хода запаса реактивности по константам, подобранным для некоторой начальной кампании, становится слишком неточным. Кроме этого, состояние теплообменников значительно меняется в течение года, потому что II контур реактора заполнен пожарно-хозяйственной водой. Следовательно, желательно время от времени выполнять уточнение констант для математической модели реактора, реализованной в программе LARK. Автоматизация такой подгонки выполняется программой NIGHTINGALE.

LARK - расчет нестационарных эффектов отравления и вычисление запаса реактивности реактора ВВР-ц для задаваемого в виде сценария графика изменения нейтронной мощности. Кроме отравления могут (по желанию пользователя) учитываться другие эффекты: мощностные, температурные, а также может выполняться теплофизический расчет. Программа позволяет прогнозировать динамику изменения запаса реактивности на конец кампании по известному начальному периоду работы (рис.3), вычислять остаточный запас реактивности на несколько последовательных кампаний с перегрузками топлива, прогнозировать время стоянки в йодной яме (рис. 4).

STAT_GRAD - расчет температуры воды II контура реактора ВВР-ц после охлаждения в градирне. Программа учитывает следующие параметры: температура и влажность окружающего воздуха, число включенных оросителей, температура воды II контура на входе в градирню. Программа использует для расчета аппроксимации, полученные в результате вычислений по разработанной авторами методике на основе подходов, представленных в [8]. В качестве примера в табл.1 приводятся расчетные и экспериментальные данные температуры воды в градирне.

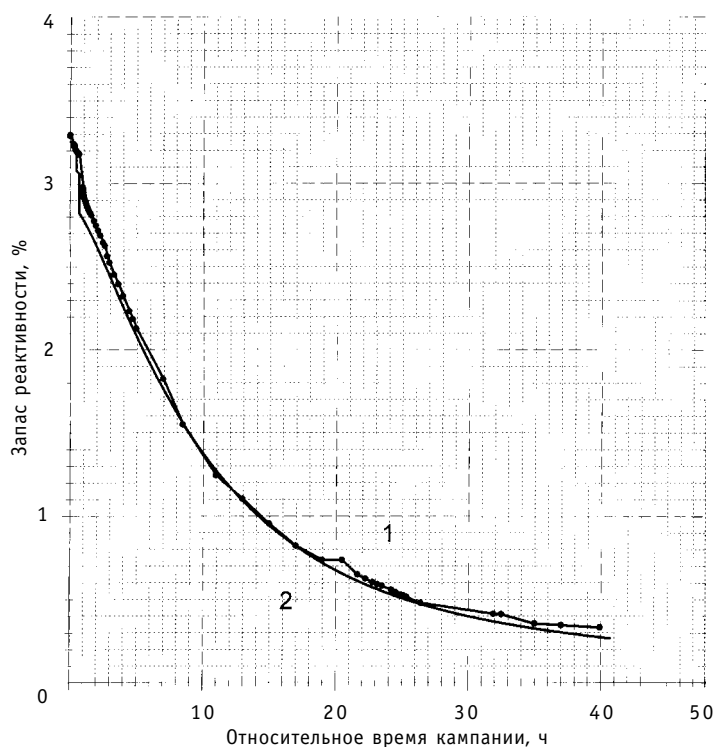


Рис. 3. Прогнозный расчет по программам NIGHTINGALE и LARK: показан реальный ход отравления в кампанию 13-15.05.99 г.(1) и расчет хода отравления по данным, полученным обработкой предыдущей кампании 01-04.05.99 г. (2)

3. Программы моделирования физических процессов в реакторе

SPARROW - рассчитывает в точечном приближении ход ксенонового отравления и соответствующей потери реактивности после мгновенного скачка мощности.

KINETIKA - решение уравнения обратных часов точечной кинетики реактора без обратных связей с произвольным числом групп запаздывающих нейтронов для описания динамики нейтронного потока после мгновенного изменения реактивности.

