21.039.5
В74

ISSN 0205—4671

РОССИЙСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
"КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ"

ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ

СЕРИЯ:
Физика ядерных реакторов

99

ВЫПУСК
2

621.039.5
В74

РОССИЙСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР "КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ"

ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ

37957 ИФ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

СЕРИЯ

ФИЗИКА ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

ИЗДАЕТСЯ С 1989 г.

ВЫПУСК 2

ДИНАМИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

ИЗДАЕТСЯ С 1971 г.

МОСКВА — 1999

Институт Атомной Энергии
им. И. В. Курчатова
БИБЛИОТЕКА

Выпуски «Динамика и безопасность ядерных энергетических установок» подготавливаются НИИ механики Нижегородского государственного университета 603600, Нижний Новгород, ГСП-1000, проспект Гагарина, 23, к. 6

Редакционная коллегия серии:

А.Ю. Гагаринский (главный редактор),
С.М. Зарицкий (зам. главного редактора), В.Ф. Колесов,
С.Д. Малкин, В.П. Спасских, Т.П. Федосеева (отв. секретарь)

Редакционная коллегия выпуска:

А.М. Афанасьев, Д.И. Галеев, В.П. Горбунов, М.Х. Дорри, В.Н. Ефимов,
А.И. Колесников, А.Е. Крошилин, Э.С. Куропатенко,
М.П. Леончук, С.Д. Малкин (гл. редактор),
Б.И. Моторов, А.В. Певницкий, В.И. Плютинский, Л.Н. Подлазов,
В.В. Пчелин, Е.Ф. Сабаев, Л.В. Смирнов (зам. гл. редактора),
В.П. Спасских, Г.С. Таранов, Н.В. Щукин, К.И. Яковлев

В выпусках «Динамика ядерных энергетических установок» публикуются материалы по следующи вопросам:

— математическое моделирование динамических процессов в ЯЭУ и их элементах;
— результаты экспериментов по устойчивости стационарных процессов и обоснованию математически моделей динамики ЯЭУ;
— расчетные исследования переходных и аварийных процессов;
— расчетные исследования устойчивости стационарных режимов ЯЭУ;
— диагностика ЯЭУ;
— описания и аннотации программ расчетов динамики и экспериментальных исследований.

Issues of «Dynamics of nuclear power plants» contain the following information:

— mathematical simulation of dynamic processes in NPP and their components;
— experimental results on the stability of stationary processes and the definition of mathematical models o the NPP dynamics;
— design analysis of transient and emergency operation;
— design analysis of the stationary mode stability;
— NPP diagnostics;
— code descriptions and summaries for the dynamics designs and experimental studies.

© Российский научный центр «Курчатовский институт», 199

УДК 621.039

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ KOBRA РАСЧЕТА ДИНАМИКИ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

И.А. Моисеев, Д.И. Янушевич, С.В. Жигунов, А.Д. Зенков, С.Д. Малкин, А.В. Фокин, В.В. Шаля, РНЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Курчатова, 1

Представлен теоретический базис (физико-математическая модель и реализующий ее численный алгоритм) кода KOBRA, предназначенного для моделирования нестационарных процессов в произвольных теплогидравлических сетях с двухфазным пароводяным теплоносителем в термически неравновесном и механически негомогенном приближении. Код широко применяется в атомной энергетике для обоснования работоспособности и безопасности, включая исследования аварийных ситуаций, в том числе тяжелых, а также в качестве базового теплогидравлического кода тренажеров существующих и вновь проектируемых ядерных энергетических установок.

KOBRA COMPUTER CODE FOR THERMOHYDRAULIC NETWORK DYNAMIC CALCULATIONS. I.A. MOISEEV, D.I. YANUSHEVICH, S.V. ZHIGUNOV, A.D. ZENKOV, S.D. MALKIN, A.V. FOKIN, V.V. SHALIA. The KOBRA Computer code physical basis and numerical methods are represented. This code is developed to calculate two-phase coolant thermohydraulic network dynamics, with thermal non-equilibrium and mechanically non-homogeneous model being used. The KOBRA code is widely used for nuclear power plants engineering, safety and accident analysis. Also based upon this code are nuclear power plant simulators software.

ВВЕДЕНИЕ

Расчетный код KOBRA [1—5] предназначен для моделирования нестационарных процессов в произвольных теплогидравлических сетях с двухфазным пароводяным теплоносителем в термически неравновесном и механически негомогенном приближении.

При этом моделируемая теплогидравлическая сеть представляет собой в общем случае некоторое множество расчетных узлов и ребер. В свою очередь расчетный узел представляет собой некоторый объем сети, который может быть описан в приближении камеры смешения, а ребро в общем случае моделирует связь между расчетными узлами и физически представляет собой либо «точечное» соединение между расчетными узлами (точечное ребро), либо теплогидравлический канал, моделируемый в одномерном пространственном приближении (распределенное ребро).

Базис физико-математической модели кода KOBKA составляют:

— система четырех дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих законы сохранения для одномерных теплогидравлических каналов в составе моделируемой сети, а именно уравнений сохранения полной массы, полного импульса и полной энергии пароводяной смеси, а также уравнения сохранения энергии жидкой фазы теплоносителя;

— система обыкновенных дифференциальных уравнений сохранения массы, импульса и энергии пароводяной смеси для моделируемой теплогидравлической сети;

— одномерное нестационарное уравнение теплопроводности для расчетного сечения теплообменного оборудования с внутренним тепловыделением в общем случае;

— система замыкающих соотношений, включающая в себя уравнение состояния теплоносителя, соотношения для свойств материалов теплообменного оборудования, эмпирические корреляции для проскальзывания газообразной и жидкой фаз теплоно-

сителя, замыкающие соотношения по теплообмену для всех типов режимов теплообмена (конвекции, кипения, конденсации и закризисного теплообмена) и соотношения для расчета различных типов краевых условий.

Основным допущением используемой физико-математической модели является предположение о нахождении паровой фазы в двухфазном потоке на линии насыщения.

Внедрение программного модуля KOBRA. Программный модуль KOBRA используется в РНЦ «Курчатовский институт» и организациях Минатома (в частности, НИКИЭТ, ОКБМ, РФЯЦ, ВНИИЭФ, ЛАЭС) с 1988 г.

С 1988 г. KOBRA применяется для динамических исследований в обоснование работоспособности и безопасности (в том числе в условиях возникновения и развития тяжелых аварий) ЯЭУ с реактором водо-водяного типа, а также для выполнения расчетных исследований нестационарных, в том числе и аварийных, процессов в ЯЭУ с РБМК в трехмерном приближении в составе программного комплекса STEPAN/KOBRA [2—4].

С 1991 г. он является базовым расчетным кодом разработанного совместно с НИКИЭТ расчетно-моделирующего комплекса [5], предназначенного для исследований переходных, включая аварийные, режимов работы в обоснование работоспособности и безопасности ЯЭУ с реактором водо-водяного типа.

С 1992 г. программный модуль KOBRA используется совместно с трехмерным нестационарным нейтронно-физическим модулем NEU [6] в качестве базового теплогидравлического кода в составе программного комплекса READY [7—9], разработанного совместно с РФЯЦ ВНИИЭФ и предназначенного для исследований динамики, в том числе и в обоснование безопасности, ЯЭУ с реакторами водо-водяного типа в различных, включая трехмерное, приближениях.

С помощью программного модуля KOBRA выполнен целый ряд расчетно-теоретических исследований динамических режимов работы, включая исследования аварийных процессов в обоснование безопасности, ядерных энергоустановок с реакторами различного типа (не только РБМК, но также и ВВЭР), разрабатываемых в НИКИЭТ и ОКБМ [10—17].

Программный модуль KOBRA широко применялся также для анализа аварии на 4-м блоке Чернобыльской АЭС [18, 19].

С октября 1996 г., что соответствует началу эксплуатации полномасштабного тренажера третьего блока ЛАЭС в составе Учебно-тренировочного центра (УТЦ) ЛАЭС, программный модуль KOBRA используется в качестве базового теплогидравлического расчетного кода полномасштабного тренажера третьего блока ЛАЭС [20]. С его помощью осуществляется расчет теплогидравлических параметров наиболее ответственных и сложных для моделирования систем энергоблока, а именно КМПЦ, включая технологические каналы активной зоны реактора, и главных паропроводов, то есть трубопроводов подачи острого пара на турбины, СПП и трубопроводов сброса пара через быстродействующие редукционные установки и главные предохранительные клапаны (все вышеперечисленное оборудование в тренажере объединено системой Thermal Hydraulics).

Верификация программного модуля KOBRA. Как уже отмечалось, модуль KOBRA с момента своего создания в 1988 г. использовался для моделирования динамики, в том числе аварийных процессов при обосновании безопасности, ядерных энергоустановок различного типа (как с водо-водяными, так и с канальными водографитовыми реакторами). Это обстоятельство и определило наличие верификационного материала применительно к широкому спектру объектов моделирования.

И тем не менее весь имеющийся материал по верификации теплогидравлического модуля KOBRA можно условно разбить на семь частей:

— верификация используемых в модели и программе замыкающих соотношений и, в частности, зависимостей, связанных с негомогенным приближением [21, 22];

— верификация кода по результатам классических теплогидравлических тестов [2, 4];

— верификация по результатам экспериментальных исследований, выполненных на теплогидравлических стендах и моделирующих быстрые наброcы мощности в условиях протекания реактивностной аварии с изменением параметров теплоносителя в диапазоне от недогретой воды до перегретого пара, а также по результатам экспериментов на стенде КС, моделирующих аварии, связанные с разрывом напорного коллектора РБМК-1500 [4];

— верификация по результатам реакторных экспериментов на действующих энергоблоках и, в частности и главным образом, по зарегистрированным результатам чернобыльской аварии [4, 18, 19];

— верификация по результатам расчетов динамики с использованием широко применяемых в атомной энергетике кодов, и главным образом кода RELAP5 [4, 23, 24];

— верификация по результатам исследований, выполненных при проведении независимой экспертизы полномасштабного тренажера 3-го блока ЛАЭС ведущими специалистами НИКИЭТ — организации главного конструктора РБМК [25];

— верификация, выполненная на стадии комплексной отладки полномасштабного тренажера третьего блока ЛАЭС в рамках Acceptence Test Procedure [26—33].

Область применения и «технологическая ниша» программного модуля KOBRA. Здесь необходимо сказать следующее.

С одной стороны, сегодня мы имеем детальные коды, такие, как RELAP5 [34], физическую базу которых составляет система шести уравнений сохранения и, как следствие, большое количество эмпирических корреляций и замыкающих соотношений, связанных, в частности, с взаимодействием паровой и водяной фаз теплоносителя.

При этом большая часть этих соотношений получена применительно к одному типу реакторов и геометрии активной зоны. Применение же таких кодов к широкому классу ЯЭУ с различными типами «сильно отличающихся» друг от друга реакторов вызывает массу вопросов, связанных с неопределенностью по применимости тех или иных замыкающих соотношений. Суть этих вопросов сводится к возможной потере «заявленной» точности кода, так как в этом случае возможно нарушение принципа равноточности, в соответствии с которым все физические процессы должны моделироваться по возможности с одинаковой степенью подробности и точности. В случае же неопределенности тех или иных замыкающих соотношений и корреляций это условие не выполняется, что, как показано в работе [35], может существенно исказить, а то и просто дать неправильный результат расчета.

Другая проблема применения указанных выше кодов связана с вычислительными затратами, которые также находятся в прямой зависимости от заложенной точности и примененных численных методов. При этом в тех случаях, когда экономия вычислительных ресурсов актуальна, например в тренажеростроении при необходимости обеспечения реального масштаба времени, применение таких кодов неизбежно приводит к снижению степени детализации при моделировании и, следовательно, также к возможной частичной потере «заявленной» точности кода.

С другой стороны, имеем менее детальные коды, основанные на системе четырех уравнений сохранения, но в то же время обладающие значительно меньшей и, естественно, значительно легче устранимой при смене объекта моделирования степенью неопределенности. Одним из наиболее ярких представителей такого класса кодов является программа KOBRA, успешно зарекомендовавшая себя, как уже было показано выше, в широком спектре динамических исследований ЯЭУ различного типа и назначения — от исследований в обоснование работоспособности до исследований аварий (включая тяжелые) в обоснование безопасности ЯЭУ. Причем физико-математическая модель и реализующие ее численные методы, составляющие основу безытерационного алгоритма расчета, требуют значительно меньших вычислительных затрат и по сравнению с кодами типа RELAP5 позволяют существенно повысить степень детализации

при моделировании сложных энергетических объектов, что, в конечном счете, приводит к повышению точности моделирования в условиях, когда экономия вычислительных ресурсов необходима, например, в тренажерах, моделирование физических процессов в которых осуществляется в реальном масштабе времени.

Убедительнейшим аргументом в пользу кодов такого класса и наиболее «продвинутого» из них кода KOBRA в тренажеростроении является его успешное применение в качестве базовой теплогидравлической программы в самом сложном в мире с точки зрения моделирования полномасштабном тренажере — тренажере третьего блока ЛАЭС.

Последнее же утверждение, а также то обстоятельство, что KOBRA с момента своего создания обладает несомненным приоритетом (с точки зрения нестационарной теплогидравлики) в расчетно-теоретических исследованиях ЯЭУ с РБМК, позволяет использовать код в реперных моделях для ЯЭУ данного типа.

Таким образом, подводя итог сказанному, можно утверждать, что:

— код KOBRA сегодня является наиболее оптимальным для использования в качестве теплогидравлической базы моделирующих комплексов, предназначенных для исследований динамики и обоснования безопасности широкого класса объектов энергетики;

— KOBRA является наиболее «продвинутым» и, следовательно, наиболее предпочтительным для всего комплекса работ, связанных с моделированием нестационарных теплогидравлических процессов в ЯЭУ с реакторами типа РБМК.

В данной статье представлен теоретический базис кода KOBRA, а именно: физико-математическая модель и численный алгоритм ее реализации.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. ОБЪЕКТ МОДЕЛИРОВАНИЯ, ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ И ЗАМЫКАЮЩИЕ СООТНОШЕНИЯ

Объектом моделирования для модуля KOBRA является теплогидравлическая сеть, которая представляет собой в общем случае некоторое множество расчетных узлов и ребер.

Расчетный узел, как правило, представляет собой некоторый объем сети, который может быть описан в приближении камеры смешения.

Расчетное ребро в общем случае моделирует связь между расчетными узлами и физически представляет собой либо «точечное» соединение между расчетными узлами (точечное ребро), либо теплогидравлический канал, моделируемый в одномерном пространственном приближении (распределенное ребро). В дальнейшем изложении теплогидравлический канал и распределенное ребро следует понимать как эквивалентные понятия (термины).

Распределенное ребро (канал) может быть трех типов:

— свободное — ребро, ни один из концов которого не связан с узлами сети;

— связанное — ребро, оба конца которого связаны с узлами сети;

— полусвязанное — ребро, один конец которого связан с узлом сети, а другой нет.

Распределенное ребро представляет собой в общем случае последовательность участков ребра.

Участок ребра представляет собой группу (один или несколько) параллельных идентичных каналов с постоянным по ходу теплоносителя проходным сечением. Параллельные каналы следует понимать как несмешиваемые в поперечном сечении потоки теплоносителя. Таким образом, под параллельными идентичными каналами понимаются параллельные участки тракта теплоносителя, идентичные с точки зрения их геометрических размеров, а также теплофизических и гидравлических условий.

Каждый участок ребра, следовательно, и ребро в целом, кроме того, представляет собой множество расчетных ячеек ребра. Расчетная ячейка, разделяющая смежные участки ребра, является, с точки зрения ее математического моделирования, камерой смешения ребра. При этом смежные участки ребра могут и не быть разделенными камерой смешения, это обязательно лишь в тех случаях, когда смежные участки моделируют разное число параллельных идентичных каналов.

Точечное ребро в общем случае моделирует расход теплоносителя между узлами сети и физически представляет собой либо гидравлическое сопротивление, либо источник давления (один или несколько насосов) между узлами сети, моделирующими смежные участки тракта теплоносителя.

При определении понятия расчетного узла было сказано, что это, как правило, некоторый объем сети, который может быть описан в приближении камеры смешения. Кроме того, в модуле KOBRA реализована модель расчетного узла, который в дальнейшем будет называться бак. Модель бака предусматривает пространственное разделение жидкой и газообразной фаз теплоносителя. При этом бак может быть смежным только с точечными ребрами моделируемой теплогидравлической сети.

Еще одним элементом теплогидравлической сети, модель которого реализована в модуле KOBRA, является находящийся в потоке теплоносителя распределенного ребра цилиндрический (стержневой или кольцевой) теплообменный элемент с внутренним тепловыделением в общем случае и с пренебрежимо малыми осевыми перетечками тепла.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Базис модели динамики теплоносителя моделируемой теплогидравлической сети составляют:

— система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая законы сохранения массы, импульса и энергии для теплоносителя в одномерном канале, входящем в состав сети;

— система обыкновенных дифференциальных уравнений сохранения массы, импульса и энергии для сети в целом;

— система замыкающих соотношений.

Модель динамики теплоносителя в одномерном теплогидравлическом канале. Базовая система уравнений в частных производных, описывающая законы сохранения массы, импульса и энергии в гомогенном приближении для теплоносителя в одномерном канале может быть представлена в следующем виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{S}\frac{\partial G}{\partial x} = 0; \tag{1}$$

$$\frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\frac{G^2}{\rho S} = -S\frac{\partial P}{\partial x} + S\rho g_x - \xi\frac{G\cdot|G|}{\rho}; \tag{2}$$

$$S\frac{\partial \rho\cdot h}{\partial t} + \frac{\partial G\cdot R_v\cdot h}{\partial x} = Q\Pi_h; \tag{3}$$

$$R_v + \frac{(h-h')\cdot h''\cdot \nu_k - h'\cdot(h-h'')}{(h-h')\cdot h\cdot \nu_k - I\cdot(h-h'')};$$

$$\nu_k = \frac{\nu''}{\nu'}.$$

Здесь ρ — плотность теплоносителя, кг/м^3; G — расход теплоносителя, кг/с; S — площадь проходного сечения канала, м^2; P — давление теплоносителя, Па; h — энтальпия теплоносителя, Дж/кг; g_x — проекция ускорения свободного падения, м/с^2;

Q — поток тепла в теплоноситель, Вт/м^2; Π_h — обогреваемый периметр, м; ξ — приведенное гидравлическое сопротивление, м$^{-3}$; v — скорость теплоносителя (соответственно его паровой ('') и водяной (') фаз).

В неравновесной модели динамики теплоносителя вместо уравнения сохранения энергии для пароводяной смеси (3) используются уравнение сохранения полной энергии и уравнение сохранения для жидкой фазы теплоносителя следующего вида:

$$S\frac{\partial \rho \cdot h}{\partial t} + \frac{\partial G \cdot R_v \cdot h}{\partial x} = q - \rho \cdot S\left(\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{G}{S \cdot \rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x}\right); \quad (3.1)$$

$$\alpha' \cdot \rho' \cdot S \cdot \frac{\partial h'}{\partial t} + G \cdot \frac{\partial h'}{\partial x} = \overline{q}\left[\alpha' \cdot \rho' \cdot S\left(\frac{\partial P}{\partial t} + v' \cdot \frac{\partial P}{\partial x}\right)\right] + q_{\text{int}} - q_w; \quad (3.2)$$

$$\overline{q} = \begin{bmatrix} q,\ q>0 \text{ или } h \le h' \\ 0,\ q<0 \text{ и } h \ge h'' \end{bmatrix}.$$

Здесь q — полный тепловой поток на единицу длины канала; q_{int} — поток энергии на единицу длины за счет межфазного обмена в потоке; q_w — поток энергии на единицу длины за счет межфазного обмена на стенку канала. При выводе этих уравнений использовались усредненные по сечению параметры теплоносителя и предполагалось, что пар в потоке находится на линии насыщения. Не учитывалась также поправка в уравнении импульса на различную скорость фаз. При использовании в численном алгоритме в обоих уравнениях отбрасывался член, связанный с изменением кинетической энергии (вида $a \cdot (\partial P/\partial x)$), а член, связанный с работой сил давления (вида $b \cdot (\partial P/\partial t)$), может учитываться по ключу, задаваемому пользователем. Учет этого члена необходим при моделировании быстропротекающих процессов, но отрицательно сказывается на численной устойчивости алгоритма.

Основная проблема при решении вышеприведенной системы уравнений (1), (2), (3.1), (3.2) заключается в определении вида функции q_w и q_{int}.

В предлагаемом варианте используется зависимость, аналогичная формулам, применяемым в программе RELAP5/MOD2 [34].

$$q_{\text{int}} = \begin{bmatrix} K \cdot (h'_s - h') \cdot \left[1 + \dfrac{h'_s - h'}{r}\right], & h' < h'_s; \\ K \cdot (h'_s - h'), & h' > h'_s \end{bmatrix}$$

$$q_w = \begin{bmatrix} \Gamma_w \cdot (h''_s - h'), & \Gamma_w > 0 \\ \Gamma_w \cdot (h'_s - h'), & \Gamma_w < 0 \end{bmatrix},$$

где K — объемный коэффициент межфазного теплообмена, Γ_w — генерация или конденсация пара на стенках канала.

Модель динамики теплоносителя теплогидравлической сети в целом. В части моделирования теплогидравлической сети в целом система (1—3) дополняется системой обыкновенных дифференциальных уравнений сохранения массы, импульса и энергии для теплоносителя следующего вида:

$$V_i \frac{d\rho_i}{dt} = -\sum_j G_{ij} - G_i^{\text{ext}}; \quad (4)$$

$$\frac{dG_{ij}}{dt} = \frac{S_{ij}}{\Delta x_{ij}}(P_i - P_j + \Delta P_{\text{pump}}) - \xi_{ij}\frac{2G_{ij}|G_{ij}|}{\rho_i + \rho_j} + \frac{\rho_i + \rho_j}{2} g_x S_{ij}; \quad (5)$$

$$V_i \frac{d\rho_i h_i}{dt} = -\sum_j G_{ij} \begin{Bmatrix} h_i|_{G_{ij}>0} \\ h_j|_{G_{ij}<0} \end{Bmatrix} - G_i^{\text{ext}} \begin{Bmatrix} h_i|_{G>0} \\ h_j|_{G<0} \end{Bmatrix} + Q_i. \quad (6)$$

Здесь i — индекс текущего расчетного узла моделируемой сети; j — индекс узла, смежного с i-м узлом; ij — индекс соединения i-го и j-го узлов (ij-го точечного ребра сети); V_i — объем i-го узла, м^3; Δx_{ij}, S_{ij} — длина (м), проходное сечение (м^2) ij-го ребра сети; ξ_{ij} — условная величина приведенного к длине l и проходному сечению S коэффициента гидравлического сопротивления соединения i-го и j-го узлов; ΔP_{pump} — перепад давления (Па) от насосов (член уравнения импульса, учитывающий источник давления на ij-м ребре, то есть один или несколько последовательно включенных насосов); G^{ext} — внешний расход (кг/с) ($G^{\text{ext}}>0$, если направлен из узла); Q_i — член в уравнении энергии, учитывающий приток энергии (кВт) в расчетный узел.

При этом уравнение для ΔP_{pump} имеет следующий вид:

$$\frac{\Delta P_{\text{pump}}}{\Delta P_{\text{nom}}} = \begin{cases} -A\cdot G^2 - BG + C, & G>0 \\ (A+E)\cdot G^2 + C, & G<0 \end{cases},$$

где ΔP_{nom} — номинальный напор насоса; A, B, C, E — коэффициенты, зависящие от скорости $\eta = \omega/\omega_{\text{nom}}$ насоса:

$$A = A_0;\ B = B_0\cdot\eta;\ C = C_0\cdot\eta^2;\ E = E_0\cdot\eta^2.$$

В том случае, когда расчетный узел моделируемой сети является баком, то есть узел, в котором необходимо учесть пространственное разделение жидкой и газообразной фаз теплоносителя, уравнение энергии (6) примет следующий вид:

$$V_i\frac{d\rho_i h_i}{dt} = -\sum_j G_{ij}\begin{Bmatrix} h_i|_{G>0} \\ h_j|_{G<0} \end{Bmatrix} - \sum_{j_s}\delta_{ij}G_{ij}\begin{Bmatrix} x_{ij}h_i^s|_{G>0} \\ h_j|_{G<0} \end{Bmatrix} - \sum_{j_s}\delta_{ji}G_{ij}\begin{Bmatrix} h_i|_{G>0} \\ x_{ij}h_j^s|_{G<0} \end{Bmatrix} -$$

$$- \sum_{j_w}\delta_{ij}G_{ij}\begin{Bmatrix} x_{ij}h_i^w|_{G>0} \\ h_j|_{G<0} \end{Bmatrix} - \sum_{j_w}\delta_{ji}G_{ij}\begin{Bmatrix} h_i|_{G>0} \\ x_{ij}h_j^w|_{G<0} \end{Bmatrix} - G_{\text{ext}}\begin{Bmatrix} h_i|_{G>0} \\ h_{\text{ext}}|_{G<0} \end{Bmatrix} + Q_i, \qquad (6.1)$$

где j — индекс смежного с i-м узла сети, для которого ij-е ребро моделирует расход теплоносителя с энтальпией h_i или h_j (в зависимости от направления вектора расхода G_{ij}); j_s — индекс смежного с i-м узла сети, для которого ij-е ребро моделирует расход теплоносителя с энтальпией $h_i^s = xh_i''$ или h_j (в зависимости от направления вектора расхода G_{ij}); j_w — индекс смежного с i-м узла сети, для которого ij-е ребро моделирует расход теплоносителя с энтальпией $h_i^w = xh_i'$ или h_j (в зависимости от направления вектора расхода G_{ij}); x — задаваемая в исходных данных константа для ij-го ребра; δ_{ij} — величина, связанная с направлением ij-го ребра (если ребро направлено из узла i в узел j, то $\delta_{ij} = 1$, $\delta_{ji} = 0$; если же из j в i, то $\delta_{ij} = 0$, $\delta_{ji} = 1$).

Основные замыкающие соотношения модели динамики теплоносителя. Для замыкания рассмотренной системы уравнений необходимо задать краевые и начальные условия, уравнение состояния и ряд замыкающих соотношений, связанных с неравновесной моделью двухфазного потока теплоносителя в одномерных каналах моделируемой сети.

Уравнение состояния теплоносителя в общем виде может быть представлено в следующей форме:

$$\rho = f(P, h). \qquad (7)$$

В случае гомогенного приближения при работе в двухфазной области используем формулы для гомогенного пароводяного потока:

$$\rho = \rho' + \varphi \cdot (\rho'' - \rho');$$
$$\rho \cdot h' = \rho' \cdot h' = \varphi \cdot (\rho'' \cdot h'' - \rho' \cdot h'),$$

где φ — объемное паросодержание; индексы $'$ (штрих) и $''$ (2 штриха) относятся к состоянию насыщения воды и пара соответственно.

Из этих соотношений легко получить уравнение состояния в виде:

$$\rho = \frac{f_1(P)}{f_2(P) \cdot h + f_3(P)};$$
$$f_1 = \rho' \cdot \rho'' \cdot (h' - h'');$$
$$f_2 = \rho'' - \rho';$$
$$f_3 = \rho' \cdot h' - \rho'' \cdot h''. \qquad (8)$$

В случае неравновесного приближения при работе в двухфазной области используются соотношения:

$$\rho = f(P, I');$$
$$\rho = \rho' + \alpha'' \cdot (\rho_s'' - \rho');$$
$$\rho \cdot I = \rho' \cdot I' + \alpha'' \cdot (\rho_s'' \cdot I_s'' - \rho' \cdot I'); \qquad (9)$$
$$\alpha' + \alpha'' = 1,$$

где индекс $'$ относится к жидкой фазе, а индекс s — к линии насыщения. При этом пар предполагается на линии насыщения, а для воды используется обычное уравнение состояния, но экстраполированное в область перегрева.

Замыкающие соотношения для модели неравновесного кипения и скольжения фаз теплоносителя. В предлагаемой методике для системы уравнений (1), (2), (3.1), (3.2) скольжение фаз в пароводяном потоке учитывается на основе эмпирических замыкающих соотношений [36].

Для необогреваемых каналов (труба и кольцевые щели):

$$v_k = v_1 \cdot K_\alpha;$$
$$v_1 = 1 + 2{,}54 \cdot d_\Gamma^{0{,}25} \cdot \rho_s' \cdot \left(1 - \frac{P}{P_{\text{kp}}}\right) \cdot \frac{S}{G};$$
$$K_\alpha = 1 + (1 - 5 \cdot 10^{-6} \cdot \text{Re}_s') \cdot (1 - \alpha/90),$$

где d_Γ — гидравлический диаметр; Re_s' — число Рейнольдса; α — угол наклона канала к горизонту.

Для обогреваемых участков канала:

$$v_k = 1 + (0{,}6 + 1{,}5 \cdot \beta^2) \cdot (1 - P/P_{\text{kp}}) Fr^{-0{,}25};$$

где β — объемное расходное паросодержание;

$$Fr = \frac{G^2}{\rho_s'^2 \cdot S^2 \cdot g \cdot d_\Gamma}.$$

Для генерации или конденсации пара на стенках канала Γ_w используется формула [34]:

$$\Gamma_w = \begin{cases} (\overline{q} - q_c) \cdot S/r, & \Gamma_w > 0, \\ (-\overline{q}) \cdot S/r, & \Gamma_w < 0, \end{cases}$$

где q_c — конвективная часть полного теплового потока $\overline{q}$.

Для межфазного теплообмена K используется:

$$K = \begin{cases} 10^{12}, h' > h'_s, \\ H \cdot V, h' < h'_s, \end{cases}$$

где V — объем расчетной ячейки;

$$H = \frac{3 \cdot \Phi \cdot C \cdot r \cdot \alpha''}{\left(\frac{1}{\rho''_s} - \frac{1}{\rho'}\right) c'_p};$$

$$\Phi = \begin{cases} 1, \nu' < 0{,}61, \\ (1{,}639 \cdot \nu')^{0{,}47}, \nu' > 0{,}61; \end{cases}$$

$$C = \begin{cases} 61 - 6{,}489 \cdot 10^{-5} \cdot (P - 1{,}7 \cdot 10^5), P < 10^6 \text{ Па}, \\ 2{,}3 \cdot 10^9 / P^{1{,}418}, P > 10^6 \text{ Па}. \end{cases}$$

Остальные не оговоренные здесь обозначения соответствуют представленным в (1), (2), (3.1), (3.2).

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В теплогидравлическом модуле KOBRA реализована модель теплообменного оборудования, помещенного в поток теплоносителя моделируемых одномерных каналов. Это оборудование должно быть представимо в виде набора цилиндрических элементов и, кроме того, необходимо учесть, что осевыми перетечками тепла модель пренебрегает.

Если же в расчетных исследованиях необходимо учесть оборудование, не удовлетворяющее указанным выше требованиям, то для него необходимы собственные математические модели и их программная реализация со сшивкой с моделью динамики теплоносителя по тепловым потокам.

Базис модели динамики теплообменного оборудования в составе моделируемой теплогидравлической сети составляют:

— одномерное нестационарное уравнение теплопроводности для расчетного сечения теплообменного элемента (с внутренним тепловыделением в общем случае);

— замыкающие соотношения на поверхностях теплообмена.

Модель динамики теплообменного элемента. Основу модели динамики теплообменного элемента составляет одномерное нестационарное уравнение теплопроводности для расчетного сечения:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + q_v, \tag{10}$$

где T — температура теплообменного элемента; c — теплоемкость, Дж/(кг·град); ρ — плотность, кг/м^3; λ — теплопроводность, Вт/(м·град); q_V — объемная мощность тепловыделения, Вт/м^3.

В качестве граничных условий для более общего случая теплообменного элемента кольцевого сечения используются следующие:

$$\begin{aligned} q_1 &= \alpha_1 (T_1 - T_{\text{ср1}}); \\ q_2 &= \alpha_2 (T_2 - T_{\text{ср2}}), \end{aligned} \tag{11}$$

где $T_{\text{ср1}}$ и $T_{\text{ср2}}$ — температуры теплоносителя, омывающего внутреннюю и внешнюю поверхности теплообмена соответственно; T_1 и T_2 — температуры внутренней и внешней поверхностей теплообмена соответственно; α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи на внутренней и внешней поверхностях теплообмена соответственно, Вт/(м^2·град);

q_1 и q_2 — тепловые потоки в теплоноситель на внутренней и внешней поверхностях теплообмена соответственно, Вт/м^2.

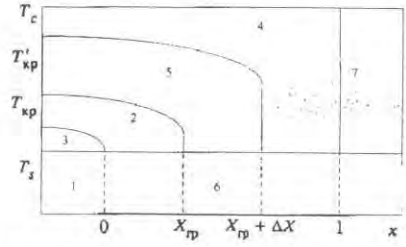
Учитывая пропорциональность тепловых потоков производным температур по нормали к поверхностям, граничные условия для внутренней и внешней поверхностей теплообмена можно записать в виде

$$\partial T/\partial r = \alpha_1(T_1 - T_{ср1})/\lambda_1; \qquad (11')$$
$$\partial T/\partial r = -\alpha_2(T_2 - T_{ср2})/\lambda_2,$$

где λ_1 и λ_2 — теплопроводности материалов внутренней и внешней поверхностей теплообмена соответственно, Вт/(м·град).

Для случая цилиндрического стержня внутреннее граничное условие (отсутствие теплового потока на оси стержня) имеет вид

$$\partial T/\partial r = 0.$$



Карта режимов теплообмена в модуле KOBRA: x — массовое паросодержание; T_s — температура насыщения; $T_{кр}$ — температура, соответствующая критической плотности теплового потока $q_{кр}$; $T'_{кр} = T_{кр} + 50$ °С; 1 — область некипящей воды; 2 — область развитого кипения; 3 — область, в которой интенсивность теплоотдачи определяется как однофазной конвекцией жидкости, так и процессом парообразования; 4 — закризисная область; 5 — область, для которой вычисление коэффициента теплоотдачи производится с помощью линейной интерполяции для непрерывного перехода из 2-й в 4-ю области; 6 — область конденсации; 7 — область перегретого пара.

Основные замыкающие соотношения модели динамики теплообменного оборудования. Основными замыкающими соотношениями модели динамики теплообменного оборудования являются соотношения для коэффициента теплоотдачи на поверхностях теплообмена. В общем случае коэффициент теплоотдачи может быть представлен в виде

$$\alpha = q(T_c, \Omega),$$

где T_c — температура поверхности теплообмена; Ω — геометрические параметры, которые не изменяются в ходе расчетов и параметры теплоносителя, которые хотя и изменяются, но могут быть аппроксимированы в разностной схеме явно, то есть с предыдущего шага по времени, и это не нарушит устойчивости схемы.

Для нахождения коэффициентов теплоотдачи используется реализованная в модуле KOBRA карта режимов теплообмена, схематично представленная на рисунке.

Конкретные зависимости для вычисления коэффициентов теплоотдачи соответствуют рекомендациям, изложенным в многочисленных работах по теплообмену и, в частности, в работе [36].

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

С точки зрения численной реализации предложенной модели динамики теплоносителя теплогидравлической сети на каждом временном расчетном шаге решаются две задачи:

— тепловая, которая сводится к вычислению значений энтальпии в расчетных точках сети с учетом найденных на предыдущем временном слое давлений, плотностей и расходов, а также тепловых потоков моделируемого теплообменного оборудования;

— гидродинамическая, которая сводится к определению значений давлений, плотностей и расходов с учетом найденных в тепловой части значений энтальпий.

Тепловая задача. Для одномерного теплогидравлического канала моделируемой сети решение тепловой задачи сводится к разностной аппроксимации уравнений (1),

(3) сохранения массы и энергии соответственно, последующим преобразованиям и решению полученной системы линейных алгебраических уравнений. Разностные аналоги уравнений (1), (3) имеют следующий вид:

$$V_n \frac{\rho_n^{k+1} - \rho_n^k}{\Delta t} = N_n^{\text{in}} G_{n-1/2}^k - N_n^{\text{out}} G_{n+1/2}^k; \qquad (1')$$

$$V_n \frac{\rho_n^{k+1} h_n^{k+1} - \rho_n^k h_n^k}{\Delta t} = N_n^{\text{in}} R_{v,n-1/2}^k G_{n-1/2}^k \begin{bmatrix} h_{n-1}^{k+1} \\ h_n^{k+1} \end{bmatrix} - N_n^{\text{out}} R_{v,n+1/2}^k G_{n+1/2}^k \begin{bmatrix} h_n^{k+1} \\ h_{n+1}^{k+1} \end{bmatrix} + q_n^k S_n^{\text{heat}}. \qquad (2')$$

Здесь N_n^{in} — число параллельных идентичных каналов на входе в n-ю ячейку ребра; N_n^{out} — число параллельных идентичных каналов на выходе из n-й ячейки ребра; q_n^k — поток тепла на единицу площади теплообмена для n-й ячейки, Вт/м^2; S_n^k — площадь теплообмена, м^2.

Система (1′), (3′) после несложных преобразований сводится к системе алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей, для решения которой используется метод немонотонной прогонки [37].

Для узла моделируемой сети разностные аналоги уравнений (4), (6) сохранения соответственно массы и энергии имеют вид

$$V_i \frac{\rho_i^{k+1} - \rho_i^k}{\Delta t} = -\sum_j G_{ij}^k - G_{\text{ext}}^{k+1}; \qquad (4')$$

$$V_i \frac{\rho_i^{k+1} h_i^{k+1} - \rho_i^k h_i^k}{\Delta t} = -\sum_j G_{ij}^k \begin{Bmatrix} h_i^{k+1}|_{G>0} \\ h_j^{k+1}|_{G<0} \end{Bmatrix} - G_{\text{ext}}^{k+1} \begin{Bmatrix} h_i^{k+1}|_{G>0} \\ h_{\text{ext}}^{k+1}|_{G<0} \end{Bmatrix} + Q_i^{k+1}. \qquad (6')$$

При этом система (4′), (6′) записана применительно к системе связанных точечных ребер. В случае же смешанной системы, то есть системы связанных ребер, как точечных, так и распределенных, индекс j в (4′), (6′) означает индекс граничного расхода для смежного с i-м узлом распределенного ребра.

Гидродинамическая задача. Для одномерного теплогидравлического канала моделируемой сети решение гидродинамической задачи сводится к разностной аппроксимации уравнений (1), (2) сохранения массы и импульса соответственно, последующим преобразованиям и решению полученной системы линейных алгебраических уравнений. Разностные аналоги уравнений (1), (2) имеют следующий вид:

$$V_n \frac{\rho_n^{k+1} - \rho_n^k}{\tau} = N_n^{\text{in}} G_{n-1/2}^k - N_n^{\text{out}} G_{n+1/2}^{k+1}; \qquad (1'')$$

$$\frac{G_{n+1/2}^{k+1} - G_{n+1/2}^k}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta x_{n+1/2} \cdot S_{n+1/2}} \left(\frac{G_{n+1}^k}{\rho_{n+1}^k} \cdot G_{n+1}^{k+1} - \frac{G_{n+1}^k}{\rho_n^k} \cdot G_n^{k+1} \right) =$$

$$= \frac{S_{n+1/2}}{\Delta x_{n+1/2}} (P_n^{k+1} - P_{n+1}^{k+1}) - \xi_{n+1/2}^k \cdot \frac{|G_{n+1/2}^k|}{\rho_{n+1/2}^k} \cdot G_{n+1/2}^{k+1} - g \cdot S_{n+1/2} \cdot \rho_{n+1/2}^{k+1} \sin\alpha, \qquad (2')$$

где $V_n = \Delta x_n S_{n+1/2}$; $\Delta x_{n+1/2} = (\Delta x_n + \Delta x_{n+1})/2$; $\rho_{n+1/2} = (\rho_n + \rho_{n+1})/2$; $G_n = (G_{n-1/2} + G_{n+1/2})/2$.

При этом разностные уравнения, аппроксимирующие уравнения сохранения массы и импульса (1''), (2′) записаны в неявной форме, поэтому для избежания итерационной процедуры на временном шаге используется линеаризация плотности по давлению при заданной (найденной ранее) энтальпии:

$$\rho_n^{k+1} = \rho(h_n^{k+1}, P_n^{k+1}) = \rho(h_n^{k+1}, P_n^k) + \frac{\partial \rho}{\partial P}\bigg|_h (P_n^{k+1} - P_n^k),$$

где производная берется при постоянной энтальпии $h = h_n^{k+1}$.

С учетом последнего уравнения после несложных преобразований система (1") (2′) сводится к системе алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей, для решения которой используется метод немонотонной прогонки [37].

Для системы связанных узлов моделируемой сети разностные аналоги уравнений (4), (5) сохранения соответственно массы и импульса имеют вид:

$$V_i \frac{\rho_i^{k+1} - \rho_i^k}{\Delta t} = - G_{\text{ext}}^{k+1} - \sum_j G_{ij}^{k+1}; \qquad (4")$$

$$\frac{G_{ij}^{k+1} - G_{ij}^k}{\Delta t} = \frac{S_{ij}}{\Delta x_{ij}} = (P_i^{k+1} - P_j^{k+1} + \Delta P_{\text{pump}}^{k+1}) - \xi_{ij}^k \cdot \frac{2|G_{ij}^k|}{\rho_i^k + \rho_j^k} \cdot G_{ij}^{k+1} + \frac{\rho_i^k + \rho_j^k}{2} g_x S_{ij}. \qquad (5')$$

Используя (4"), (5′), а также процедуру линеаризации плотности в узле по давлению при заданной (найденной ранее) энтальпии

$$\rho_i^{k+1} = \rho(h_i^{k+1}, P_i^{k+1}) = \rho(h_i^{k+1}, P_i^k) + (P_i^{k+1} - P_i^k) \frac{\partial \rho}{\partial P}\bigg|_{h^{k+1}},$$

получаем систему линейных алгебраических уравнений относительно давлений в узлах, матричная форма которой имеет следующий вид:

$$BP = g.$$

При этом все рассуждения здесь проводились применительно к системе связанных точечных ребер. Нетрудно также показать, что форма итоговой системы линейных уравнений относительно давлений в узлах не меняется и в случае смешанной системы, то есть системы связанных ребер, как точечных, так и распределенных. Просто в случае смежного с i-м узлом распределенного ребра индекс j в разностном уравнении (4") означает индекс его границы, а вместо уравнения (5′) используются выражения для граничных расходов гидродинамической задачи для одномерного канала.

ВОПРОСЫ ЧИСЛЕННОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ С УЧЕТОМ НЕРАВНОВЕСНОГО КИПЕНИЯ

При численном решении базовой системы уравнений (1), (2), (3.1), (3.2) используется следующий алгоритм.

Разностный аналог уравнения энергии для жидкой фазы в данном случае имеет вид

$$\frac{V_n \alpha_n'^k S_n'^k \rho_n'^k}{\tau} \cdot (h_n'^{k+1} - h_n'^k) = \sum_{1 \in M} |G_1'^k| \cdot (h_1'^{k+1} - h_n'^k) + q_n^k \cdot S_n + \overline{Q}_{\text{int}_n} - \overline{Q}_{W_n}, \qquad (3.2')$$

где M — множество ячеек разбиения, из которых в ячейку 1 втекает соответствующий расход;

$$\overline{Q}_{\text{int}_n} = \begin{bmatrix} \delta_n^1, & h_n^{k+1} > h_{S_n}'^k, \\ \delta_n^2, & h_n^{k+1} < h_{S_n}'^k; \end{bmatrix}$$

$$\delta_n^1 = \begin{bmatrix} K_n \cdot (h_{S_n}'^k - h_n'^{k+1}) \cdot \left[1 + \dfrac{h_{S_n}'^k - h_n'^k}{n_n^k}\right], & h_n'^k < h_{S_n}'^k, \\ K_n \cdot (h_{S_n}'^k - h_n'^{k+1}), & h_n'^k > h_{S_n}'^k; \end{bmatrix}$$

$$\overline{Q}_{W_n} = \begin{cases} \Gamma^k_{W_n} \cdot (h'^k_{S_n} - h'^k_n), \Gamma^k_{W_n} > 0, \\ \Gamma^k_{W_n} \cdot (h'^k_{S_n} - h'^k_n), \Gamma^k_{W_n} < 0; \end{cases}$$

$$\delta^2_n = K_n (h^k_{s,n} - h'^k_n) \left(1 + \frac{h^k_{s,n} - h'^k_n}{r}\right) \cdot \frac{h^{k+1}_n - h'^{k+1}_n}{h^{k+1}_n - h'^k_n}.$$

Из решения данной системы (для чего используется метод немонотонной прогонки) определяются значения $h'^{k+1}_{S_n}$, $n \in N$ (N — множество ячеек разбиения канала). Получение распределения давлений и расходов на $(k+1)$-м временном слое требует нахождения производной

$$\left.\frac{\partial \rho}{\partial P}\right|_{h=h^{k+1}_n,\ h'=h'^{k+1}},$$

которая остается постоянной в интервале $P_i < P < P_{i+1}$; $P_i \in Z$, где Z — сетка разбиения давлений при аппроксимации уравнения состояния воды и водяного пара, используемая при расчете теплофизических свойств. В предлагаемом алгоритме при вычислении плотности для заданных значений P и I производится пересчет значений плотности в узлах прямоугольной сетки разбиения в области базовых переменных (P, I) с использованием реального уравнения (9) в случае недогретой воды в пароводяном потоке. При этом для получения значений и в узлах сетки по давлению используется зависимость, полученная из стационарного уравнения энергии для жидкой фазы при замораживании относительно изменений давления членов, связанных с обменом энергией со стенкой:

$$\left.\frac{\sum \partial h'}{\partial P}\right|_{h'=h'^{k+1}} = \frac{\left.\frac{\sum \partial h'_S}{\partial P}\right|_{P=P^k}}{1 + \frac{\sum\limits_{i \in M} |G'^k_i|}{K \cdot \left[1 + \frac{h'^k_S - h'^k}{r^k}\right]}}.$$

ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Для аппроксимации уравнения теплопроводности (10) используется интегральная форма уравнения сохранения энергии в цилиндрической системе координат. Итоговое разностное уравнение для i-й цилиндрической ячейки разбиения поперечного сечения элемента имеет следующий неявный вид:

$$c^k_i \rho^k_i V_i \frac{T^{k+1}_i - T^k_i}{\Delta t} = -\lambda^k_{i-1/2} S_{i-1/2} \frac{T^{k+1}_i - T^{k+1}_{i-1}}{r_i - r_{i-1}} + \lambda^k_{i+1/2} S_{i+1/2} \frac{T^{k+1}_{i+1} - T^{k+1}_i}{r_{i+1} - r_i} + q^{k+1}_i V_i, \quad (10')$$

где V_i — объем i-й цилиндрической ячейки; $S_{i \pm 1/2}$ — площадь границы i-й и $(i \pm 1)$-й ячеек; r_i — радиус i-й ячейки.