LAOKOON - решение системы дифференциальных уравнений то-

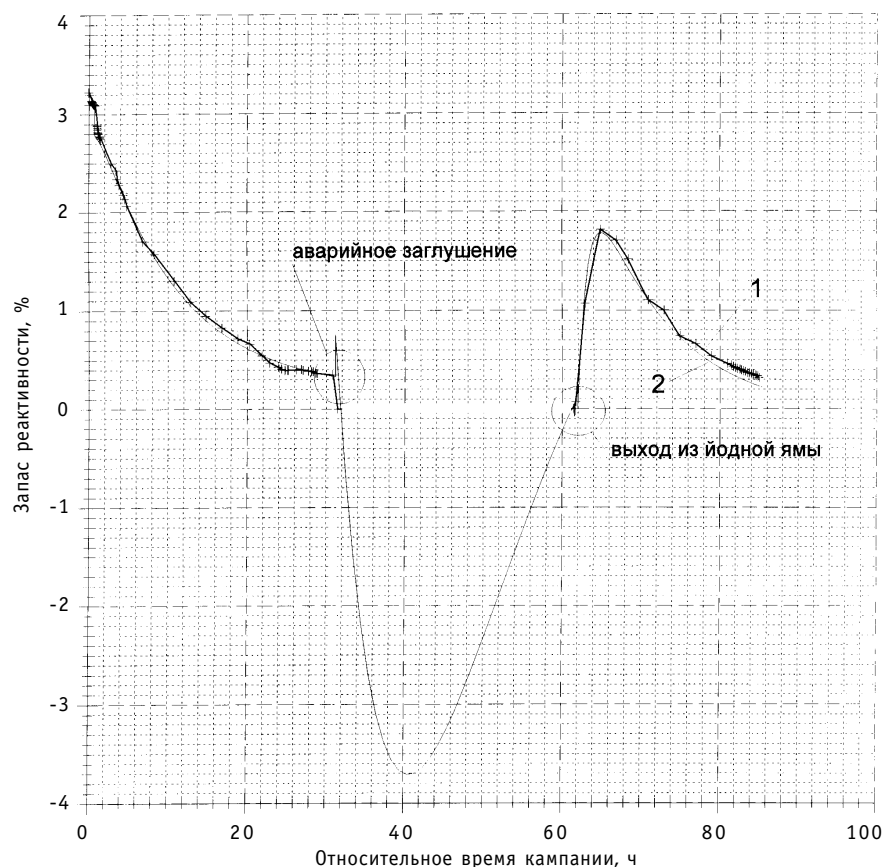


Рис. 4. Прогнозный расчет по программам LARK и NIGHTINGALE: сравнение экспериментального хода отравления реактора BVP-ц (1) с расчетной кривой по программе LARK (2) для кампании 05-09.05.99 г. с аварийным заглушением, стоянкой в йодной яме и подъемом мощности для дооблучения радиофармпрепаратов

ческой кинетики реактора без обратных связей с произвольным числом групп запаздывающих нейтронов при задаваемой форме изменения реактивности. Программа позволяет увидеть изменение нейтронного потока во времени при импульсном изменении реактивности (рис.5).

SPEEDY - моделирование реактора в приближении точечной кинетики с учетом обратных связей по топливу и теплоносителю (двухконтурная ЯЭУ); моделирование работы автоматических регуляторов мощности (рис.6). Результаты в целом правильно отражают работу автоматического регулятора мощности реактора.

4. Другие, используемые в комплексе, программные инструменты

SOLARIS – программная система для организации вербального интерфейса (речевой анализ и синтез) и программирования работы технологической установки (в частности, ядерного реактора или его программной модели) посредством команд на естественном языке, с клавиатуры или через микрофон.

СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Прогнозный расчет изменения запаса реактивности отличается от экспериментальных значений не более чем на 0.05% на конец недельного цикла работы реактора, что составляет около 15% (рис.3).

Расчет времени вынужденной стоянки в “йодной яме” после аварийного заглушения отличается от реального времени на 10 – 15 мин, что составляет менее 1% (рис.4).