Уравнение (10′) связывает температуры T^{n+1} в трех соседних ячейках:

$$a_i T_{i+1} + b_i T_i + c_i T_{i-1} = g_i. \quad (10'')$$

При этом $|b_i| > |a_i| + |c_i|$, то есть достаточное условие применимости метода прогонки [37, 38] выполнено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Моисеев И.А., Бабайцев М.Н., Жигунов С.В. и др.** Программный модуль КОБРА динамического расчета теплогидравлических сетей. Физико-математическая модель. Отчет РНЦ «Курчатовский институт», инв. № 42/29 от 30.12.98, 1998.
2. **Краюшкин А.В., Токаренко В.Ф. и др.** Трехмерная нейтронно-теплогидравлическая модель и программа для исследования быстрых нестационарных процессов в РБМК. Отчет РНЦ «Курчатовский институт», инв. № 33Р/1-282-88, 1998.
3. **Краюшкин А.В., Бабайцев М.Н., Шаля В.В. и др.** Программа STEPAN/КОБРА для трехмерных нейтронно-теплогидравлических расчетов нестационарных процессов в реакторах РБМК. Отчет РНЦ «Курчатовский институт», инв. № 33-16/28 от 30.09.97, 1997.
4. **Краюшкин А.В., Афанасьева А.А., Шаля В.В. и др.** Верификационный отчет. Программа STEPAN/КОБРА для нестационарных трехмерных нейтронно-теплогидравлических расчетов РБМК. Отчет РНЦ «Курчатовский институт», инв. № 33-16/52 от 25.12.97, 1997.
5. **Гаджинов А.М., Галкин В.В., Жигунов С.В. и др.** Расчетно-моделирующий комплекс. Руководство пользователя. Отчет РНЦ «Курчатовский институт», инв. № 31.2/1-1625-91, 1991.
6. **Сухих А.С. и др.** Программа динамического расчета диффузии нейтронов NEU. — В кн.: Докл. семинара «Нейтроника-92. Алгоритмы и программы для нейтронно-физических расчетов ядерных реакторов». Обнинск, 27—29 октября 1992 г. — Обнинск, 1994, с. 107—110.
7. **Тарасов В.А. и др.** Программный комплекс READY для расчетов динамических процессов в реакторных установках. — ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 1994, вып. 1, с. 8—10.
8. **Тарасов В.А. и др.** Программный комплекс READY для расчетов динамических процессов в реакторных установках. — В кн.: Докл. семинара «Нейтроника-92. Алгоритмы и программы для нейтронно-физических расчетов ядерных реакторов». Обнинск, 27—29 октября 1992 г. — Обнинск, 1994, с. 103—106.
9. **Певницкий А.В., Гаджинов А.М., Зенков А.Д. и др.** Математическая модель программного комплекса READY-OD расчета динамики реакторных установок водо-водяного типа. Отчет РФЯЦ ВНИИЭФ, РНЦ «Курчатовский институт», инв. № 01/33 нс, 1993.
10. **Певницкий А.В., Гаджинов А.М., Жигунов С.В., Зенков А.Д. и др.** Расчетный анализ гипотетических реактивностных аварий в реакторе ВПБЭР-600. — Отчет ВНИИЭФ, инв. № 01/1113, 1991.
11. **Певницкий А.В., Гаджинов А.М., Жигунов С.В., Зенков А.Д. и др.** Расчетный анализ аварийных режимов для реакторной установки ВПБЭР-600. Отчет ВНИИЭФ, РНЦ «Курчатовский институт», инв. № 7/92-01, 1992.
12. **Жигунов С.В., Гаджинов А.М., Зенков А.Д. и др.** Расчетный анализ аварии реакторной установки ВПБЭР-600. — ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 1994, вып. 1, с. 14—15.
13. **Зенков А.Д., Гаджинов А.М., Жигунов С.В. и др.** Расчетный анализ аварии реакторной установки ВПБЭР-600, связанной с несанкционированным извлечением 12 рядом расположенных регулирующих органов. — Там же, с. 15—17.
14. **Гаджинов А.М., Жигунов С.В., Зенков А.Д. и др.** Анализ аварийных режимов при отрыве крышки реакторной установки ВПБЭР-6000. — Там же, с. 17—18.
15. **Певницкий А.В., Гаджинов А.М., Зенков А.Д. и др.** Расчет аварий РУ ВПБЭР-600. Отчет РФЯЦ ВНИИЭФ, РНЦ «Курчатовский институт», инв. № 01/32 нс, 1993.
16. **Певницкий А.В., Гаджинов А.М., Зенков А.Д. и др.** Расчет аварий при несанкционированном извлечении компенсирующих групп из активной зоны реактора КЛТ, АБВ. Отчет РФЯЦ ВНИИЭФ, РНЦ «Курчатовский институт», инв. № 01/34 нс, 1993.
17. **Куштан В.В., Гаджинов А.М., Зенков А.Д. и др.** Расчетные исследования аварийных режимов в реакторной установке ВПБЭР-600 с помощью программного комплекса READY-PV-3D/ВПБЭР. — В кн.: Тез. докладов. Секция динамики НТС МАЭ РФ «Математическое моделирование физических процессов в АЗ реактора. Опыт верификации программ динамики». — РФЯЦ ВНИИТФ, Челябинская обл., 1993.
18. **Афанасьева А.А., Бабайцев М.Н., Давыдова Г.Б.** Расчетные исследования I фазы аварии на 4-м энергоблоке ЧАЭС. Отчет ОЯР РНЦ «Курчатовский институт», инв. № 33Р/1-1640-91, 1991.
19. **Babaytchev M.N., Burlakov E.V., Krayushkin A.V., Malkin S.D., Shalia V.V., Ianushevich D.I.** Fill-scale 3-dimensional analysis of the Chernobyl accident. — In: 1994 RELAP5 International Users Seminar. — USA, Baltimore, Maryland, 1994.
20. **Preliminary** design specification. LNPP Simulator. Thermal hydraulics. — GP Internation Engineering & Simulation, Inc., LNPP-PDS-TH-00, 1994.
21. **Khabensky V.B. Malkin S.D., Shalia V.V. et al.** Comparative analysis of RBMK core channel void fraction determined by RELAP5, KOBRA, and a new drift flux correlation. — Nucl. Eng. Design, 1997, p. 119—127.
22. **Khabensky V.B., Malkin S.D. et al.** Comparative analysis of RBMK core channel void fraction determined by RELAP5, KOBRA, and a new drift flux correlation. — In: 1994 RELAP5 International Users Seminar. — USA, Baltimore, Maryland, 1994.

23. Fedosov A., Fedorov V., Ianouchevitch D., Zen-Yow Wang et al. A comparison of KOBRA2 and RELAP5/MOD3 results for a RBMK reactor single channel flow rate decrease incident 1994 RELAP5 international users seminar. — Ibid.
24. Fedosov A.M. et al. Single channel flow-rate decrease analysis in RBMK reactors. — In: BNES/ENS international conference on thermal reactor safety assessment. — Manchester, UK, 1994.
25. Экспертное заключение по результатам обследования качества воспроизводимых физических процессов в энергоблоках второй очереди ЛАЭС в полномасштабном тренажере ЛАЭС. Отчет НИКИЭТ, инв. № Е140-2767, 1997.
26. Acceptence test procedure. Том 1. Пуск реактора. GP International & Simulation, Inc., РНЦ «Курчатовский институт».
27. Acceptence test procedure. Том 2. Пуск блока. — Ibid.
28. Acceptence test procedure. Том 3. Останов реактора. — Ibid.
29. Acceptence test procedure. Том 4. Останов блока. — Ibid.
30. Acceptence test procedure. Том 5. AZ-5. — Ibid.
31. Acceptence test procedure. Том 6. AZ-2. — Ibid.
32. Acceptence test procedure. Том 7. AZ-1. — Ibid.
33. Acceptence test procedure. Том 8. Malfunctions. — Ibid.
34. Victor H., Ranson et al. RELAP5/MOD2 code manual volume 1: Code system models and solution methods, 1985.
35. Малкин С.Д., Филин Р.Д. Особенности математического моделирования пространственных эффектов в ядерных реакторах. — ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1984, вып. 2(39), с. 29—33.
36. Кирилов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). — М.: Энергоиздат, 1984.
37. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. — М.: Наука, 1978.
38. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. — М.: Наука, 1989.

Статья поступила в редакцию 25 февраля 1999 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Физика ядерных реакторов, 1999, вып. 2, с. 3—17.

37957 ИФ

УДК 621.039:531.3

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС, РЕАЛИЗОВАННАЯ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ РАДУГА-ЭУ

О.Ю. Кавун, Институт Атомэнергопроект, 107815, Москва, Бакунинская ул., д. 7

Разработана методика и комплекс программ для полномасштабного моделирования динамики энергоблока АЭС с ВВЭР РАДУГА-ЭУ. Приведено описание математических моделей, реализованных в комплексе, а также структуры и возможностей программного комплекса (ПК) РАДУГА-ЭУ.

METHODOLOGY FOR NPP UNIT TRANSIENT SIMULATION, RELEASED IN CODE COMPLEX RAINBOW-NPP. O.Yu. KAVUN. Methodology and code complex RAINBOW-NPP for full-scale NPP unit transient simulation gas been developed. RAINBOW-NPP code complex mathematical models, structure and its features is described.

НАЗНАЧЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА РАДУГА-ЭУ

В институте Атомэнергопроект разработан и отлажен ПК для полномасштабного моделирования динамики энергоблока АЭС с ВВЭР РАДУГА-ЭУ. В состав ПК РАДУГА-ЭУ входят:

— ПК динамики реакторной установки РАДУГА-5, аттестованный Госатомнадзором РФ (аттестационный паспорт № 62) [1];

— ПК для моделирования динамики турбоустановок ТРР [2];

Институт Атомной Энергии
им. И. В. Курчатова
БИБЛИОТЕКА

— ПК, используемый для моделирования АСУ ТП энергоблока, «Моделирование в технических устройствах» (МВТУ), зарегистрированный в общероссийском реестре программ для ЭВМ [3].

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА

Реакторная установка моделируется по ПК РАДУГА [4, 5].

Активная зона реактора типа ВВЭР моделируется в трехмерном двухгрупповом покассетном приближении. Программа позволяет моделировать в покассетном приближении полную зону как реактора ВВЭР-1000 (163 кассеты), так и полную зону реактора ВВЭР-440 (349 кассет).

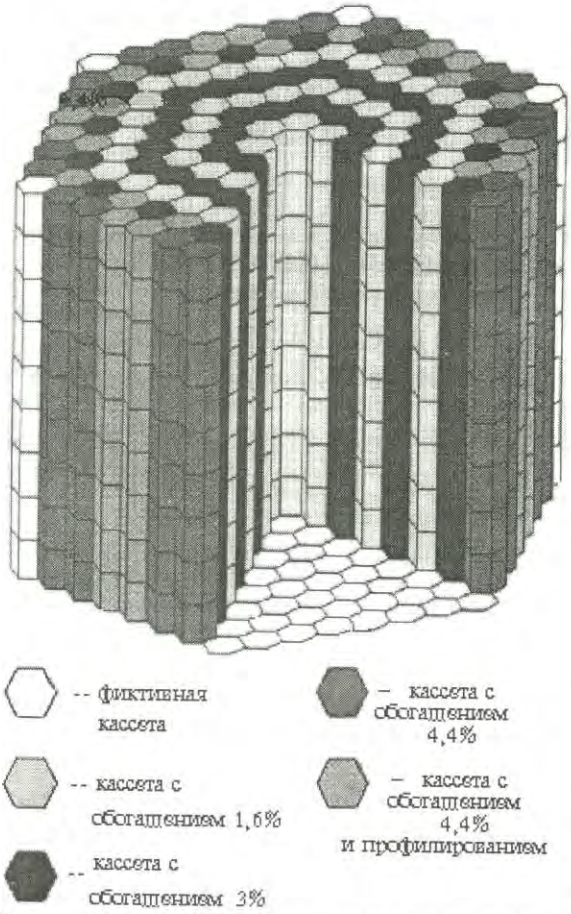
Расчетная схема активной зоны реактора представлена на рис. 1.

Уравнение кинетики в общем виде в диффузионном приближении для тепловой группы имеет вид

$$\frac{1}{V_2}\frac{dF_2}{dt} = \nabla\left(D_2\nabla(F_2)\right) + \Sigma_{\text{зам}}F_1 - \Sigma_{a2}F_2.$$

Для быстрой группы

$$\frac{1}{V_1}\frac{dF_1}{dt} = \nabla\left(D_1\nabla(F_1)\right) + \Psi(1-\beta) + \sum_{i=1}^{n}\lambda_i C_i - (\Sigma_{\text{зам}} + \Sigma_{a1})F_1,$$



Р и с. 1. Расчетная схема активной зоны реактора ВВЭР-1000

где F — поток нейтронов; V — скорость нейтронов; D — коэффициент диффузии; $\Psi = \nu_{f1}\Sigma_{f1}F_1 + \nu_{f2}\Sigma_{f2}F_2$ — источник нейтронов; ν_f — выход нейтронов на акт деления; Σ_f — сечение деления; λ — постоянная распада источников запаздывающих нейтронов; $\beta = \sum_{i=1}^{n}\beta_i$ — доля запаздывающих нейтронов; C — концентрация источников запаздывающих нейтронов; $\Sigma_{\text{зам}}$ — сечение замедления; Σ_a — сечение поглощения.

Уравнение для запаздывающих нейтронов: $\frac{dC_1}{dt} = \beta_i\Psi - \lambda_i C_i$.

В ПК РАДУГА-ЭУ реализовано две расчетные нейтронно-физические модели: с одним расчетным узлом на кассету в поперечном сечении активной зоны (эта модель входит в аттестованную версию ПК РАДУГА-5 [1]) и с семью расчетными узлами в поперечном сечении кассеты (эта версия программы называется РАДУГА-7).

Расчетный шаблон представлен на рис. 2. Узлы на расчетном шаблоне находятся в центрах соседних кассет.

Рассмотрим поле потока нейтронов на границе между кассетами с различными коэффициентами диффузии (рис. 3).

Запишем условие сшивки токов нейтронов на границе:

$$D\frac{dF}{dX}\bigg|_{\text{г}} = D_{i+1}\frac{dF_{i+1}}{dX}\bigg|_{\text{г}},$$

где $F_{\text{г}}$ — значение потока на границе.

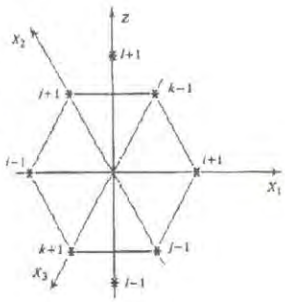
Тогда можем записать в разностном виде

$$D\frac{F_{\text{г}} - F}{H/2} = D_{i+1}\frac{F_{i+1} - F_{\text{г}}}{H/2},$$

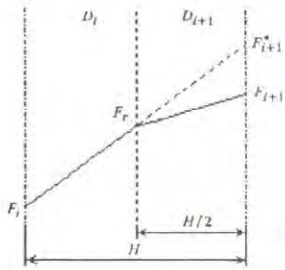
откуда $F_{\text{г}} = \dfrac{F_{i+1}D_{i+1} + F\cdot D}{D_{i+1} + D}$; $F^*_{i+1} = F + \dfrac{dF}{dX}H = F +$

$+ 2\dfrac{F_{\text{г}} - F}{H}H = 2F_{\text{г}} - F$, где $F^*_{i+1} = \dfrac{2F_{i+1}D_{i+1} + F(D - D_{i+1})}{D_{i+1} + D}$ —

«изображение» потока нейтронов в соседней кассете.



Р и с. 2. Расчетный шаблон



Р и с. 3. Поле потока нейтронов на границе между кассетами

УСРЕДНЕНИЕ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ

В правой части уравнения кинетики при переходе к разностному выражению следует корректно учесть источник $\Psi = \nu_{f1}\Sigma_{f1}F_1 + \nu_{f2}\Sigma_{f2}F_2$ и сток нейтронов $S = \Sigma_{\text{ув}}F$.

В пределах шага разностной сетки справедливы выражения:

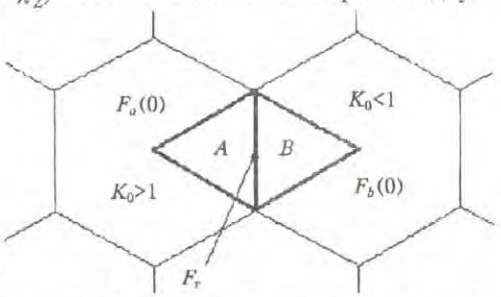
$$\overline{\Psi} = \frac{\int\Psi(x)dx}{S};\ \overline{S} = \frac{\int S(x)dx}{S}.$$

Для определения характера функции, в виде которой следует искать распределение потока нейтронов в пределах ячейки, рассмотрим задачу о двух соседних треугольных областях, принадлежащих соседним кассетам, контактирующих между собой, изолированных в азимутальном направлении и имеющих общий коэффициент размножения, равный единице (рис. 4).

Пусть в области A $K_0>1$, тогда $\Delta F + \chi_1^2 F = 0$; в области B $K_0<1$, тогда $\Delta F - \chi_2^2 F = 0$, $F_a(R) = A_1 J_0(R\chi_1)$; $F_b(R) = A_2 I_0(R\chi_2)$. Воспользовавшись первыми двумя членами разложения функций Бесселя, $J_0(x) = 1 - \dfrac{x^2}{4}$; $I_0(x) = 1 + \dfrac{x^2}{4}$ получим

$$F_{\text{г}} = F_b(0)\cdot(1 + \chi_2^2 R^2) = \frac{F_a(0) + F_b(0)}{2}.$$

Данному результату соответствует также предположение о кубической зависимости потока в пределах шага сетки и граничного условия:

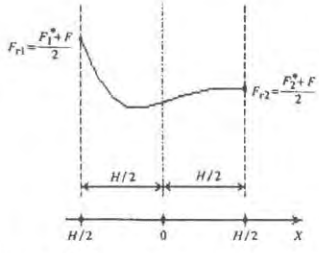


Р и с. 4. Треугольные области соседних кассет для определения характера функции распределения потока нейтронов в пределах ячейки

$$\left.\frac{dF}{dX}\right|_{x=a} = \left.\frac{dF}{dX}\right|_{x=b}.$$

Поскольку разложение функции потока нейтронов на первые два члена ряда является аппроксимацией потока полиномом второго порядка, не нарушая точности результатов, можно аппроксимировать поток нейтронов в пределах всей ячейки полиномом второго порядка в соответствии с рис. 5:

$$f = ax^2 + bx + c;\ F(-h/2) = F_{r1};\ F(0) = F;\ F(h/2) = F_{r2}.$$



Р и с. 5. Аппроксимация потока нейтронов полиномом второго порядка

Средний по ячейке поток нейтронов определяется из выражения

$$\bar{f} = \frac{\int_{-h/2}^{h/2} f(x)\,|x|\,dx}{\int_{-h/2}^{h/2} |x|\,dx}.$$

Проинтегрировав выражение, получим

$$\bar{f} = \frac{F_{r1} = F_{r2}}{4} + \frac{F}{2}.$$

При интегрировании азимутальной зависимости потока нейтронов для всех шести секторов ячейки с хорошей степенью точности выполняется условие среднеарифметического усреднения потока нейтронов, полученного для каждой пары противоположных секторов. Окончательное выражение для среднего по ячейке потока нейтронов имеет вид

$$\bar{F} = \frac{F_1^* + F_2^* + F_3^* + F_4^* + F_5^* + F_6^*}{24} + \frac{3}{4}F$$

при квадратичной интерполяции (в соответствии с вышеуказанными допущениями). Если же предположить линейное изменение потока в пределах шага сетки, то получится следующее выражение для среднего в кассете потока нейтронов:

$$\bar{F} = \frac{F_1^* + F_2^* + F_3^* + F_4^* + F_5^* + F_6^*}{18} + \frac{2}{3}F.$$

РАЗНОСТНОЕ УРАВНЕНИЕ

По оси Z метод изображения не применяется, используется обычная разностная схема метода сеток. Таким образом замена разностным выражением оператора $\nabla\left(D\nabla(F)\right)$ имеет следующий вид:

$$\nabla\left(D\nabla(F)\right) = \frac{2}{3}D\left(\frac{d^2F^*}{dX_1^2} + \frac{d^2F^*}{dX_2^2} + \frac{d^2F^*}{dX_3^2}\right) + D\frac{d^2F}{dZ^2} + \frac{dD}{dZ}\frac{dF}{dZ}.$$

Окончательно разностное выражение для потока быстрой группы нейтронов (и аналогично для тепловой) примет вид

$$F = \left(\frac{2D}{3}(F_{i+1}^* + F_{i-1}^* + F_{j+1}^* + F_{j-1}^* + F_{k+1}^* + F_{k-1}^*) + (F_{l+1} + F_{l-1})\times\right.$$

$$\left.\times\left(\frac{D}{\Delta Z^2} + \frac{D_{l+1} - D_{l-1}}{4\Delta Z^2}\right) + \frac{4F_{T-1} - F_{T-2}}{2V\Delta t} + \Psi(1-\beta) + \sum_{i=1}^{n}\lambda_i C_i\right) /$$

$$/\left(\frac{4D}{H^2}+\frac{2D}{\Delta Z^2}+(\Sigma_{\text{зам}}+\Sigma_a)\frac{\overline{F}}{F_{n-1}}+\frac{1}{2V\Delta t}\right),$$

где $\overline{F}$ — средний поток в кассете; F_{n-1} — значение нейтронного потока на предыдущем шаге итерации.

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПК РАДУГА-7

Используется семь расчетных узлов в поперечном сечении кассеты. Данный подход позволяет использовать все достоинства конечно-разностного метода при решении диффузионного уравнения в поперечном сечении кассеты. Расчетная схема представлена на рис. 6. Поскольку в пределах кассеты нейтронно-физические свойства среды однородны (в соответствии со способом подготовки нейтронно-физических сечений), существуют три различных по типу узла разностного уравнения:



Р и с. 6. Расчетная схема для узлов в поперечном сечении кассеты

— узел в центре кассеты (узел 1). Разностное уравнение в узле 1 аналогично уравнению для одноточечной разностной сетки. В отличие от одноточечной модели в данном приближении уравнение в узле 1 существенно проще, так как свойства среды в узлах 1—7 одинаковы;

— узел на границе с отражателем (узлы 2, 3, 7 в нашем примере). Уравнение в данном узле аналогично граничному условию для торцевого отражателя;

— узел на границе между кассетами (узлы 4—6).

Для упрощения выражений обозначим:

— источник нейтронов (как за счет деления, включая запаздывающие нейтроны, так и за счет увода из верхней группы), деленный на коэффициент диффузии как $\hat{\Psi}$; $\frac{1}{DV}\frac{dF}{d\tau}$ как $\hat{V}F$; увод нейтронов, деленный на коэффициент диффузии как $\hat{\Sigma}$; оператор утечки по высоте зоны как $\hat{B}_z^2$.

В этом случае уравнение для расчетного узла в центре зоны примет вид:

$$F=\frac{\frac{2}{3}(F_2+F_3+F_4+F_5+F_6+F_7)+\hat{B}_z^2F+\hat{V}F+\hat{\Psi}}{\hat{B}_z^2+\frac{4}{H^2}+\hat{\Sigma}+\hat{V}}.$$

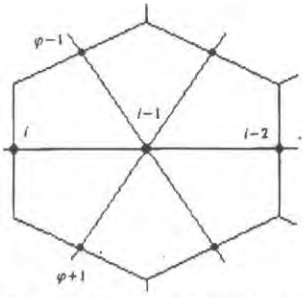
Для узлов на границе кассеты (как на границе с радиальным отражателем, так и на границе с другой кассетой) воспользуемся оператором Лапласа для цилиндрических координат:

$$\Delta F=\frac{d^2F}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{dF}{dr}+\frac{1}{r^2}\frac{d^2F}{d\varphi^2},$$

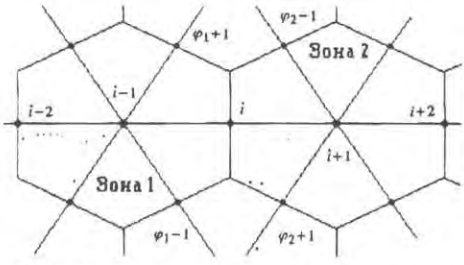
где $r=\Delta r=H/2$ (половина расстояния между центрами кассет); $\Delta\varphi=\pi/3$. Для границы с радиальным отражателем расчетная схема представлена на рис. 7. Разностное уравнение для узла на границе с радиальным отражателем будет иметь вид

$$F_i=\frac{\hat{V}F+\hat{\Psi}+\hat{B}_z^2F+\frac{F_{i-1}}{r^2}+\frac{F_{i-2}}{4r^2}+\frac{F_{\varphi+1}+F_{\varphi-1}}{r^2\Delta\varphi^2}+\frac{\alpha_2}{D}\left(\frac{3}{2\Delta r}+\frac{1}{r}\right)}{\hat{V}+\hat{\Sigma}+\hat{B}_z^2+\frac{\alpha_1}{D}\left(\frac{3}{2\Delta r}+\frac{1}{r}\right)+\frac{5}{4r^2}+\frac{2}{r^2\Delta\varphi^2}}.$$

Для границы между кассетами расчетная схема представлена на рис. 8. Произведя подстановку в разностное уравнение граничных условий сначала для левой, а затем для правой границы, и сложив полученные уравнения, получим окончательный вид разностного уравнения для узла на границе между кассетами:



Р и с. 7. Расчетная схема для границы с радиальным отражателем



Р и с. 8. Расчетная схема для границы между кассетами

$$\hat{V}_1F+\hat{V}_2F=\hat{\Psi}_1+\hat{\Psi}_2+\hat{B}^2_{1_z}F+\hat{B}^2_{2_z}F-(\hat{\Sigma}_1+\hat{\Sigma}_2)F+$$

$$+\left(\frac{1}{\Delta r^2}-\frac{D_2}{2\Delta rD_1}\left(\frac{1}{r}+\frac{3}{2\Delta r}\right)\right)F_{i+2}+\left(\frac{1}{\Delta r^2}+\frac{2D_2}{\Delta rD_1}\left(\frac{1}{r}+\frac{3}{2\Delta r}\right)\right)F_{i+1}+$$

$$+\left(\frac{1}{\Delta r^2}+\frac{2D_1}{\Delta rD_2}\left(\frac{1}{r}+\frac{3}{2\Delta r}\right)\right)F_{i-1}+\left(\frac{1}{\Delta r^2}-\frac{D_1}{2\Delta rD_2}\left(\frac{1}{r}+\frac{3}{2\Delta r}\right)\right)F_{i-2}-$$

$$-\left(\frac{3}{2\Delta r}\left(\frac{1}{r}+\frac{3}{2\Delta r}\right)\left(\frac{D_2}{D_1}+\frac{D_1}{D_2}\right)+\frac{5}{2\Delta r^2}+\frac{4}{r^2\Delta\varphi^2}\right)F_i+\frac{F_{\varphi_1+1}+F_{\varphi_1-1}}{r^2\Delta\varphi^2}+\frac{F_{\varphi_2+1}+F_{\varphi_2-1}}{r^2\Delta\varphi^2}.$$

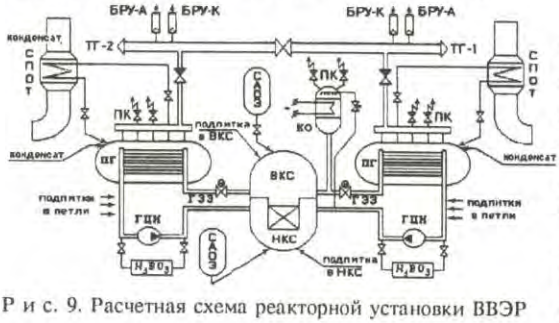
Индексы «1» и «2» относятся к нейтронно-физическим свойствам соответственно для кассет слева и справа от границы.

Результаты верификации семиточечной разностной схемы (РАДУГА-7) показали, что ее точность приблизительно в четыре раза выше по сравнению с одноточечной ПК РАДУГА-5. В качестве примера в приложении приведен расчет теста с большим градиентом коэффициента диффузии по нескольким программам в сравнении с расчетом по мелкосеточной программе ЯР. Материалы по верификации ПК РАДУГА-5 опубликованы в работе [5]. Приведенный тест разработан П.А. Болобовым и впервые опубликован в [6].

ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРВОГО КОНТУРА

Теплогидравлическая модель первого контура реакторной установки позволяет моделировать гидродинамические процессы в реакторных установках типа ВВЭР-1000, ВВЭР-440, ВВЭР-640, ВПБЭР-600, АСТ-500, АСТ-200, АСПТ и ряда других.

В качестве примера на рис. 9 приведена расчетная схема реакторной установки типа ВВЭР. Поскольку программа позволяет учитывать неполное перемешивание теплоносителя в камерах смешения реактора, на рис. 10 приведена расчетная схема камер смешения (как верхней, так и нижней).

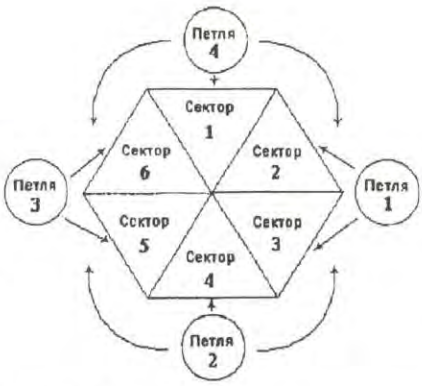


Р и с. 9. Расчетная схема реакторной установки ВВЭР

В активной зоне каждой кассете соответствует теплогидравлический канал, содержащий такое же число расчетных элементов, как и нейтронно-физический модуль (в соответствии с рис. 1). Допускается моделирование как однофазного, так и двухфазного течения теплоносителя в каналах активной зоны. Расчетная схема первого контура включает в себя все основное оборудование

реакторной установки (циркуляционные петли, ГЦН, парогенераторы, системы САОЗ, компенсатор давления, системы впрыска борированной и чистой воды и т.д.). Число расчетных циркуляционных петель — до 6, число расчетных узлов каждой из петель — до 51.

Расчетная схема обеспечивает моделирование практически всех проектных аварий, предусмотренных в ТОБ, кроме крупных течей из первого контура.



Р и с. 10. Расчетная схема камер смешения

Точность моделирования теплогидравлических процессов в каждом отдельном канале соответствует точности лучших теплогидравлических отечественных программ, а точность решения нестационарных уравнений нейтронной кинетики не уступает точности стационарных программ, например программы БИПР-7 [5].

УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ И НЕРАЗРЫВНОСТИ

Воспользуемся физическим приближением течения гомогенной несжимаемой жидкости и применим неявную схему интегрирования уравнений, что позволит существенно повысить шаг интегрирования уравнений и быстродействие программы.

Уравнение неразрывности имеет вид

$$\frac{d(\rho f)}{dt} + \frac{d(\rho w f)}{dx} = 0.$$

Приведем закон сохранения импульса:

$$\frac{d(\rho w f)}{dt} + \frac{d(\rho f w^2)}{dx} = -\rho g f \frac{dh}{dx} - \tau_0 \Pi - f\frac{dP}{dx},$$

где w — линейная скорость теплоносителя вдоль оси канала; ρ — плотность теплоносителя; f — проходное сечение канала; P — давление; x — координата, совпадающая с осью канала; h — высотная отметка; g — напряженность гравитационного поля; τ_0 — касательное напряжение; Π — периметр канала.

Решение уравнений производится при следующих допущениях:

— поток теплоносителя гомогенный;

— жидкость несжимаема;

— стенки жесткие, постоянного сечения.

Следовательно:

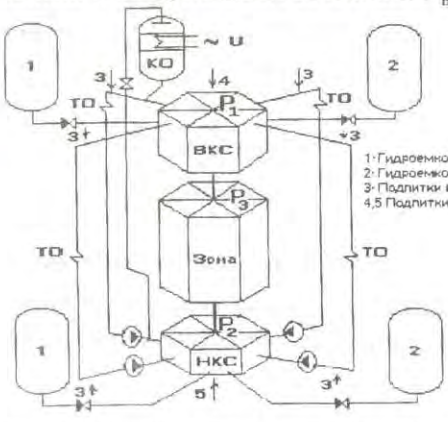
$$\frac{d(f)}{dt} = 0;\ \frac{d(\rho f)}{dt} = 0;\ \frac{df}{dx} = 0,$$

из уравнения неразрывности получим $\frac{d(\rho w f)}{dx} = 0$, то есть $dG/dx = 0$, где $G = \rho w f$ — расход теплоносителя по каналу.

Проинтегрировав уравнение сохранения импульса вдоль оси канала и приняв в качестве аргумента расход, получим уравнение

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{f}\frac{dG}{dt} = P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}} + P_{\text{нас}} - \sum_{i=1}^{n} \frac{\xi}{2\rho f^2} G|G| - \rho g h,$$

где N — число участков по длине канала; $\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{f}$ — сумма отношений длин участков канала к их проходным сечениям; $P_{вх}$ — давление на входе в канал; $P_{вых}$ — давление на выходе из канала; $P_{нас}$ — напор насоса; $\sum_{i=1}^{n}\frac{\xi}{2\rho f^2}$ — сумма отношений местных сопротивлений участка канала к удвоенному произведению плотности теплоносителя по участкам канала на квадрат проходных сечений участков; ρgh — гидростатический напор.



Р и с. 11. Расчетная схема первого контура реакторных установок типа ВВЭР или АСТ: 1, 2 — гидроемкость 1-й, 2-й ступени соответственно; 3, 4, 5 — подпитки в контур, ВКС и НКС соответственно

Расчетная схема первого контура в соответствии с конструктивной схемой реакторных установок типа ВВЭР и АСТ представлена на рис. 11.

В соответствии с расчетной схемой система уравнений движения будет иметь вид

$$\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{f}\frac{dG_z}{dt} - P_2 + P_3 = -\sum_{i=1}^{n}\frac{\xi_z}{2\rho f^2}G_z|G_z| - \rho gh;$$

$$\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{f}\frac{dG_p}{dt} - P_1 + P_2 = -\sum_{i=1}^{n}\frac{\xi_p}{2\rho f^2}G_p|G_p| - \rho gh + P_{нас};$$

$$\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{f}\frac{dG_0}{dt} - P_3 + P_1 = -\sum_{i=1}^{n}\frac{\xi_0}{2\rho f^2}G_0|G_0| - \rho gh;$$

$$\sum_{i=1}^{n_z}G_z = \sum_{i=1}^{n_p}G_p;$$

$$\sum_{i=1}^{n_z}G_z = G_0;\ P_1 = P_{ко},$$

где $P_{ко}$ — давление в компенсаторе объема, а индексы относятся: z — к каналам активной зоны; p — к петлям циркуляции; 0 — к общему тяговому участку.

Данная система уравнений преобразуется в систему уравнений относительно давления P_2 и P_3. После преобразований система уравнений будет иметь вид

$$A_{11}P_2 + A_{12}P_3 = B_1;\ A_{21}P_2 + A_{22}P_3 = B_2.$$

Заменив производную расхода по времени разностным выражением

$$\frac{dG}{dt} = \frac{3G_t - 4G_{t-1} + G_{t-2}}{2\Delta t},$$

получим разностное уравнение для канала

$$G = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{f} \frac{4G_{t-1} - G_{t-2}}{2\Delta t} + P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}} - \rho g h}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{f} \frac{3}{2\Delta t} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\xi}{2\rho f^2} |G_{t-1}|}.$$

Уравнение неразрывности решается для всего теплогидравлического контура в целом. Изменение массы теплоносителя в контуре, связанное с изменением энтальпии теплоносителя и давления в контуре, учитывается путем задания фиктивной подпитки в контур с соответствующим знаком, которая включается в граничные условия уравнений движения и энергии.

УРАВНЕНИЕ ЭНЕРГИИ

Если пренебречь сжимаемостью жидкости и диссипацией энергии, то уравнение сохранения энергии для отдельного узла примет вид:

$$M\frac{dH}{dt} = \sum_{i=1}^{n} G_{\text{вх}} H_{\text{вх}} - \sum_{i=1}^{m} G_{\text{вых}} H + Q; \sum_{i=1}^{n} G_{\text{вх}} - \sum_{i=1}^{m} G_{\text{вых}} = 0,$$

где M — масса теплоносителя в узле; H — средняя энтальпия теплоносителя в узле; $G_{\text{вх}}$ — расход, входящий в узел; $H_{\text{вх}}$ — энтальпия теплоносителя, входящего в узел; $G_{\text{вых}}$ — расход на выходе из узла; Q — мощность источника тепла.

Предполагается, что теплоноситель, входящий в узел, мгновенно перемешивается с теплоносителем в узле, следовательно, энтальпия вытекающего из узла теплоносителя равна средней энтальпии узла.

Учитывая высокую консервативность данного уравнения, высокую тепловую инерционность и невырождение уравнения при увеличении шага интегрирования до бесконечности, производную энтальпии по времени можно расписать по двухточечному шаблону:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{H - H_{t-1}}{\Delta t}.$$

Уравнение для энтальпии узла примет вид

$$H = \frac{\frac{MH_{t-1}}{\Delta t} + \sum_{i=1}^{n} G_{\text{вх}} H_{\text{вх}} + Q}{\sum_{i=1}^{m} G_{\text{вых}} + \frac{M}{\Delta t}}.$$

УРАВНЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ БОРНОЙ КИСЛОТЫ

Данное уравнение запишем аналогично уравнению энтальпии:

$$M\frac{dC}{dt} = \sum_{i=1}^{n} G_{\text{вх}} C_{\text{вх}} - \sum_{i=1}^{m} G_{\text{вых}} C + G_{\text{под}} C_{\text{под}},$$

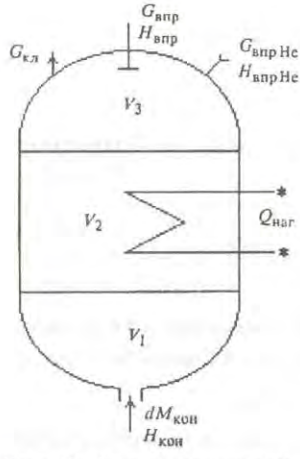
где C — концентрация борной кислоты; $G_{\text{под}}$ — расход подпитки; $C_{\text{под}}$ — концентрация борной кислоты в теплоносителе подпитки.

Разностное уравнение для концентрации борной кислоты будет иметь вид

$$C = \frac{\dfrac{MC_{t-1}}{\Delta t} + \sum_{i=1}^{n} G_{\text{вх}} C_{\text{вх}} + G_{\text{под}} C_{\text{под}}}{\sum_{i=1}^{m} G_{\text{вых}} + \dfrac{M}{\Delta t}}.$$

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПЕНСАТОРА ОБЪЕМА

Расчетная схема компенсатора приведена на рис. 12, где V_1 — первый расчетный объем, непосредственно связанный с контуром; V_2 — второй расчетный объем, в стационарном состоянии теплоноситель на линии насыщения; V_3 — парогазовый объем, в стационарном состоянии пар находится на линии насыщения при парциальном давлении; $dM_{\text{кон}}$ — изменение массы контура за шаг интегрирования; $H_{\text{кон}}$ — энтальпия теплоносителя в элементе контура, непосредственно связанном с компенсатором объема; $G_{\text{кл}}$ — расход через клапан; $G_{\text{впр}}$ — расход теплоносителя, впрыскиваемого в компенсатор; $H_{\text{впр}}$ — энтальпия впрыскиваемого теплоносителя; $G_{\text{впр He}}$ — расход впрыска гелия; $H_{\text{впр He}}$ — энтальпия впрыскиваемого гелия; Q — мощность электронагревателей.



Р и с. 12. Расчетная схема компенсатора

При разработке модели компенсатора приняты следующие допущения. Парциальное давление газов, входящих в третий расчетный объем, пропорционально мольной доле газов, $P_i = P_0 \mu_i$, где P_i — парциальное давление газа; P_0 — полное давление смеси; $P_0 = \sum_{i=1}^{n} P_i$; μ_i — мольная доля i-го газа; $\mu_i = \dfrac{M_i / A_i}{\sum_{i=1}^{n} (M_i / A_i)}$; M_i — масса i-го газа; A_i — атомная масса.

Если энтальпия пара в паровом объеме ниже энтальпии насыщения при парциальном давлении пара, то «мгновенно» происходит конденсация:

$$M_{\text{конд}} = (1 - X) M_{\text{пара}},$$

где $X = \dfrac{H_i - h'}{h'' - h'}$ — массовое паросодержание.

Если энтальпия воды в любом из водяных (V_1 или V_2) объемов выше энтальпии насыщения, соответствующей P_0, то происходит «мгновенное» вскипание:

$$M_{\text{вск}} = X M_{\text{воды}},$$

где $X = H_3 - h'/h'' - h'$ — массовое паросодержание ($i = 1, 2$); $h'(h'')$ — энтальпия воды (пара) на линии насыщения.

Температура компонентов парогазовой среды одинакова; теплообмен между парогазовым V_3 и вторым V_2 объемами задается по закону: $Q = k(T_3 - T_2)$, где k — произведение эффективного коэффициента теплообмена на площадь зеркала, определяется на основании экспериментальных данных; процессы испарения, связанные

с отличием влажности пара в парогазовом объеме от 1,0, не учитываются. Начальное распределение задается для влажности пара 1,0.

Поскольку используется приближение равновесной термодинамики, все уравнения записываются в виде полных дифференциалов.

Закон сохранения объема компенсатора раскроем в следующем виде:

$$dV = dV_1 + dM_2 + dV_3 = 0;$$

$$dV = d\left(\frac{M}{\rho}\right) = \frac{dM}{\rho} - \frac{M}{\rho^2}\left(\left(\frac{d\rho}{dP}\right)_H dP + \left(\frac{d\rho}{dH}\right)_P dH\right),$$

где M — масса теплоносителя в объеме; ρ — плотность теплоносителя в объеме; H — полная энтальпия теплоносителя в объеме; P — полное давление. Отсюда

$$dP = \frac{\sum_{i=1}^{3}\left(\frac{M_i}{\rho} - \frac{M_i}{\rho^2}\left(\frac{d\rho_i}{dH}\right)_P dH_i\right)}{\sum_{i=1}^{3}\left(\frac{M_i}{\rho^2}\left(\frac{d\rho_i}{dP}\right)_H\right)}.$$

Уравнение массы для расчетных объемов:

$$\Delta M_1 = -\Delta M_{\text{кон}} x - M_{\text{вск1}};$$

$$\Delta M_2 = -\Delta M_{\text{кон}}(1 - x) - M_{\text{вск2}} + M_{\text{конд}} + M_{\text{впр}};$$

$$\Delta M_{\text{пара}} = M_{\text{вск1}} + M_{\text{вск2}} - M_{\text{конд}} - \Delta M_{\text{кл}};$$

$$\Delta M_{\text{He}} = -\Delta M_{\text{кл He}} + M_{\text{впр He}},$$

где ΔM_1 — изменение массы первого расчетного объема; ΔM_2 — изменение массы второго расчетного объема; $\Delta M_{\text{пара}}$ — изменение массы пара в третьем объеме; ΔM_{He} — изменение массы гелия в третьем объеме; x — доля воды, поступающая в компенсатор из первого контура в первый объем; $M_{\text{вск}}$ — изменение массы объема за счет вскипания; $M_{\text{конд}}$ — изменение массы пара за счет конденсации; $\Delta M_{\text{кл}} = G_{\text{кл}}\Delta t$ — изменение массы за счет расхода через клапан; $M_{\text{впр}} = G_{\text{впр}}\Delta t$.