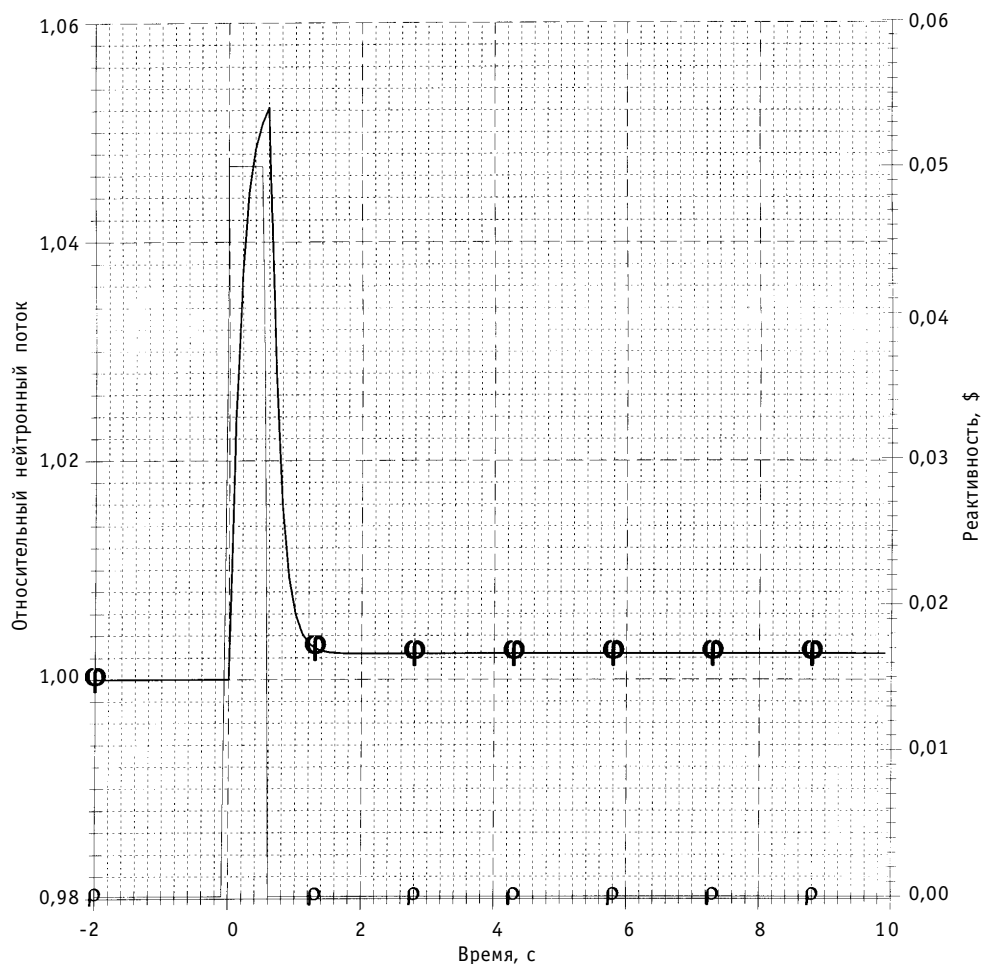


Рис. 5. Изменение нейтронного потока точечного реактора нулевой мощности без постороннего источника нейтронов при воздействии прямоугольного возмущения реактивности (программа LAOKOON)

Таблица 1

Результаты расчета температуры воды на выходе из градирни по программе STAT_GRAD и сравнение ее с экспериментальными данными. Представлены 7 недельных циклов работы реактора ВВР-ц

Температура на выходе из градирни (экспериментальная), °C	Температура на выходе из градирни (расчетная), °C
17	14.2
17	15.5
16	12.8
20	16.8
15	10.5
15	10.2
12	8.6