Представим уравнение для энтальпии:

$$\Delta H_1 = \frac{|\Delta M_{\text{кон}}| - \Delta M_{\text{кон}}}{2} H_{\text{кон}} x - \frac{|\Delta M_{\text{кон}}| + \Delta M_{\text{кон}}}{2} H_1 - M_{\text{вск1}} h'' + V_1 \Delta P;$$

$$\Delta H_2 = \frac{|\Delta M_{\text{кон}}| - \Delta M_{\text{кон}}}{2} H_{\text{кон}}(1-x) - M_{\text{вск2}} h'' + V_2 \Delta P + Q_{\text{наг}} + (M_{\text{впр}} + M_{\text{конд}}) h' + k(T_3 - T_2);$$

$$\Delta H_3 = (M_{\text{вск1}} + M_{\text{вск2}}) h'' - M_{\text{конд}} h' - (H_{\text{впр}} - h') M_{\text{впр}} + V_3 \mu_{\text{пара}} \Delta P;$$

$$\Delta H_4 = \Delta M_{\text{кл He}} H + M_{\text{впр He}} H_{\text{впр He}} + V_3 \mu_{\text{He}} \Delta P,$$

где $\mu_{\text{пара}}$ — мольная доля пара; μ_{He} — мольная доля гелия.

Для H_3 и H_4 решаем итерационную задачу до выполнения условия

$$H_3 + H_4 = \text{const}; \; T_3 = T_4.$$

Для обеспечения нерасходимости решения производится вариация полученного давления $P = P_{t-1} + \Delta P$ для выполнения условия:

$$V_1 + V_2 + V_3 = V_0 = \text{const}.$$

Опыт эксплуатации программы компенсатора объема показал высокую точность совпадения результатов с тестовыми задачами, поддающимися аналитическому решению в диапазоне изменения мольной доли гелия в качестве неконденсирующегося газа в диапазоне от 0 до 0,95.

ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТУРБОУСТАНОВКИ

Турбоустановка и вспомогательные системы (например, система продувки-подпитки) моделируется по ПК ТРР.

Расчетная схема турбоустановки не привязана к оборудованию какой-либо конкретной турбоустановки и позволяет моделировать практически любую турбоустановку как заводов «Турбоатом» или ЛМЗ, так и любого другого завода.

Расчетная схема турбоустановки набирается из отдельных расчетных модулей, что обеспечивает очень высокую гибкость при моделировании динамики турбоустановки. Причем турбинный контур может содержать как одну, так и несколько параллельно работающих турбоустановок.

На рис. 13 приведена модель турбоблока мощностью 1000 МВт, соответствующая турбине К-1000-60/1500, выпускаемая харьковским заводом «Турбоатом».

На рис. 14 приведена расчетная схема системы продувки-подпитки.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ПРОГРАММЫ ТРР

Расчетная модель теплогидравлической схемы энергоустановки набирается из следующих блоков:

— канал;
— узел;
— компенсационный объем;
— регулятор;
— ротор (турбин и насосов).

Канал. Канал является основной расчетной единицей программы.

Под расчетным каналом понимается часть трубопровода, прямоточного теплообменника, проточная часть турбины, насоса и т.д.

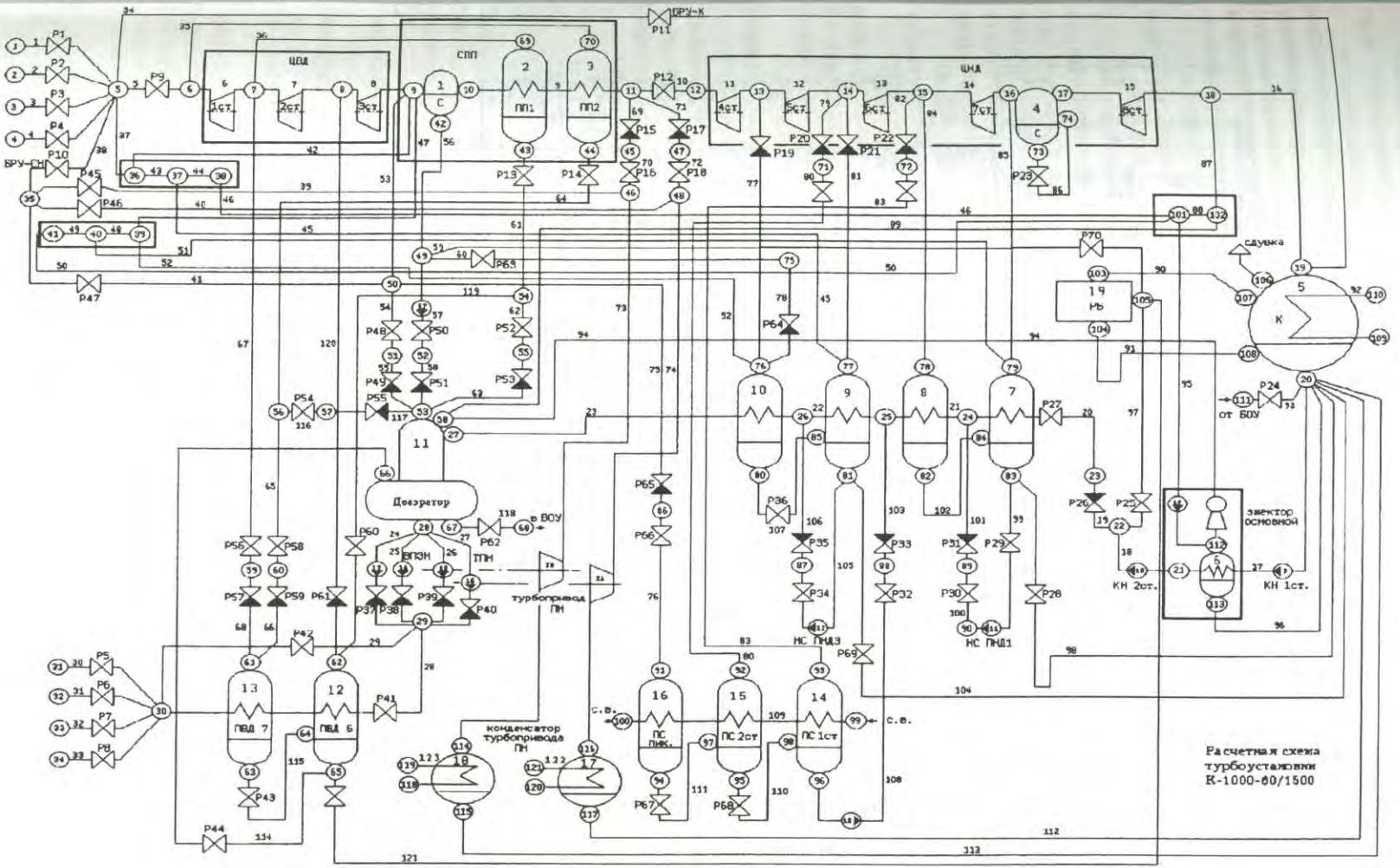
Канал характеризуется одинаковым по всей длине массовым расходом теплоносителя на каждом временном шаге.

Канал обязательно начинается и заканчивается узлом.

Канал состоит из расчетных элементов, количество элементов в канале может быть произвольным и определяется только особенностями расчетной схемы.

Кроме того, в каждом канале в произвольном элементе канала, в том числе в одном и том же, может находиться одно регулируемое сопротивление (задвижка) и один насос.

Элемент канала. Каждый элемент канала характеризуется следующими признаками: площадью проходного сечения; длиной; гидравлическим диаметром; местным гидравлическим сопротивлением; сопротивлением трения (рассчитывается автоматически по геометрическим характеристикам в зависимости от режима течения); поверхностью, ограждающей теплоноситель от внешней среды. В программе всегда рассчитывается теплообмен с ограждающей поверхностью (в дальнейшем — поверхность теплообмена; коэффициенты теплоотдачи вычисляются в зависимости от режима течения).



Р и с. 13. Модель турбоблока турбины К-1000-60/1500

регенеративный теплообменник
воздухоподогреватель продувки
СВО-1
деаэратор
ГПН 1
ГПН 2
ГПН 3
ГПН 4
ГЗО 1
ГЗО 2
ГЗО 3
ГЗО 4
охладитель подпитки
подогреватель подпитки
КО
ТУ
ТД
ТВ
Г.У.

Теплообменная поверхность характеризуется толщиной стенки, теплопроводностью и объемной теплоемкостью.

В программе предусмотрено моделирование так называемых активных элементов, когда течение в пределах элемента не является изоэнтальпийным. Признаком неизоэнтальпийного течения является принадлежность элемента к активному элементу, что указывается соответствующим признаком. Если совершаемая при течении теплоносителя через такой элемент работа положительна (теплоноситель совершает работу), то такой элемент считается ступенью турбины. Если работа отрицательна — насосом. Последнее возможно только в том случае, если расчетный элемент действительно задан как насос.

В текущей версии программы не предусмотрено корректное описание процесса течения теплоносителя через работающий насос в генераторном режиме. Суммирование вырабатываемой в элементах механической мощности осуществляется в указанных пользователем активных элементах (к одному активному элементу может принадлежать произвольное число участков). Полученные суммарные характеристики используются в модуле ротор. На теплогидравлический расчет выбранный способ объединения активных участков в активные элементы не влияет.

Поверхность теплообмена участка. Поверхность теплообмена элемента канала (участка) всегда принадлежит конкретному элементу канала (участку).

Поверхность теплообмена является плоской теплопередающей стенкой с указанной в исходных данных площадью. При расчете цилиндрических (или иных, отличных от плоских) поверхностей теплообмена необходимо поверхность теплообмена или теплопроводность стенки задать как эквивалентную плоской стенке.

Предусмотрено задание граничных условий теплообмена с поверхностью теплообмена принципиально двумя разными способами.

Граничное условие — тепловой поток извне. В этом случае расчет теплообмена со стенкой не выполняется. Количество передаваемого тепла к элементу определяется в соответствии с задаваемой в исходных данных плотностью теплового потока, умноженной на поверхность теплообмена элемента.

Расчет температуры теплопередающей стенки не выполняется, она полагается равной температуре теплоносителя в соответствующем элементе.

Граничное условие — теплообмен через плоскую стенку. Теплообмен с теплообменной поверхностью всегда рассчитывается с двух сторон.

В этом случае выполняется расчет теплообмена как с внутренней (со стороны элемента), так и с наружной стороны теплообменной поверхности (стенки). Коэффициент теплоотдачи с теплоносителем элемента вычисляется в зависимости от параметров теплоносителя и режима течения.

Предусмотрено задание теплообмена с внешней стороны стенки следующими тремя способами:

— теплообмен с внешней средой. Коэффициент теплоотдачи к наружной среде и температура наружной среды задаются в исходных данных. Если граничное условие теплообмена не задано, то полагается, что коэффициент теплоотдачи к внешней среде тождественно равен 0;

— теплообмен с теплообменной поверхностью другого элемента (принадлежащего произвольному каналу, в том числе и данному, но не «сам с собой»). При этом решаются уравнения нестационарного теплообмена через многослойную стенку. Пользователь обязан тщательно проверить, что в исходных данных теплообмен между элементами различных каналов задан взаимно. Программа автоматически не проверяет корректность задания взаимного теплообмена;

— теплообмен с одним из объемов какого-либо из компенсационных устройств (КО). При этом коэффициенты теплоотдачи к пространству внутри КО определяются из условия теплообмена в большом объеме. С одним и тем же объемом КО может обмениваться теплом произвольное число элементов, принадлежащих как одному и тому же, так и разным каналам.

Узел. Под узлом понимается соединительный объем (тройник, штуцер и т.д.), через который осуществляется подсоединение различных каналов между собой, подсоединение каналов к КО, а также подсоединение канала к внешней среде.

Теплоноситель, поступающий в узел, идеально перемешивается.

К узлу обязательно должен подсоединяться хотя бы один канал. К узлу может подсоединяться произвольное число каналов. Узел может подсоединяться к одному из объемов одного из КО.

Относительно узлов решаются уравнения гидродинамики. При решении уравнений гидродинамики определяется давление в каждом узле. Если узел подсоединен к КО, то давление в данном узле принимается равным давлению в соответствующем КО. Если узел подсоединен к внешней среде, то в исходных данных задаются граничные условия взаимодействия с внешней средой (если идет подача теплоносителя из внешней среды, таковой может быть только вода, пар или пароводяная смесь). Граничным условием с внешней средой является энтальпия воды или водяного пара и давление либо расход (по выбору пользователя). Если граничным условием с внешней средой является расход, давление в узле определяется при решении уравнений гидродинамики.

Узел характеризуется:

— объемом, равным произведению эффективного проходного сечения на длину, которые задаются в исходных данных;

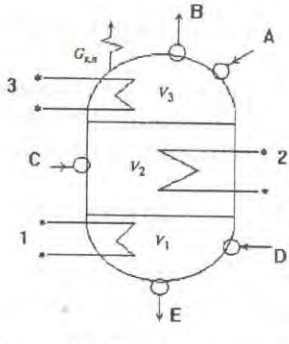
— гидравлическим диаметром (только для расчета теплообмена с теплообменной поверхностью);

— теплообменной поверхностью.

Теплообменная поверхность характеризуется толщиной стенки, теплопроводностью и объемной теплоемкостью.

В отличие от элемента теплообмен в узле допускается только с внешней средой через задаваемое в исходных данных граничное условие теплообмена. Если граничное условие теплообмена не задано, то полагается, что коэффициент теплоотдачи к внешней среде тождественно равен 0.

Компенсационное устройство (КО). Данный расчетный блок предназначен для расчета оборудования, в котором имеется разделение фаз теплоносителя.



Р и с. 15. Расчетная схема компенсационных устройств

Расчетная схема КО содержит три объема (рис. 15): водяной объем в нижней части КО (V_1), водяной объем, контактирующий с паровым объемом КО (V_2), и паровой объем (V_3).

В КО решаются уравнения равновесной термодинамики для определения параметров теплоносителя в объемах КО и давления в КО. В паровом пространстве может присутствовать неконденсирующийся газ. При инициализации счета полагается термодинамическое равновесие между объемами 2 и 3. На рис. 15 также указаны: 1 — канал с теплообменом с объемом V_1; 2 — канал с теплообменом с объемом V_2; 3 — канал с теплообменом с паровым пространством КО; $G_{кл}$ — предохранительный клапан; A — узел подсоединения подводимого к паровому пространству КО теплоносителя; B — узел подсоединения забора пара из КО; C — узел подсоединения подводимого к объему V_2 теплоносителя; D — узел подсоединения подводимого к объему V_1 теплоносителя; E — узел забора теплоносителя из объема V_1.

Моделью не предусмотрен забор теплоносителя из объема V_2. При задании забора теплоносителя из объема V_2 программа автоматически производит переподсоединение к объему V_1.

Регулятор. Модель регулятора позволяет вместо задаваемых в исходных данных переменных во времени (напор насоса, сопротивление задвижки, давление в узле, расход в узел, коэффициент теплоотдачи и температуру внешней среды, тепловой поток к внешней среде) задавать зависимость данных параметров от суммы, разности, произведения или частного от деления двух любых вычисляемых в программе характеристик объекта по таблично заданному закону с транспортным запаздыванием и гистерезисом по входному параметру.

Количество регуляторов (или регулируемых параметров) задается пользователем для каждого подлежащего регулированию параметра индивидуально по своему закону.

Ротор. Возможно моделирование динамических процессов во вращающихся механических устройствах, входящих в набираемую расчетную схему с учетом инерционных характеристик их роторов. К таким устройствам относятся:

— турбины с нагрузкой на электрогенераторы;
— насосы с электроприводом;
— насосы с турбоприводом;
— комбинация всех перечисленных устройств на одном валу.

Для определения частоты вращения ротора решается нестационарное уравнение сохранения момента импульса. Для удобства пользователя в качестве переменной принята циклическая частота вращения ротора (а не угловая скорость).

Для описания общих характеристик механических устройств, находящихся на валу ротора, введено понятие механического активного элемента, в дальнейшем — активный элемент.

Активный элемент характеризуется:

— механическим моментом, действующим на вал ротора;
— механической мощностью.

Количество активных элементов на одном роторе не ограничено, так же как не ограничено количество различных устройств, описываемых одним и тем же активным элементом.

При моделировании насоса используется четырехквадрантная его характеристика.

Для турбин и насосов задается двумерная зависимость коэффициента полезного действия, гидравлического сопротивления ступени и статического движущего момента при малых оборотах ротора как функция частоты вращения ротора и расхода рабочего тела через ступень.

Движущий момент электродвигателя задается в зависимости от частоты вращения ротора и второго (свободного) параметра. В качестве свободного параметра может выступать изменяющееся во времени напряжение питания двигателя или частота сети.

Электрогенератор в текущей версии программы работает в режиме поддержания заданной частоты вращения ротора и «передает в сеть» такую мощность, которую вырабатывает турбина (или электродвигатель) за вычетом потерь на трение и на работу находящихся на одном с ним валу насосов.

Собственно ротор характеризуется моментом инерции (запрещается задавать нулевое значение момента инерции), моментом трения (в зависимости от оборотов ротора) и частотой вращения (для удобства пользователя используется циклическая частота вращения ротора, а не угловая скорость).

В модели не предусмотрен разгон и вращение ротора в обратную сторону. Если пользователь задаст отрицательное значение движущих моментов, после остановки ротора они будут восприниматься программой как сила трения.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТУРБОУСТАНОВКИ

В основе математической модели программы использованы приближения теплогидравлического модуля ПК РАДУГА [4], аттестованного Госатомнадзором России.

Уравнения движения и энергии решаются в приближении гомогенной несжимаемой жидкости.

РАДУГА-ЭУ является универсальной расчетной программой, позволяющей м
делировать любые энергоблоки АЭС с ВВЭР, как действующие, так и проектируемы
Системой обмена информацией предусмотрен вывод практически всех вычисляем
в программе расчетных параметров, в том числе и тех, которые не регистрируют
при современном уровне развития измерительной техники.

Из ПК РАДУГА-7 и ТРР в файлы обмена данными с ПК МВТУ передаются р
альные расчетные параметры: нейтронные потоки; температуры топлива, теплонос
теля, стенок трубопроводов; распред
ление давления в элементах РУ и ту
боустановки; мощность электроген
ратора и других, где преобразуются
показания датчиков.

Схема обмена информаци
представлена на рис. 16.

Пользователь сам выбирает, к
кие параметры ему нужны для упра
ления энергоблоком и описывает их
исходных данных.



Р и с. 16. Схема системы обмена информацией

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Система управления энергоблоком АЭС моделируется по ПК МВТУ.

ПК МВТУ содержит набор моделей типовых регуляторов, из которых легко ко
фигурируется практически любая сложная система управления и автоматики энер
блока.

Для создания эффективного средства отработки структуры и алгоритмов упра
ления в АСУ ТП энергоблоков с водо-водяными реакторами произведена интеграц
ПК РАДУГА-7 и ТРР с ПК МВТУ, созданного для моделирования, анализа и опт
мизации динамических процессов в сложных технических системах, таких, как яде
ные и тепловые энергоустановки, системы автоматического управления и другие сло
ные системы, описание динамики которых может быть формализовано методами стру
турного моделирования.

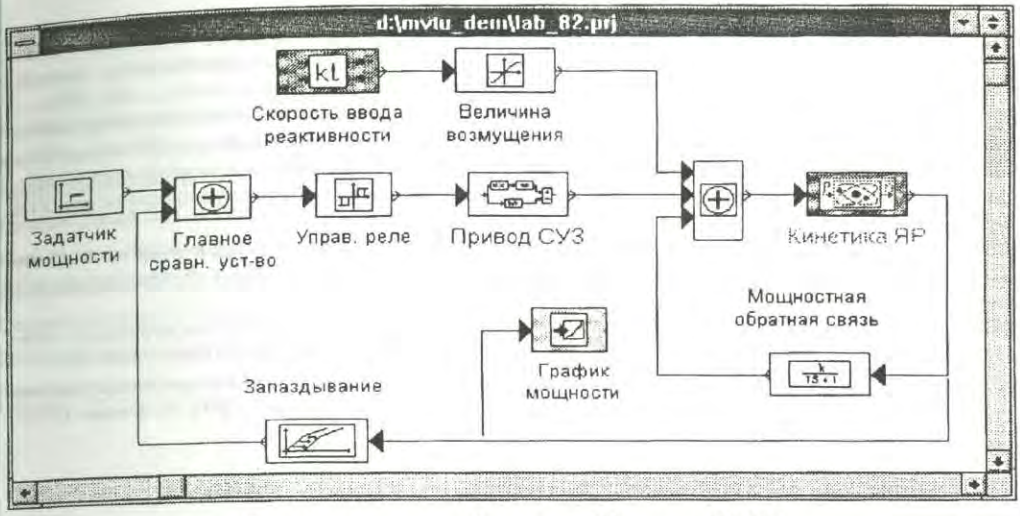
Команды управления, вырабатываемые в ПК МВТУ, передаются в ПК РАДУГА
и ТРР посредством интерфейса. ПК РАДУГА-7 и ТРР по команде из ПК МВТУ м
делируют работу всех активных исполнительных механизмов: приводов СУЗ, задв
жек, клапанов и т.д.

Графический редактор ПК МВТУ формирует многоуровневые структурные схем
(рис. 17), что используется при создании структурной схемы АСУ ТП. При этом
структурной схеме уровня N подструктуры уровня N-1 представляются в виде блок
(макроблоки). В отличие от обычных блоков математическая модель макроблока з
писана не в виде уравнений, а представлена внутренней структурной схемой макр
блока. Переход с уровня на уровень позволяет редактировать каждую подструкту
в отдельности.

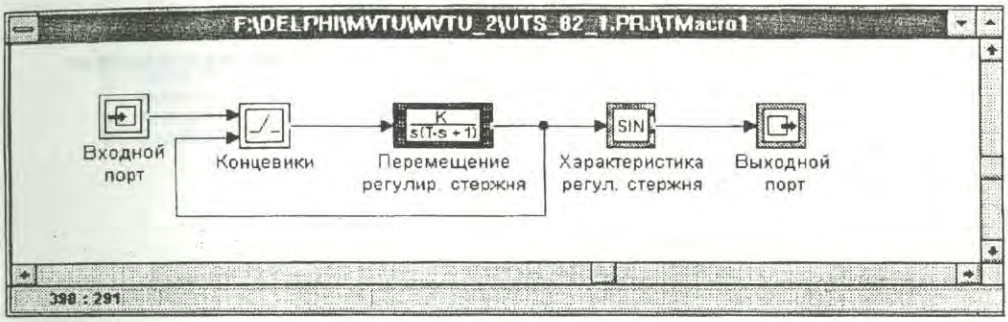
Таким образом, принцип вложенности позволяет представить структурную схем
сложной системы управления в удобном, легко читаемом виде, при этом уровень вл
женности субструктур неограничен.