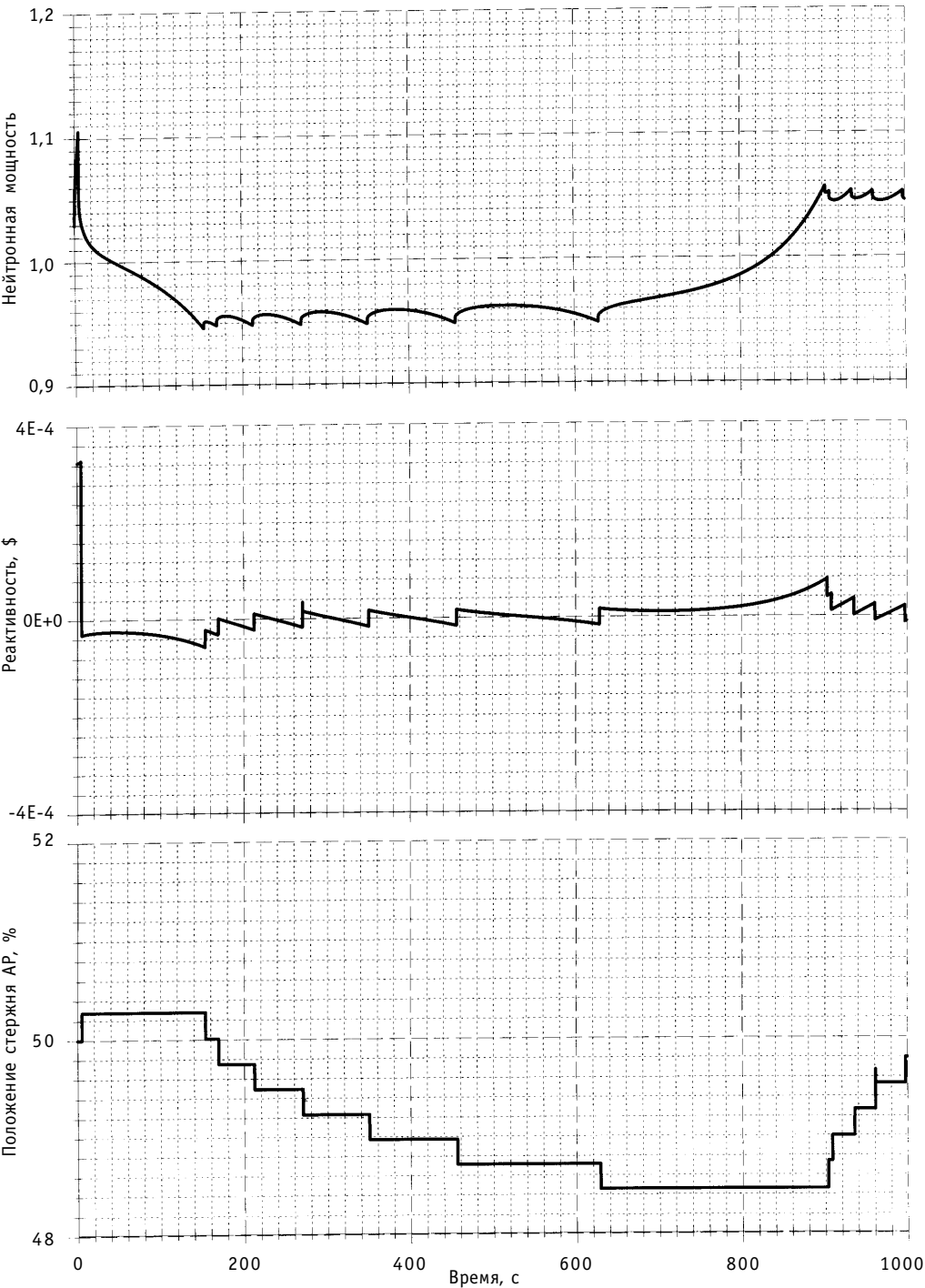


Рис. 6. Работа системы автоматического регулирования на реакторе после положительного импульса реактивности (результаты работы программы SPEEDY)

Рассчитанные значения температуры воды II контура на выходе из градирни отличаются от экспериментальных не более чем на 20% (табл.1). При одинаковых экспериментальных значениях различие расчетных температур объясняется различными температурами на входе в градирню, разной влажностью воздуха и т.д.

ВЫВОДЫ

Результаты экспериментальных проверок показали, что в большинстве случаев реализованные простейшие математические модели и примененные численные методы решения вполне достаточны для выполнения функций КИПО. При существующих погрешностях основная цель-выдача правильного совета - достигается. Время, затраченное на прогноз, достаточно мало.

ПЛАНЫ ДАЛЬНЕЙШИХ РАБОТ

1. Включение в КИПО дополнительных модулей, позволяющих повысить адекватность моделей реактору ВВР-ц.

2. Устранение недостатков, выявленных в ранних версиях: ускорение работы программы, повышение точности прогноза и т.д.

Кроме того, особое внимание разработчики уделяют вопросам надежности КИПО. Планируется, что следующий вариант КИПО сможет работать в многомашинной конфигурации с дублированием текущих расчетов, содержать средства автоматического восстановления комплекса после аппаратного или программного сбоя, выполнять периодическое самотестирование для того, чтобы выявить расхождение между результатами работы программ реального времени (с простыми численными методами) и более точных программ, входящих в КИПО.