Совместное использование ПК РАДУГА-7, ТРР и ПК МВТУ позволяет проводи
полномасштабное моделирование динамических процессов, анализ маневренных х
рактеристик всего энергоблока.

Окно редактора структурных схем



Схемное окно субмодели "Привод СУЗ"



Р и с. 17. Графический редактор ПК МВТУ

Кроме того, система управления позволяет моделировать вмешательство оператора и вносить отказы в работу оборудования непосредственно с пульта управления в процессе моделирования переходного процесса.

СИСТЕМА ОТОБРАЖЕНИЯ

Для графического отображения рассчитываемых величин во время и после завершения моделирования физического процесса энергоустановки разработана диалоговая программа GRAF#FF. Для удобства пользователя результаты расчета по реакторной установке и турбоустановке выводятся в разные графические окна.

Для более детального анализа выходных параметров программа позволяет вывести на печать таблицу (листинг-файл) результатов динамического процесса.

В настоящее время у ПК РАДУГА-ЭУ нет аналогов, которые позволяли бы одновременно моделировать динамику активной зоны реактора (в трехмерном двухгрупповом покассетном приближении), подробную теплогидродинамику первого контура и практически все, причем очень подробно, системы турбоблока. Возможности ПК РАДУГА-ЭУ таковы, что комплекс может быть использован в том числе и как функциональный тренажер, выполняющий моделирование динамики энергоблока АЭС с инженерной точностью.

На ЭВМ с двумя центральными процессорами PENTIUM-II 330 МГц по ПК РАДУГА-ЭУ выполняется моделирование мягких физических процессов (с реактивностью до $0{,}2\beta$) в реальном масштабе времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Программный** комплекс РАДУГА с библиотекой нейтронно-физических сечений серийного реактора ВВЭР-1000 для моделирования динамических процессов в водо-водяных реакторных установках с трехмерной двухгрупповой покассетной моделью активной зоны. Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности. Аттестационный паспорт программного средства № 62. — М., 1996.
2. **Кавун О.Ю., Куно М.Я., Фейман В.Г.** Программа ТРР для теплогидравлического расчета сложных теплогидравлических сетей. — В кн.: Сборник трудов семинара «Нейтроника-97». — Обнинск, 1998.
3. **Программный** комплекс «Моделирование в технических устройствах (МВТУ)». Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 970053. Зарегистрирована в реестре программ для ЭВМ 10.02.97. — М., 1997.
4. **Кавун О.Ю., Таранов Г.С., Мальцев М.Б., Никитин А.Ю.** Моделирование режима разрыва парового коллектора парогенератора с учетом трехмерной модели активной зоны. — ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 5, с. 43—47.
5. **Кавун О.Ю., Таранов Г.С.** Математическая модель нейтронно-физического модуля программного комплекса РАДУГА. — В кн.: Сб. трудов семинара «Нейтроника-96». — Обнинск, 1998, с. 14—38.
6. **Болобов П.А., Большагин С.Н.** Тестовые задачи для программ пространственного расчета энерговыделения реакторов ВВЭР. — В кн.: Материалы XVII симпозиума специалистов ВМК по физике ВВЭР

ПРИЛОЖЕНИЕ

Тестовая задача со значительным градиентом коэффициента диффузии между кассетами и по длине ТВС

Исходные данные

Схема загрузки зоны

```
 Номер ТВС                16
 Сорт топлива              1

                  13    14    15
                   1     1     1

            8     9    10    11
            1     3     1     1

      1     2     3     4     5     6
      2     3     1     1     1     1
```

```
Высота зоны                    - 0.5
Шаг между центрами кассет      - 0.185
Длина экстраполяции:
  для радиального отражателя   - 0.04
  для торцевого отражателя     - 0.107
```

Для задачи с неоднородной по высоте активной зоной 0,3 м активной зоны загружены в соответствии с картограммой загрузки, верхняя часть кассет (0,2 м) состоит из кассет сорта 3.

Представлены результаты расчета мощности кассет и распределения мощности по активной зоне, выполненные по программам SEZON (48, 12 и 3 расчетных узла в 1/6 части сечения кассеты), БИПР-7, БИПР-К и РАДУГА-5, РАДУГА-7 в сравнении с мелкосеточным расчетом по программе ЯР (96 расчетных узлов в сечении кассеты).

Таблица 1. Нейтронно-физические характеристики кассет

Характеристика	Сорт топлива			Размерность
	1	2	3	
Коэффициент диффузии 1-й группы	0,016328	0,019332	0,024577	м
Коэффициент диффузии 2-й группы	0,004141	0,005136	0,007113	м
Сечение замедления	1,6704	1,1342	0,60822	1/м
Сечение увода из 1-й группы	2,49153	1,91717	1,33522	1/м
Сечение поглощения 2-й группы	5,5994	5,2380	4,69846	1/м
Сечение деления 1-й группы	0,22221	0,21542	0,20413	1/м
Сечение деления 2-й группы	3,5187	3,3794	3,1110	1/м
Источник нейтронов 1-й группы	0,54151	0,52325	0,49286	1/м
Источник нейтронов 2-й группы	8,5857	8,2457	7,5908	1/м

Однородная по высоте зоны задача

	K_0	ΔK_0,%
1. ЯР-96	0.999029	-
2. S-48	0.999081	0.005
3. S-12	0.999131	0.010
4. S-3	0.999203	0.017
5. ВИПР-7	1.011822	1.28
6. ВИПР-К	1.002200	0.317
7. РАДУГА-5	0.997115	-0.192
8. РАДУГА-7	1.000778	0.175

16															
0.577															
0.574	0.5														
0.569	1.4														
0.556	3.6														
0.520	9.9														
0.581	0.7														
0.575	-0.3														
0.573	-0.7														

13		14		15	
1.420		1.221		0.559	
1.415	-0.4	1.219	-0.2	0.556	-0.5
1.407	-0.9	1.217	-0.3	0.552	-1.3
1.388	-2.3	1.208	-1.1	0.539	-3.6
1.579	11.2	1.144	-6.3	0.500	-10.6
1.413	-0.5	1.218	-0.2	0.562	0.5
1.457	2.6	1.221	0.0	0.554	-0.9
1.418	-0.1	1.209	-1.0	0.555	-0.7

8		9		10		11		12	
1.255		0.861		1.484		1.165		0.483	
1.251	-0.3	0.881	2.3	1.481	-0.2	1.163	-0.2	0.480	-0.6
1.237	-1.4	0.912	5.9	1.477	-0.5	1.160	-0.4	0.476	-1.4
1.209	-3.7	0.998	15.9	1.466	-1.2	1.151	-1.2	0.464	-3.9
1.781	41.9	0.588	-31.7	1.542	3.9	1.071	-8.1	0.424	-12.2
1.254	-0.1	0.874	1.5	1.478	-0.4	1.160	-0.4	0.483	0.0
1.345	7.2	0.752	-12.7	1.510	1.8	1.160	-0.4	0.473	-2.1
1.283	2.2	0.878	2.0	1.478	-0.4	1.152	-1.1	0.479	-0.8

1		2		3		4		5		6		7	
0.776		0.694		1.340		1.494		1.472		0.949		0.289	
0.776	0.0	0.708	2.0	1.335	-0.4	1.490	-0.3	1.471	-0.1	0.946	-0.3	0.286	-1.0
0.772	-0.5	0.730	5.2	1.327	-1.0	1.484	-0.7	1.471	-0.1	0.943	-0.6	0.284	-1.7
0.770	-0.8	0.791	14.0	1.304	-2.7	1.467	-1.8	1.466	-0.4	0.931	-1.9	0.275	-4.8
1.047	34.9	0.571	-17.8	1.781	32.9	1.721	15.2	1.400	-4.9	0.854	-10.0	0.247	-14.5
0.761	-1.9	0.702	1.2	1.345	0.4	1.488	-0.4	1.467	-0.3	0.947	-0.2	0.293	1.4
0.810	4.4	0.635	-8.5	1.427	6.5	1.545	3.7	1.478	0.4	0.943	-0.6	0.288	-0.3
0.785	1.2	0.710	0.7	1.364	1.8	1.506	0.8	1.455	-1.2	0.937	-1.3	0.288	-0.3

Максимальное отклонение мощности кассеты от мелкосеточного расчета составляет: по программе РАДУГА-5 в кассете № 9 12,7%; по программе РАДУГА-7 в кассете № 8 2,2%.

	K_0	ΔK_0,%
1. ЯР-96	0.930187	-
2. S-48	0.930213	0.003
3. S-12	0.930220	0.004
4. S-3	0.930120	-0.007
5. ВИПР-7	0.954084	2.569
6. ВИПР-К	0.934589	0.473
7. РАДУГА-5	0.927231	-0.318
8. РАДУГА-7	0.929386	-0.080

16
0.541
0.538 -0.6
0.534 -1.3
0.522 -3.5
0.509 -5.9
0.546 0.9
0.536 -0.9
0.535 -1.1

13	14	15
1.404	1.160	0.522
1.400 -0.3	1.159 -0.1	0.519 -0.6
1.394 -0.7	1.157 -0.3	0.515 -1.3
1.378 -1.9	1.149 -0.9	0.504 -3.4
1.551 10.5	1.124 -3.1	0.489 -6.3
1.406 0.1	1.157 -0.3	0.527 1.0
1.435 2.2	1.156 -0.3	0.516 -1.1
1.402 -0.1	1.146 -1.2	0.517 -1.0

8	9	10	11	12
1.362	0.990	1.449	1.097	0.447
1.358 -0.3	1.008 1.8	1.446 -0.2	1.095 -0.2	0.445 -0.4
1.346 -1.2	1.034 4.4	1.443 -0.4	1.093 -0.4	0.441 -1.3
1.321 -3.0	1.107 11.8	1.434 -1.0	1.085 -1.1	0.430 -3.8
1.776 30.4	0.679-31.4	1.518 4.8	1.050 -4.3	0.414 -7.4
1.366 0.3	0.989 -0.1	1.445 -0.3	1.094 -0.3	0.451 0.9
1.451 6.5	0.903 -8.8	1.468 1.3	1.088 -0.8	0.437 -2.2
1.395 2.4	1.011 2.1	1.441 -0.6	1.082 -1.4	0.443 -0.9

1	2	3	4	5	6	7
0.954	0.880	1.427	1.504	1.407	0.885	0.266
0.953 -0.1	0.894 1.6	1.422 -0.4	1.500 -0.3	1.406 -0.1	0.882 -0.3	0.264 -0.
0.951 -0.3	0.913 3.8	1.415 -0.8	1.495 -0.6	1.406 -0.1	0.879 -0.7	0.261 -1.
0.949 -0.5	0.969 10.1	1.394 -2.3	1.481 -1.5	1.402 -0.4	0.869 -1.8	0.254 -4.
1.083 13.5	0.673-23.5	1.777 24.5	1.700 13.2	1.379 -2.0	0.835 -5.6	0.240 -9.
0.957 0.3	0.875 -0.6	1.431 0.3	1.501 -0.2	1.400 -0.5	0.886 0.1	0.272 2.
0.993 4.1	0.835 -5.1	1.511 5.9	1.549 3.0	1.408 0.1	0.876 -1.0	0.264 -0.
0.973 2.0	0.905 2.8	1.454 1.9	1.514 0.7	1.388 -1.4	0.870 -1.7	0.264 -0.

Максимальное отклонение мощности кассеты от мелкосеточного расчета составляет: по программе РАДУГА-5 в кассете № 9 8,8%; по программе РАДУГА-7 в кассете № 8 2,4%.

Таблица 2. Сравнение распределения энерговыделения в ТВС с расчетом по программе ЯР-96

Номера кассеты	Программа, %	Узел по высоте ТВС									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	ЯР-96	.776	1.020	1.200	1.304	1.324	1.235	.888	.745	.601	.445
	РАДУГА-5	8.1	8.2	8.2	8.1	7.4	5.1	7.8	5.1	4.2	3.8
	РАДУГА-?	2.4	2.6	2.7	2.7	2.3	0.8	3.6	2.4	2.2	2.0
2	ЯР-96	.691	.907	1.063	1.149	1.157	1.080	.917	.769	.617	.455
	РАДУГА-5	-5.6	-5.5	-5.4	-5.0	-4.4	-3.3	0.5	2.0	2.9	3.3
	РАДУГА-7	3.6	3.7	3.8	3.7	3.6	2.8	2.3	2.1	2.1	2.0
3	ЯР-96	1.331	1.740	2.027	2.168	2.140	1.877	1.054	.822	.642	.468
	РАДУГА-5	10.0	10.1	10.0	9.6	8.7	5.2	12.2	7.9	6.1	5.3
	РАДУГА-7	3.2	3.3	3.3	3.0	2.4	-1.2	4.4	2.6	2.0	1.9
4	ЯР-96	1.459	1.900	2.198	2.326	2.263	1.943	1.061	.811	.625	.452
	РАДУГА-5	6.0	6.2	6.1	6.0	5.5	2.8	10.3	6.7	5.3	4.9
	РАДУГА-7	1.8	1.9	1.9	1.7	1.1	-2.5	3.5	1.7	1.3	1.1
5	ЯР-96	1.428	1.853	2.127	2.227	2.130	1.780	.933	.694	.525	.376
	РАДУГА-5	1.9	2.1	2.3	2.3	2.3	0.5	8.5	5.8	5.0	5.1
	РАДУГА-7	-0.7	-0.5	-0.5	-0.7	-1.2	-4.6	2.1	0.9	0.6	0.1
6	ЯР-96	.909	1.177	1.346	1.406	1.338	1.111	.578	.427	.322	.229
	РАДУГА-5	0.6	0.8	1.2	1.1	1.2	-0.5	7.6	5.4	4.7	4.8
	РАДУГА-7	-1.0	-0.8	-0.7	-1.0	-1.5	-4.9	2.1	0.7	0.3	0.9
7	ЯР-96	.274	.355	.406	.423	.402	.333	.173	.128	.096	.069
	РАДУГА-5	1.1	1.1	1.5	1.7	1.5	0.0	8.1	5.5	5.2	4.3
	РАДУГА-7	0.0	0.0	0.0	0.2	-0.5	-3.7	2.9	1.6	2.1	1.4
8	ЯР-96	1.250	1.636	1.910	2.049	2.034	1.801	1.028	.810	.637	.466
	РАДУГА-5	10.9	11.0	10.8	10.5	9.4	5.6	12.7	8.0	5.8	5.2
	РАДУГА-7	3.8	3.9	3.9	3.7	3.0	-0.7	4.8	2.8	2.0	1.9
9	ЯР-96	.829	1.083	1.258	1.343	1.328	1.207	.978	.797	.628	.458
	РАДУГА-5	-10.5	-10.3	-10.0	-9.6	-8.7	-7.2	-1.7	0.4	1.9	2.6
	РАДУГА-7	2.8	2.9	3.0	3.0	2.9	1.8	1.3	1.1	1.1	1.3
10	ЯР-96	1.440	1.871	2.156	2.268	2.186	1.851	.990	.746	.569	.410
	РАДУГА-5	3.7	4.0	4.0	4.0	3.8	1.5	9.2	6.2	5.1	4.6
	РАДУГА-7	0.3	0.5	0.4	0.3	-0.3	-3.7	2.6	1.2	0.9	0.7
11	ЯР-96	1.122	1.455	1.667	1.741	1.660	1.381	.721	.534	.403	.288
	РАДУГА-5	0.9	1.1	1.3	1.4	1.4	-0.2	7.8	5.4	4.5	4.5
	РАДУГА-7	-0.7	-0.6	-0.6	-0.8	-1.2	-4.6	2.1	0.7	0.5	0.7
12	ЯР-96	.461	.597	.683	.712	.677	.561	.292	.216	.162	.116
	РАДУГА-5	-0.9	-0.7	-0.3	-0.3	-0.1	-1.8	6.2	3.7	3.1	3.4
	РАДУГА-7	-0.7	-0.3	-0.4	-0.6	-1.0	-4.3	2.4	0.9	1.2	0.9
13	ЯР-96	1.374	1.787	2.063	2.178	2.112	1.806	.982	.749	.575	.416
	РАДУГА-5	4.9	5.1	5.2	5.2	4.7	2.2	9.8	6.1	4.9	4.3
	РАДУГА-7	0.7	0.9	0.9	0.7	0.1	-3.3	3.0	1.3	1.0	0.7
14	ЯР-96	1.181	1.531	1.757	1.838	1.756	1.466	.767	.570	.430	.308
	РАДУГА-5	1.4	1.6	1.8	1.9	1.9	0.1	8.1	5.4	4.9	4.9
	РАДУГА-7	-0.6	-0.4	-0.4	-0.6	-1.1	-4.5	2.2	0.9	0.9	1.0
15	ЯР-96	.536	.695	.796	.830	.790	.656	.341	.252	.190	.136
	РАДУГА-5	0.4	0.6	0.8	1.0	0.9	-0.8	7.3	5.2	4.2	4.4
	РАДУГА-7	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-1.0	-4.3	2.6	1.6	1.1	0.7
16	ЯР-96	.555	.718	.823	.859	.818	.679	.354	.262	.197	.141
	РАДУГА-5	0.7	1.3	1.3	1.4	1.3	-0.1	7.6	5.3	4.6	4.3
	РАДУГА-7	-0.4	-0.1	-0.2	-0.4	-0.9	-4.1	2.5	1.1	1.5	1.4

Максимальное отклонение мощности от мелкосеточного расчета составляет: по программе РАДУГА-5 в кассете № 8 в узле по высоте № 7 12,7%; по программе РАДУГА-7 в кассете № 6 в узле по высоте № 6 −4,9%.

Статья поступила в редакцию 9 августа 1999 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Физика ядерных реакторов, 1999, вып. 2, с. 17—39.

УДК 621.039

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ВСЕХ ПАРАМЕТРОВ АЭС

А.Е. Крошилин, В.Е. Крошилин, В.Н. Майданик,
ВНИИАЭС, 109507, Москва, Ферганская ул., 25

Приводится описание математических моделей для расчета всех теплогидравлических процессов моделирования работы оборудования АЭС.

MATHEMATICAL MODELS OF NPP. A.E. KROSHILIN, V.E. KROSHILIN, V.N. MAIDANIK. The art is devoted to description of mathematical models for all thermohydraulic processes and NPP equipment calculati

Математические модели расчета параметров на АЭС включают в себя разнопл новые программы, которые моделируют различные процессы и работу оборудовани Модели АЭС можно условно разбить на следующие группы:

1) расчет нейтронной кинетики;
2) расчет параметров в первом контуре АЭС и в парогенераторах;
3) расчет параметров в электрических сетях;
4) моделирование работы аналоговых, цифровых регуляторов и логических схе
5) расчет параметров во втором контуре АЭС, включая питательный тракт и гла ный пар с турбиной и вспомогательные системы технической воды;
6) расчет параметров в помещениях АЭС и в контейнменте.

Для реализации данных блоков разработаны различные программы, для написан которых используются кодогенераторы. Последние построены по единой схеме и с стоят из двух подсистем — графической оболочки и генератора кода, который созда тексты FORTRAN программ из схем, набранных в графической оболочке.

Ниже приводится описание математических моделей, за исключением нейтронн кинетики, которая будет описана в отдельной статье.

Для расчета параметров в 1-м контуре АЭС и в парогенераторах разработан ко плекс наилучшего приближения, используемый в тренажерах — национальный и следовательский комплекс БАГИРА, который по глубине и ширине описания разли ных процессов ничем не уступает лучшим зарубежным кодам, а по некоторым пар метрам и превосходит их. В частности, в комплексе БАГИРА используется трехмерн модель течения теплоносителя. Другие комплексы наилучшего приближения, напр мер TRAC, также используют трехмерные модели течения, однако эти комплек используются из-за их сложности и слабого быстродействия, как правило, для мод лирования не очень сложных для расчета аварий. Национальный исследовательск комплекс БАГИРА был успешно использован для моделирования особенностей течен теплоносителя при различных авариях, в том числе при экстремальных гипотетическ авариях с разрушением активной зоны. Это показывает универсальность комплек то есть возможность его использования для моделирования всевозможных аварий.

Комплекс БАГИРА моделирует общий случай течения теплоносителя — нест ционарное трехмерное течение двухскоростной, двухтемпературной парогазожидк стной смеси, причем реализованы две версии для расчета скоростей фаз: модель дрей и модель, использующая два уравнения импульса фаз.

Основные уравнения имеют следующий вид:

— уравнение сохранения массы смеси

$$\frac{\partial \gamma \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma \rho \vec{V}) = s_l + s_v + s_a;$$

— уравнение сохранения массы жидкости

$$\frac{\partial \gamma \rho_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma \rho_1 \vec{V}_1) = s_l + \Gamma_{v \to l};$$

— уравнение сохранения массы неконденсирующегося газа

$$\frac{\partial \gamma \rho_a}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma \rho_a \vec{V}_g) = s_a;$$

— уравнение сохранения энергии смеси

$$\frac{\partial \gamma E}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma \vec{F}_h) = \gamma \vec{W} \nabla \cdot P + s_l h_{sl} + s_v h_{sv} + s_a h_{sa} + Q;$$

— уравнение сохранения энтальпии газа

$$\frac{\gamma H_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma \vec{F}_{hg}) = \gamma \alpha_g \frac{\partial P}{\partial t} + \gamma \alpha_g \vec{W}_g \nabla \cdot P + \gamma \Gamma_{l \to v} \left(U_{sv} + \frac{P_v}{\rho_v^0} \right) - \gamma Q_{g \to i} + s_v h_{sv} + s_a h_{sa} + Q_g;$$

— уравнение импульса смеси

$$\frac{\partial \rho V_i}{\partial t} + \nabla_j \cdot (\rho V_i V_j) + \nabla_i \cdot P = -\rho g_i - F_{\text{frici}},$$

де $\vec{F}_h$ и $\vec{F}_{hg}$ — потоки энтальпии для смеси и газовой фазы соответственно, включающие онвективные и турбулентные составляющие (турбулентные составляющие важны для асчета двух- и трехмерных потоков); $\nabla \vec{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$ для произвольного вектора $\vec{A} = (A_x, A_y, A_z)$.

Используются наиболее точные замыкающие соотношения и соответствующие арты режимов из RELAP-5, TRAC, позволяющие описывать все режимы течения.

Используется точно аппроксимирующая параметры в каждой ячейке (без упрощающих приближений) численная схема.

Была проведена подробная верификация программного комплекса БАГИРА. При этом были использованы данные экспериментов на всевозможных термодинамических пециальных стендах, испытаний на АЭС с ВВЭР и РБМК, расчетов по другим программным комплексам.