Поскольку целью разработчиков является практическое использование КИПО на ядерном реакторе, то необходимым этапом будет верификация и аттестация комплекса для получения официального разрешения Госатомнадзора РФ на установку КИПО. После верификации и эксплуатационной обкатки комплекса возможно оснащение ИЯР ВВР-ц как системой в целом, так и отдельными ее компонентами, являющимися законченными программными продуктами.

Литература

1. Самойлов О.Б., Усынин Г.Б., Бахметьев А.М. Безопасность ядерных энергетических установок. - М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Федоров О.М., Аристов Б.Н. Учебно-тренировочный пункт Ровенской АЭС, опыт создания // Атомная энергия. - 1991. - Т.70. - Вып.6. - С.397-398.
3. Качалин В.А., Киселев А.В., Красько А.И. и др. Информационная система для двух исследовательских реакторов РБТ-10 // Атомная энергия. - 1985. - Т.58. - Вып.4. - С.271-272.
4. Моисеенко П.П., Карпов В.Л. В кн.: "Труды II Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Доклады советских ученых". Женева 1958 г. - М.: Атомиздат, 1959. - Т.2.
5. Смоляров А.М. Системы отображения информации и инженерная психология. - М.: Высшая школа, 1982.
6. Правила ядерной безопасности исследовательских реакторов (ПБЯИР-98). - М., 1998.
7. Данилин Б.И., Дубровская Н.С. и др. Численные методы: Учебник для техникумов. - М.: Высшая школа, 1976.
8. Андреев Е.И. Расчет тепло- и массообмена в контактных аппаратах. - М.: Энергоатомиздат, 1985.

Поступила в редакцию 20.11.99.

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.568.007.4

Classification of the Factors Influencing the Activity of Operating Personnel of NPPs \A.N. Anokhin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 9 pages, 4 tables. – References, 3 titles.

The paper describes a framework which can be followed when roots of NPP operator errors are evaluated. This framework includes particular classification of factors which influence upon NPP operating personnel performance. This classification incorporates 5 hierarchical levels and 82 factors grouped into 25 categories. To find the most important factors the expert study was carried out. 9 NPP operators participated in this study as experts. They were asked about three main problems in their shiftwork. As a result the following main factors were found: teamwork performance, emotional intensity, complexity of control tasks, and allocation of information in control room.

УДК 621.039.58

On a Qestion of Calculation of Reliability of athe System with Restricted Number of Spare Elements \A.V. Antonov, A.V. Plyaskin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 12 pages, 7 illustrations, 2 tables. – References, 8 titles.

The paper is devoted to the problem of calculation of reliability of systems with spare elements. Literature review of this problem is given. The method of finding out the failure probability of the system with the strategy of operation described by the non-stationary Markovian process is developed. The analytical expression of the failure probability for the stationary Markovian process is obtained in case of one spare element. The simplified method of the reliability calculation for this system is offered. The results of calculation for the control and protection system components of the Bilibino NPP are given.

УДК 681.3:002.513.5:621.039

Electronic Bibliographic System on Erosion of Wear of Equipment of Nuclear and Thermal Power Installations \K.V. Dergachev, A.V. Lagerev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 6 pages, 3 illustrations, 2 tables

The basic principles of design, structure and functional scheme of bibliographic system on erosion of wear of equipment of nuclear and thermal power installations are considered in this paper.

УДК 681.3:621.039.007

Information Support Complex of the VVR-c Operator. Experience of Creation of the First Version \I.N. Koziev, O.Yu. Kochnov, E.S. Stariznyi, Yu. V. Volkov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 10 pages, 6 illustrations, 1 table. – References, 8 titles.

The problem of raising of the reliability of VVR-c reactor functioning is considered. The possibility of improvement of exploitation of this reactor is shown by means of creation the "Complex of information support of the operator". The main principles of the system design are described. The results of the first stage of the solution of a problem represented.

УДК 51-72:621.039.002

Development of Optimization Model of a Nuclear Centre \P.E. Pereslavytzev, D. Sakhray; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 7 pages, 6 tables. – References, 7 titles.

Mathematical model of a nuclear center (NC) is considered. The economical parameter is chosen to be a criterion for calculation of optimal NC structure. Information on nuclear reactors fueled with traditional fuel as well as reactor plutonium is used. Results obtained approve the proposed model applicability for calculation of the structure of energy production NCs.