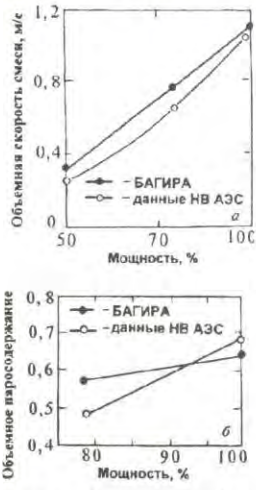
В качестве примера использования программного комплекса БАГИРА проанализируем особенности работы горизонтального парогенератора ВВЭР-1000.

В предполагаемом проектном режиме работы поток в зазоре между корпусом и закраиной погруженного щита движется вниз.

Измерение некоторых локальных параметров, проведенное на 5-м блоке Нововоронежской АЭС* показали принципиально другой непроектный режим работы парогенератора в сечении около входного коллектора. В зазоре между корпусом парогенератора и закраиной погруженного щита с «горячей» стороны теплообменного пучка имеет место устойчивое подъемное движение потока. При этом вода забрасывается из зазора в пространство над дырчатым листом, что увеличивает влажность отбираемого из парогенератора пара и ухудшает характеристики работы парогенератора. К сожалению, точность измерения не велика (и они могут быть использованы только для качественных оценок) и из-за технических сложностей перечень измеряемых параметров крайне ограничен (в частности, в настоящее время невозможно измерение параметров внутри трубного пучка). Тем не менее выполненные измерения достоверно показывают тонкую, принципиально не проектную, очень важную особенность работы парогенератора, связанную с устойчивым подъемным движением потока в зазоре между корпусом парогенератора и закраиной погруженного щита с «горячей» стороны теплообменного пучка. Данное течение не может быть корректно смоделировано в рамках одномерного подхода. Для его исследования необходимо проведение расчетов двухмерного течения.

*Исследование сепарационных гидродинамических и тепловых характеристик ПГВ-1000 на 5-м блоке НВАЭС. — Заключительный отчет 187-0217, ОКБМ «Гидропресс», 1982.

На рис. 1 приведена зависимость объемной скорости (*а*), объемной концентрации пара (*б*) в зазоре между корпусом парогенератора и закраиной погруженного щита «горячей» стороны теплообменного пучка от мощности парогенератора.



Р и с. 1. Зависимость объемной скорости (*а*), объемной концентрации пара (*б*) в зазоре между корпусом парогенератора и закраиной погруженного щита с «горячей» стороны теплообменного пучка от мощности парогенератора

При проведении этого расчета не подбирались константы (например, для расчета проскальзывания в дырчатом листе) для улучшения согласования между расчетными и экспериментальными данными. Учитывая это, а также сложный характер течения, согласование между расчетными и станционными данными можно считать удовлетворительным.

Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что код БАГИРА правильно описывает сложные двухмерные течения.

Расчеты показали, что трехмерные эффекты играют существенную роль в следующих режимах:

— изменение расхода теплоносителя в одной или нескольких петлях;

— работа энергоблока на неполном числе петель;

— нарушение условий теплоотвода со стороны второго контура;

— внесение положительной или отрицательной реактивности в ограниченный сектор активной зоны;

— отказ работы части систем аварийного охлаждения реактора;

— перегрев и разрушение активной зоны в локальных областях.

Вывод. Программа БАГИРА, используемая для расчета параметров в первом контуре АЭС и в парогенераторах, по полноте, законченности и точности уравнений, замыкающих соотношений не уступает исследовательским, наиболее точным кодам типа RELAP5 и TRAC.

Для расчета параметров во втором контуре АЭС, включая питательный тракт, главный пар с турбиной, вспомогательные системы технической воды и расчета параметров в помещениях АЭС и в контейнменте был разработан комплекс программ CMS, позволяющий рассчитывать параметры в произвольной теплогидравлической сети при течении парогазожидкостной смеси в предположении равновесного и гомогенного течения. С его помощью определяются параметры в системах, где эффектами термодинамической неравновесности и скольжения можно пренебречь.

Реализация модели сводится к представлению реальных объектов теплогидравлической сети объектами трех условных типов: узел, объем, граничное условие. Узел представляет собой соединение трубопроводов, причем параметры в нем являются сосредоточенными (осредненными). В объемах различаются верхняя и нижняя части, причем в последней сосредоточивается отсепарированная вода. Граничное условие определяется параметрами в других системах, связанных с данной технологической сетью. Моделируются следующие основные процессы:

— течение гомогенной сжимаемой парожидкостной смеси;

— работа технологического оборудования — насосов, задвижек, клапанов, эжекторов, теплообменников и т.д.;

— дренаж жидкости;

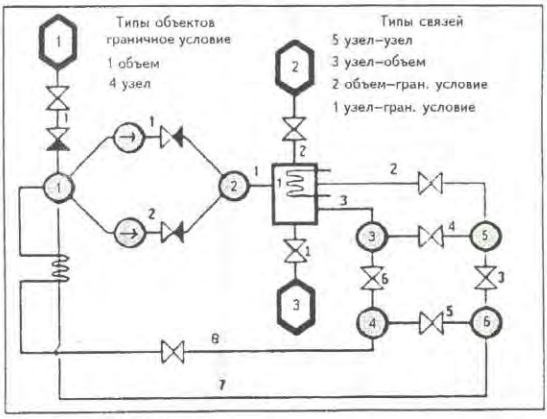
— в объемах имеет место тепло и массообмен отсепарированной воды с парогазожидкостной смесью в верхней части объема. Таким образом, объем представляет собой двухтемпературный объект;

— перегрев парогазовой смеси в узлах и объемах;

— теплообмен со стенками и окружающей средой;

— перенос примесей, концентрация оторых не влияет на теплофизические араметры.

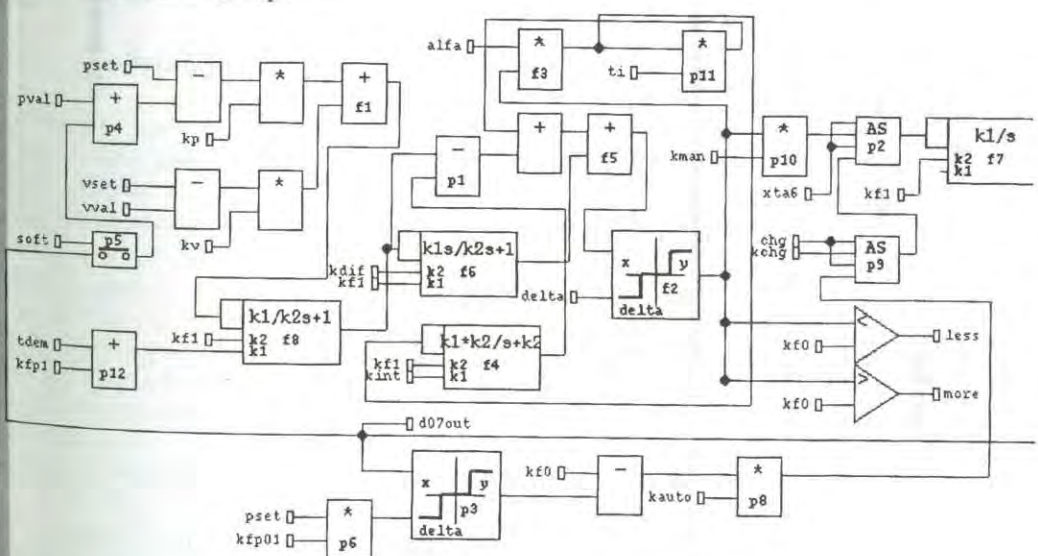
Пример теплогидравлической сети, оставленной по CMS, показан на рис. 2.



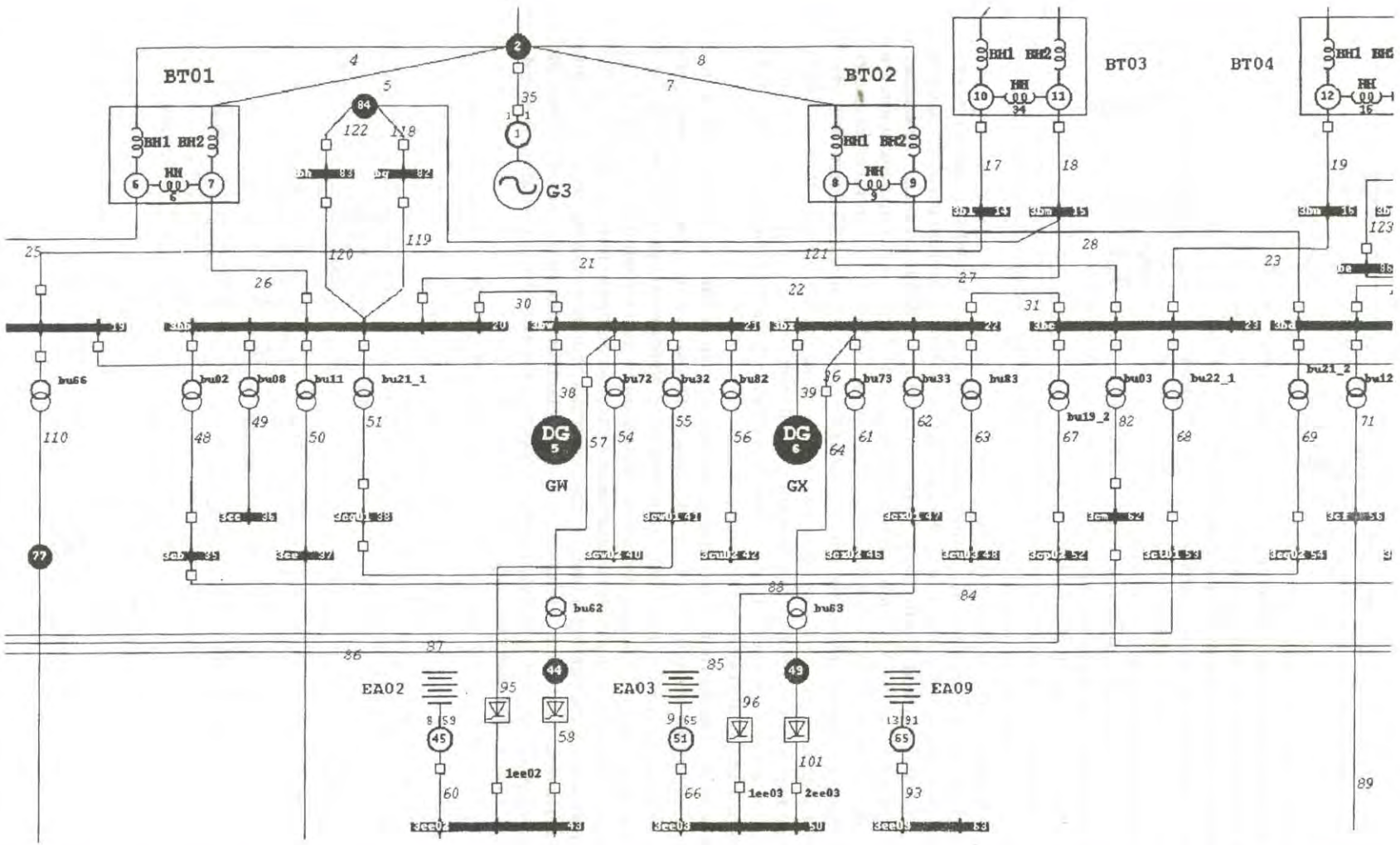
Р и с. 2. Пример теплогидравлической сети, составленной по CMS

Для автоматизации процесса создания программ по моделированию работы налоговых, цифровых регуляторов и огических схем были разработаны ический кодогенератор LCG, структурный GCG и кодогенератор блок-схем CG. Логический кодогенератор при зображении схемы набирает библиочные элементы: логическое «и», или», триггер, интегратор и т.д. Библиотека содержит достаточно сложные лементы, как, например, преобразование по Лапласу реального дифференцирующего вена или элементы с моделью насоса, и может расширяться. Кодогенератор блок-схем о станционной документации создает точную копию из библиотечных элементов: словие, действие, начало, конец. При генерации кода блок-схемы преобразуются в рограммный модуль. Структурный кодогенератор служит для реализации схем защит блокировок электротехнических или теплогидравлических цепей. Элементами служат схемы управления реальных объектов. Библиотека элементов для данного кодогенератора включает в себя любые компоненты и логические схемы, разработанные логическом кодогенераторе. На рис. 3 приведен пример блок-схемы регулятора Р27, оставленной по логическому кодогенератору.

Для расчета параметров в электрических сетях разработана математическая модель, включающая в себя библиотеку элементов: источники напряжения, трансформаторы, дизель-генератор, нагрузки, выключатели, инверторы, узлы, базисный узел хемы. Для решения составляется система уравнений узловых напряжений для цепи переменного тока. По полученным значениям узловых напряжений затем рассчитываются активные, реактивные и полные составляющие токов на связях между узлами, также активные, реактивные и полные составляющие мощности. На рис. 4 приведена лектрическая схема АЭС с генератором и дизель-генераторами, трансформаторами, ыключателями и батареями.



Р и с. 3. Пример блок-схемы регулятора Р27, составленной по логическому кодогенератору


BT01
BT02
BT03
BT04
BH1 BH2
HH
G3
DG 5
GW
DG 6
GX
bu66
bu02
bu08
bu11
bu21_1
bu72
bu32
bu82
bu73
bu33
bu83
bu03
bu22_1
bu19_2
bu21_2
bu12
bu62
bu63
EA02
EA03
EA09
1ee02
1ee03
2ee03

Все вышеперечисленные программные средства апробировались и использовались в полномасштабных и аналитических тренажерах для АЭС с реакторами РБМК для Курской, Смоленской и Чернобыльской АЭС, с реакторами ВВЭР для Балаковской, Калининской, Запорожской, Нововоронежской АЭС общим числом не менее 10. Передача каждого тренажера заказчику предусматривает проведение большого количества режимов в стационарных, переходных и аварийных условиях. При этом проводится сопоставление результатов расчетов со станционными данными по всему перечню параметров, что является надежной верификацией всего программного комплекса.

Статья поступила в редакцию 9 августа 1999 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Физика ядерных реакторов, 1999, вып. 2, с. 40—45.

УДК 621.039

АНАЛИЗАТОРЫ И МОДЕЛИРУЮЩИЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ПРОЕКТАНТОВ И КОНСТРУКТОРОВ

А.Д. Зенков, М.Ю. Липов, С.Д. Малкин, И.А. Моисеев, И.Д. Ракитин, А.В. Фокин, В.В. Шаля, Д.И. Янушевич, РНЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Курчатова, 1

Рассмотрены вопросы, связанные с анализаторами и моделирующими комплексами для проектантов и конструкторов ядерных энергоблоков, определены основные концептуальные требования по составу и функциональным возможностям таких комплексов, их место в общей классификации моделирующих систем, а также представлена созданная в РНЦ «Курчатовский институт» технология АИС-95, предназначенная для создания моделирующих систем различного класса и назначения, включая рассматриваемые.

ANALYZERS AND SIMULATORS FOR DESIGNERS AND ENGINEERS. A.D. ZENKOV, M.Yu. LIPOV, S.D. MALKIN, I.A. MOISEEV, I.D. RAKITIN, A.V. FOKIN, V.V. SHALIA, D.I. YANUSHEVICH. Main features and functions of analyzers and simulators for designers and engineers are defined in the paper. New step technology — AIS-95 that was developed in RRC «Kurchatov Institute» is proposed. AIS-95 technology was designed to create several classes of simulators, including analyzers mentioned above.

ВВЕДЕНИЕ

Моделирующие системы для ядерных энергоблоков представляют собой комплексы технических средств и математического обеспечения. Наиболее сложными из них являются полномасштабные тренажеры. Их сложность объясняется, с одной стороны, использованием кроме средств вычислительной техники реальной аппаратуры управления, а с другой стороны, необходимостью реализации в реальном масштабе времени математических моделей и расчетных программ с десятками тысяч переменных.

Однако достижения в области вычислительной техники и, прежде всего, увеличение производительности компьютеров при резком сокращении их размеров, существенное усовершенствование системного математического обеспечения, а также усовершенствование математического описания сложных физических процессов, численных методов и их программной реализации привели к существенному расширению спектра использования моделирующих систем, особенно в области ядерной энергетики.

Главной же предпосылкой, обеспечившей «прорыв» в создании современных моделирующих комплексов, являются достижения в области технологий математического моделирования и моделирующих систем. Ярчайшим примером таких технологий является созданная в РНЦ «Курчатовский институт» технология АИС-95 (автоматизированная интерактивная система) [1].

КЛАССИФИКАЦИЯ МОДЕЛИРУЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ

Классификация моделирующих систем затруднена из-за неустоявшейся тер нологии. Одной из наиболее удачных представляется принятая в РНЦ «Курчатовск институт» двухуровневая классификация, согласно которой на первом уровне мо лирующие системы подразделяются в соответствии с типом пользователей, а на в ром — в соответствии с целями их использования.

По типу пользователей можно выделить моделирующие комплексы, предназ ченные для:

— эксплуатационного персонала и персонала регулирующих органов;

— разработчиков энергетических установок (конструкторов и проектантов);

— исследователей (аналитиков и инженерного персонала).

В зависимости от целей использования моделирующие системы для эксплуата онного персонала и персонала регулирующих органов можно разделить на те, котор используются для обучения, тренировок и проверок технических решений и эксп атационных процедур, и те, которые используются в процессе управления реальны объектами или в критических ситуациях.

Моделирующие системы для разработчиков, или, как их еще принято называ расчетно-моделирующие комплексы (РМК), подразделяются на используемые для р работки основного оборудования и объектов в целом, предназначенные для синт алгоритмов управления, блокировок и защит разрабатываемых объектов и для исп таний систем автоматического регулирования и управления реальными объектам

Моделирующие системы для исследователей делятся на те, которые использую для аналитиков, основной задачей которых является оперативный поиск причин альных аварийных ситуаций, а также поиск сценариев и исследование возможн последствий гипотетических запроектных, в том числе тяжелых, аварий, и те, котор предназначены для разработчиков математических моделей динамических процесс происходящих в реальных или разрабатываемых объектах.

АНАЛИЗАТОРЫ И МОДЕЛИРУЮЩИЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ РАЗРАБОТЧИК

К разработчикам энергоблоков, их оборудования и систем традиционно отно прежде всего проектантов, конструкторов и исследователей, выполняющих расчет теоретическое обоснование вновь проектируемых и модернизируемых объектов.

Конечно, моделирующие системы каждой из перечисленных выше групп в или иной степени являются полезными и необходимыми в работе разработчика эн гоблока или его оборудования. Особенно, если мы говорим о работах, связанны модернизацией созданных объектов энергетики и их систем, то есть работах, тре ющих не слишком большой корректировки математических моделей и расчетных дов, и, особенно, если поисковыми работами заняты расчетчики, то есть люди, серьез владеющие навыками программирования.

Что касается задачи разработки в общем смысле, для ее автоматизации в пл расчетно-теоретического поиска и обоснования, очевидно, необходимы некие спе альные моделирующие системы. Такие системы должны обеспечить:

— автоматизацию создания и корректировки математических моделей и сис отображения информации (мнемосхем, графиков и т.п.), в том числе вследствие дификации, замены оборудования или усовершенствования систем моделируемых о ектов;

— проведение исследований нормальных и аварийных режимов работы разра тываемого объекта.

При этом следует подчеркнуть, что все эти работы должны выполняться специалистами, не являющимися профессионалами в области математического моделирования и моделирующих систем.

Моделирующие системы, удовлетворяющие указанным требованиям и называемые расчетно-моделирующими комплексами, должны включать в себя:

— автоматизированные системы интерактивной генерации математических моделей на алгоритмических языках высокого уровня по технологическим схемам, первичным математическим описаниям физических процессов и другим средствам отображения информации в доступной и удобной для конкретного пользователя форме;

— проектные графические базы данных, в которых должны содержаться все необходимые для моделирования характеристики оборудования, точек контроля и датчиков контрольно-измерительных приборов, технологические схемы, алгоритмы управления, блокировок и защит, алгоритмы обработки и отображения информации, предназначенной для оперативного персонала, и другие данные, предназначенные для интерактивной генерации и модификации математических моделей;

— системы организации и поддержки проектных графических баз данных, обеспечивающих взаимодействие с ними пользователей с помощью текстовых и графических редакторов с эффективным контролем вводимой информации;

— системы автоматической генерации выходных форм информации для представления ее различным категориям пользователей на экранах дисплеев в графическом или текстовом виде.

Для разработчиков систем автоматического регулирования и управления в моделирующих комплексах используются упрощенные математические модели, но при этом добавляется ряд специфических функциональных возможностей, для реализации которых применяется набор программ синтеза и оптимизации систем управления.

Моделирующие комплексы, предназначенные для испытаний систем автоматического регулирования и управления, должны иметь системы сопряжения с реальной аппаратурой управления и защиты. В этом смысле они имеют много общего с полномасштабными тренажерами.

СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В СОЗДАНИИ АНАЛИЗАТОРОВ И МОДЕЛИРУЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ РАЗРАБОТЧИКОВ

Одной из первых удачных попыток создания расчетно-моделирующего комплекса для разработчика ядерной энергетической установки является созданный в РНЦ «Курчатовский институт» для главного конструктора энергоустановки НИКИЭТ комплекс [2].

Сейчас возможности по созданию подобных комплексов, как и возможности самих создаваемых комплексов, значительно расширились. Это обусловлено, главным образом, новейшими достижениями в области технологий математического моделирования и моделирующих систем. Созданная в РНЦ «Курчатовский институт» технология АИС-95 [1] явилась основой разработки новой технологии создания тренажеров, анализаторов безопасности и моделирующих комплексов для коммерческих продуктов различного класса и областей применения.

Технология АИС-95 была разработана, опираясь на опыт создания полномасштабных тренажеров и больших моделирующих комплексов для объектов тепловой и ядерной энергетики.

В числе главных особенностей технологии АИС-95 необходимо отметить следующие:

— возможность моделировать сложные системы, осуществлять модификации, отлаживать или вносить изменения в математические модели без программирования с

использованием графического рисования на экране компьютера на основе библиоте объектов, макрообъектов и совокупности связей между ними;

— обеспечение возможности графического представления моделируемой систе в виде, максимально приближенном к проектной документации для этой системы (фу кциональные логические диаграммы, релейные схемы, технологические схемы, и мерные представления и т.п.);

— редактирование математических моделей в режиме NON- STOP, позволяющ пользователям и разработчикам немедленно видеть, как модификации или усов шенствование модели влияют на результаты моделирования;

— функциональное разложение сложных объектов (например, разложение сло ных механизмов на модели гидравлики, электрической системы, системы наблюде и управления и т.д.) и их автоматическая интеграция;

— обеспечение среды разработки моделирующих комплексов, тренажеров д команды (группы) разработчиков, опирающихся на единый стандарт ведения проек с использованием объектно-ориентированной технологии;

— использование единого, простого и удобного в использовании визуального гр фического интерфейса с развитой системой отображения информации в различн формате (числовом, табличном, текстовом, в виде двумерных и трехмерных графико широкое использование различных форм анимации;

— открытость системы для существующих законченных кодов, программ, библ отек моделей, разработанных с использованием алгоритмических языков FORTRA C, C++ и для разработки новых;

— открытый интерфейс, обеспечивающий возможность использования промы ленных стандартов ввода-вывода для создания компьютеризированных техническ комплексов (тренажеров, систем мониторинга энергетических объектов, централи ванных систем управления и т.п.);

— поддержка концепции реального времени, обеспечивающая возможность и пользования рассматриваемой технологии при разработке полномасштабных тре жеров и информационно-управляющих комплексов для энергетических объектов р личного назначения;

— автоматизация составления проектной документации и ведение справочной с стемы.

Что касается степени «наполнения» этой технологии в плане ее применимос для создания моделирующих комплексов объектов энергетики, здесь необходимо о метить, что уже сейчас в рамках АИС-95 реализовано значительное число унив сальных кодов моделирования того или иного оборудования энергоблоков, в чис главных из которых можно отметить следующие:

— комплекс расчетных кодов моделирования нестационарных нейтронно-физ ческих процессов в ядерных энергоустановках;

— теплогидравлический программный комплекс, разработанный на базе тепл гидравлического модуля KOBRA [2—6];

— инструментарий для разработки моделей котлов различного типа (примен тельно к объектам тепловой энергетики), включая моделирование систем подготов и подачи топлива и модель воздушного тракта котла;

— инструмент для разработки моделей многоступенчатых паровых турбоагрегат энергоустановок, включающий в свой состав модели вспомогательных систем (вал поворотное устройство, маслосистемы, системы гидроуплотнений) и модели управл ния турбиной;

— библиотеку объектов для моделирования различных типовых элементов эне гооборудования (теплообменные устройства, деаэраторы, подогреватели высокого низкого давлений, конденсаторы и т.п.);

— инструментарий моделирования электрических систем энергоблоков, включ процессы генерации, распределения и потребления электроэнергии;

— инструментарий функциональной логики, обеспечивающий создание логических диаграмм, которые применяются при моделировании широкого спектра процессов энергетических установках (схемы контроля, управления и защит, имитационное моделирование физических процессов);

— инструментарий релейной логики, предназначенный для реализации моделей управления оборудованием и схем защит энергоблоков в виде, максимально приближенном к проектной документации.

Таким образом, в рамках технологии АИС-95 имеется достаточно полный набор средств для моделирования современных ядерных и тепловых энергоблоков.

Благодаря созданной и представленной выше технологии создания моделирующих комплексов были достигнуты следующие цели:

— максимальное распараллеливание работ при осуществлении проектирования;

— минимизация трудозатрат и временных затрат при разработке проектов;

— минимизация требований к степени подготовленности разработчиков;

— предоставление максимальных возможностей заказчикам по внесению усовершенствований в разработки своими силами;

— использования данной технологии для разработки проектов различного класса и назначения (от обучающих систем персонального использования до полномасштабных тренажеров тепловых и атомных электростанций).

В настоящее время технология АИС–95 успешно внедряется на рынке тренажеров и моделирующих комплексов.

В 1997—1998 гг. РНЦ «Курчатовский институт» совместно с компанией Science Applications International Corporation (США) выиграл ряд конкурсов на разработку тренажеров для тепловых энергоблоков и модернизацию тренажеров ядерных энергоблоков, расположенных на территории США. Все эти проекты реализуются на базе технологии АИС-95, представляемой на рынке США под маркой SimPort. Два из этих проектов (тренажеры для тепловых станций SHERCO и Armstrong) выполнены, сданы заказчику и сейчас находятся в стадии опытной эксплуатации.

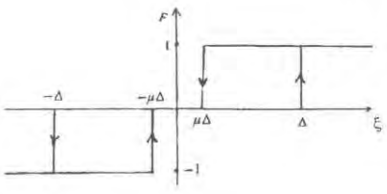
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последнее время возможности автоматизации проектирования вновь создаваемых и модернизации действующих энергоустановок значительно расширились благодаря успехам в области создания РМК для разработчиков объектов энергетики, что в свою очередь обусловлено, главным образом, успехами в области технологий математического моделирования и моделирующих систем, одним из ярких представителей которых является технология АИС-95.

Представленная технология АИС-95 обеспечивает выполнение всех концептуальных требований, предъявляемых к РМК для разработчиков объектов энергетики, и позволяет сделать еще один значительный шаг в автоматизации проектирования таких объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Яковлев К.Г., Малкин С.Д. и др.** Автоматизированная интерактивная система создания математических моделей для тренажеров и анализаторов. — В кн.: Тез. лекций и докладов школы-семинара секции динамики «Интегрированные математические модели и программные комплексы в ядерной энергетике». — М.: МИФИ, 1998, с. 327—330.
2. **Ганжинов А.М., Галкин В.В., Жигунов С.В. и др.** Расчетно-моделирующий комплекс. Руководство пользователя. Отчет РНЦ «Курчатовский институт», инв. № 31.2/1-1625-91, 1991.
3. **Краюшкин А.В., Токаренко В.Ф. и др.** Трехмерная нейтронно-теплогидравлическая модель и программа для исследования быстрых нестационарных процессов в РБМК. Отчет РНЦ «Курчатовский институт», инв. № 33Р/1-282-88, 1988.



Р и с. 1. Релейная характеристика с зоной нечувствительности и петлей гистерезиса

Обозначая

$$B = \begin{pmatrix} [M^2\nabla^2 + (k_\infty^* - 1) - \beta]/l; & \lambda_j/l; & \Phi^* b^{\mathrm{T}}/l \\ \beta_j; & -\lambda_j; & 0 \\ d; & 0; & P \end{pmatrix}; \quad z^T = (\varphi, c_j, u^{\mathrm{T}}) \in Q$$

$$h_i^T = \left(\frac{\Phi^*}{l\overline{\Phi}}\Psi_i, 0, 0\right),$$

перепишем систему (1)—(3) в виде

$$\dot{z} = Bz + \sum_{i=1}^{k} h_i \sigma_i .$$

Предположим, что без системы регулирования реактор колебательно-неустойчи относительно нескольких пространственных мод, то есть у оператора B имеется к нечное число комплексно-сопряженных собственных значений $s_i = a_i \pm i\omega$ движ $i = 1, \ldots m$ с положительной действительной частью $a_i > 0$. Остальной спектр операто B считаем лежащим слева от мнимой оси на комплексной плоскости. Собственны функции оператора B^*, сопряженного к B, отвечающие значениям $a_i \pm i\omega_i$, обозначи

$$z_i = z_i^1 + iz_i^2;\ z_i^{1T} = (l\varphi_i^1, c_{ji}^1, u_i^{1\mathrm{T}});\ z_i^{2T} = (l\varphi_i^2, c_{ji}^2, u_i^{2\mathrm{T}});\ i = 1, \ldots m.$$

Они удовлетворяют соотношениям

$$B^* z_i^1 = a_i z_i^1 - \omega_i z_i^2;\ B^* z_i^2 = \omega_i z_i^1 + a_i z_i^2;\ i = 1, \ldots m.$$

Введем функционалы

$$x_i = (z_i^1, z) = l\int_\Omega \varphi_i^1(r)\varphi(r, t)d\omega + \sum_{j=1}^{6}\int_\Omega c_{ji}^1(r)c_j(r, t)d\omega + \int_\Omega u_i^{1\mathrm{T}}(r)u(r, t)d\omega;$$

$$y_i = (z_i^2, z) = l\int_\Omega \varphi_i^2(r)\varphi(r, t)d\omega + \sum_{j=1}^{6}\int_\Omega c_{ji}^2(r)c_j(r, t)d\omega + \int_\Omega u_i^{2\mathrm{T}}(r)u(r, t)d\omega. \quad (10$$

Дифференцируя x_i, y_i в соответствии с (6), (7), получим подсистему

$$\dot{x}_i = a_i x_i - \omega_i y_i + \sum_{j=1}^{k}\delta_{ij}\sigma_j;\ \delta_{ij} = (z_i^1, h_j) = \left(\int_\Omega \varphi_i^1(r)\Phi^*(r)\psi_j(r)d\omega\right)/\overline{\Phi};$$

$$\dot{y}_i = \omega_i x_i + a_i y_i + \sum_{j=1}^{k} e_{ij}\sigma_j;\ e_{ij} = (z_i^2, h_j) = \left(\int_\Omega \varphi_i^2(r)\Phi^*(r)\psi_j(r)d\omega\right)/\overline{\Phi},$$

описывающую поведение исходной системы в ее неустойчивом инвариантном мног образии R^{2m}. В бесконечномерном устойчивом инвариантном многообразии Q ($Q = R^{2m} + Q_0$) поведение системы (6), (7) описывает подсистема

$$\dot{z}_0 = B^- z_0 + \sum_{j=1}^{k} h_j^- \sigma_j,\ z_0 \in Q_0,$$

где B^- — сужение оператора B на Q_0, а h_j^- — проекция h_j на Q_0.

Обозначим $x = (x_1, \dots x_m)$; $y = (y_1, \dots y_m)$; $\sigma = (\sigma_1, \dots \sigma_k)$ и введем матрицы $D = \{\delta_{ij}\}$, $E = \{e_{ij}\}$ порядка $m \times k$ и диагональные матрицы $m \times m$ $A = \mathrm{diag}(a_1, \dots a_m)$, $W = \mathrm{diag}(\omega_1, \dots \omega_m)$.

Тогда в векторном виде подсистема (11) примет вид

$$\dot{x} = Ax - Wy + D\sigma; \; \dot{y} = Wx + Ay + E\sigma. \tag{13}$$

Управляющие сигналы ξ_i возьмем в виде

$$\xi_i = \sigma_i + \sum_{j=1}^{m} \varkappa_{ij} x_j + \sum_{j=1}^{m} \gamma_{ij} y_j \; ; \; i = 1, \dots k, \tag{14}$$

где $\varkappa_{ij}$, $\gamma_{ij} = \mathrm{const}$; x_j, y_j — функционалы вида (9), (10). В этом случае движения подсистемы (4), (5), (12), (14) не влияют на движения подсистемы (4), (5), (13), (14). Поэтому характер автоколебаний и их характеристики в распределенной системе (4)—(7), (9), (10),(14) полностью определяются автоколебаниями конечномерной подсистемы (4), (5), (13), (14). При этом задача синтеза управления сводится к выбору коэффициентов $\varkappa_{ij}$, γ_{ij}, обеспечивающих требуемые характеристики установившихся движений в системе (4), (5), (13), (14).

При идеальной релейной характеристике $F = \mathrm{sign}\, \xi_i$ в системе (4), (13), (14) на поверхностях

$$\sigma_i = -\sum_{j=1}^{m} \varkappa_{ij} x_j - \sum_{j=1}^{m} \gamma_{ij} y_j \; ; \; i = 1, \dots k \tag{15}$$

возникают скользящие движения. Уравнения скользящего режима получаются после подстановки соотношений (15) в (13) и имеют вид

$$\dot{x} = Ax - Wy + D(-\mathrm{K}x - \Gamma y); \; \dot{y} = Wx + Ay + E(-\mathrm{K}x - \mathrm{y}), \tag{16}$$

где через K и Γ обозначены матрицы $\mathrm{K} = \{\varkappa_{ij}\}$, $\Gamma = \{\gamma_{ij}\}$ порядка $k \times m$ $(i = 1, \dots k; j = 1, \dots m)$. Релейная система (4), (13), (14) при $F = \mathrm{sign}\, \xi_i$ устойчива, если устойчивы ее движения в скользящем режиме, т.е., если устойчива линейная система (16). Введем матрицу

$$G = \begin{pmatrix} A - D\mathrm{K}; & -W - D\Gamma \\ W - E\mathrm{K} & A - E\Gamma \end{pmatrix} \tag{17}$$

и обозначим ее собственные значения через s_i^0. Будем считать, что управление (14) выбрано так, что скользящий режим устойчив, то есть $\mathrm{Re}\, s_i^0 < 0$ для всех $i = 1, \dots 2m$. В случае характеристики (5) при $\Delta > 0$ скользящие движения в релейной системе исчезают, но при малых $\Delta > 0$ движения системы (4), (5), (11), (14) происходят вблизи поверхностей $\xi_i = 0$ и с течением времени попадают в множество, размеры которого стремятся к нулю при $\Delta \Rightarrow 0$, и в котором происходят установившиеся движения. Ими в силу неустойчивости объекта регулирования могут быть только автоколебания — периодические или стохастические.

Важной характеристикой автоколебаний является частота введения управляющего воздействия. В режиме стохастических колебаний эта частота оказывается существенно меньшей, чем в режиме периодических колебаний. Это объясняется тем, что в случае хаоса происходят многократно повторяющиеся раскручивания спиралей из состояний равновесия систем (11) при $\sigma_j = \mathrm{const}$, во время которых переключения реле не происходят. Чем ближе траектория попадает к состоянию равновесия, тем дольше спираль раскручивается, и тем реже вводится управление. Периодическим колебаниям соответствует предельный цикл, составленный из отрезков траекторий, которые к состо-

яниям равновесия не приближаются. Поэтому длительные интервалы времени б
включения системы регулирования не реализуются, и частота введения управлен
оказывается большей, чем в случае хаоса.

Частота введения управления является одним из критериев качества системы р
гулирования. Чем она меньше, тем меньше изнашиваются механизмы, приводящ
в движение регулирующие органы. Поэтому параметры в (14), определяющие упра
ляющие сигналы ξ_i, следует выбирать так, чтобы реализовался стохастический, а
периодический режим.

В случае, когда неустойчивость объекта регулирования обусловлена только одн
парой корней $a_1 \pm i\omega_1$, $a_1 > 0$ ($m = 1$) и система регулирования односвязная ($k = 1$
задача синтеза стохастических режимов решена в работах [2, 3]. Определено в [2,
— каким для возникновения хаоса должно быть соотношение между корням
$a_1 \pm i\omega_1$, определяющими нарастание колебаний в неустойчивом объекте, и корням
$s^0_{1,2}$, определяющими движения идеального скольжения. Показано, в частности, ч
при $s^0_{1,2} = a^0_1 \pm i\omega^0_1$ ($a^0_1 < 0$) хаос возникает, если между a^0_1, a_1, ω^0_1, ω_1 выполнены с
отношения $0 < \omega^0_1 < \omega_1/k_0$; $0 < -a^0_1 < \omega_1/k_0$, где коэффициент $k_0 > 1$ зависит
$\Omega_1 = a_1/\omega_1$ и увеличивается с ростом Ω_1.

Оказывается, что этот простой критерий хаоса распространяется и на случай пр
извольных m и k. Хаос в многосвязной системе (4), (5), (13), (14) возникает, ес
параметры $\varkappa_{ij}$, γ_{ij} в (14) подобраны так, то матрица (17) системы (16), описывающ
идеальное скольжение, имеет m пар комплексно-сопряженных собственных значен
$s^0_i = a^0_i \pm i\omega^0_i$, $a^0_i = 0$, $i = 1, \ldots m$, которые связаны с корнями $a_i \pm i\omega_i$ соотношениям

$$0 < \omega^0_i < \omega_i/k^i_0;\ 0 < -a^0_i < \omega_i/k^i_0;\ k^i_0 > 1;\ i = 1, \ldots m. \qquad (1$$

Коэффициенты $k^i_0(\Omega_i) > 1$ зависят от $\Omega_i = a_i/\omega_i$ и растут с ростом Ω_i ($k^i_0 \simeq 1{,}15$ пр
$\Omega_i = 0{,}05$; $k^i_0 \simeq 1{,}3$ при $\Omega_i = 0{,}1$; $k^i_0 \simeq 1{,}6$ при $\Omega_i = 0{,}25$). Если соотношения (18) н
рушаются и выполняется $\omega^0_i > \omega_i$ при $a^0_i < 0$, то в релейной системе возникают выс
кочастотные периодические режимы.

Отметим, что при выполнении (18) хаос в системе (4), (5), (11), (14) возникае
если достаточно велики скорости введения управления V_i, и не слишком велика в
личина $|\mu|$ (лучшее значение для хаоса $\mu = 0$; при $\mu = \pm 1$ хаос не возникает). Р
гулировать (уменьшать или увеличивать) амплитуду стохастических автоколебан
можно путем уменьшения или увеличения зоны нечувствительности Δ, от которо
(при достаточно больших V_i) не зависит ни характер автоколебаний ни частота вв
дения управления.

В случае $m \geq 1$, $k = 1$ (односвязная система регулирования) вектор
$K = (\varkappa_{11}, \ldots, \varkappa_{1m})$, $\Gamma = (\gamma_{11}, \ldots \gamma_{1m})$, определяющие единственный управляющий си
нал ξ_1, однозначно вычисляются по заданным корням $a^0_i \pm i\omega^0_i$ из системы $2m$ линейны
уравнений. Эта система получается путем приравнивания коэффициентов при равны
степенях характеристического уравнения $\det(G - sI) = 0$ и того же уравнения, зап
санного в виде $\prod_{i=1}^{m} [s^2 + 2a^0_i s + (a^0_i)^2 + (\omega^0_i)^2] = 0$.

При $k > 1$ матрицы K, Γ всегда можно подобрать по заданным корням $a^0_i + i\omega$
но не единственным образом.

Рассмотрим частный случай $m = k$, $k > 1$, $E = 0$. Тогда K и Γ можно выбрать
условия, что матрицы $-DK$ и $-D\Gamma$ являются диагональными

$$-D\mathrm{K} = \Theta = \mathrm{diag}(\theta_1, \ldots, \theta_m);\ -D\Gamma = \mathrm{H} = \mathrm{diag}(\eta_1, \ldots, \eta_m);\ \mathrm{K} = -D^{-1}\Theta;\ \Gamma = -D^{-1}\mathrm{H}. \tag{19}$$

При выполнении (19) система (16) разбивается на m не связанных между собой подсистем второго порядка

$$\dot{x}_i = (a_i + \theta_i)x_i - (\omega_i - \eta_i)y_i;\ \dot{y}_i = \omega_i x_i + a_i y_i;\ i = 1, \ldots, m.$$

Каждой подсистеме отвечает заданная пара корней $a_i^0 \pm i\omega_i^0$, если коэффициенты θ_i, η_i в (19) равны

$$\theta_i = 2(a_i^0 - a_i);\ \eta_i = [(a_i)^2 + (\omega_i)^2 - (a_i^0)^2 - (\omega_i^0)^2 + 2a_i(a_i^0 - a_i)]/\omega_i. \tag{20}$$

Соотношения (18)—(20) реализуют процедуру синтеза управления в случае $m = k$, $k > 1$, $E = 0$.

Если матрицы K и Γ подобраны так, что управление (14) обеспечивает стохастический режим в конечномерной подсистеме (4), (5), (13), то тот же стохастический режим — с той же частотой введения управления реализуется и в исследуемой распределенной системе (4)—(7) при управлении (9), (10), (14). Для определения собственных функций z_i^1, z_i^2, используемых при вычислении функционалов (9), (10), имеются эффективные численные методы [6]. Если σ_i, c_i и u недоступны для измерения, то их можно получить из φ с помощью корректирующих звеньев, соответствующих уравнениям (1), (2). Тогда управляющие сигналы ξ_i можно сформировать используя значения только одной переменной $\varphi(r, t)$.

В качестве примера рассмотрим одномерную модель реактора с одной группой запаздывающих нейтронов, обратной связью, описываемой уравнением второго порядка, и регуляторами, вносящими реактивность в заданных точках

$$l\frac{\partial\varphi}{\partial t} = \frac{M^2}{H^2}\frac{\partial^2\varphi}{\partial\xi^2} + \frac{M^2\pi^2}{H^2}\varphi - bu_1 + \sum_{j=1}^{k}\delta(\xi - \xi_j^*)\sigma_j + \lambda c - \beta\varphi; \tag{21}$$

$$\partial c/\partial t = -\lambda c + \beta\varphi;\ \varphi(0) = \varphi(1) = 0; \tag{22}$$

$$\partial u_1/\partial t = u_2;\ \partial u_2/\partial t = -\rho\nu u_2 - \rho^2 u_1 + \rho^2\varphi, \tag{23}$$

где $\xi \in [0, 1]$ — координата реактора; H — его линейный размер; $(u_1, u_2) \in R^2$; ρ, ν, $b = \mathrm{const}$; ξ_j^* — точка введения реактивности j-м регулятором. Зафиксируем параметры

$$l = 10^{-4}\ \mathrm{c},\ \beta = 0{,}0065,\ \lambda = 0{,}1\ \mathrm{c}^{-1};\ \rho = 0{,}1,\ \nu = 0{,}1;\ b = 5\beta. \tag{24}$$

Собственные значения операторов B, B^*, системы (21)—(23) определяются из характеристического уравнения i-й гармоники

$$ls + \beta s/(s + \lambda) + b\rho^2/(s^2 + \rho\nu s + \rho^2) = -\mu_i;\ i = 1, \ldots, \tag{25}$$

где μ_i удовлетворяют краевой задаче

$$(M^2/H^2)d^2\varphi/d\xi^2 + (M^2/H^2)\pi^2\varphi = -\mu\varphi;\ \varphi(0) = \varphi(1) = 0;$$
$$\mu_i = (M^2/H^2)\pi^2(i^2 - 1);\ \varphi_i = \varphi_i^1 = \sin\pi_i\xi;\ \varphi_i^2 = 0. \tag{26}$$

Параметры (24) выбраны так, что при $\mu_i = 0$ $(i = 1)$ уравнение (25) имеет корни $s_1 = a_1 \pm i\omega_1 = 0{,}0334 \pm i0{,}253$ $(a_1 > 0)$, т.е. основная гармоника $\sin\pi\zeta$ колебательно-неустойчива. При малых значениях M^2/H^2 (в случае реактора больших размеров) величины μ_i оказываются такими, что уравнение (25) имеет корни $s_i = a_i \pm i\omega_i$ с

$a_i > 0$ и при $i > 1$. Число колебательно-неустойчивых гармоник тем больше, чем мень M^2/H^2. Это число совпадает с номером i, для которого $\mu_i < \mu^* = 3{,}2\,\beta$, $\mu_i = \mu^* = 3{,}2\,\beta$ значение, при котором уравнение (25) имеет пару мнимых корн $\pm i\omega_0 = \pm i0{,}15$. Границей устойчивости i-й гармоники по параметру M^2/H^2 являет значение $M^2/H^2 = \mu^*/[\pi^2(i^2 - 1)]$. Вторая ($i = 2$) и третья ($i = 3$) гармоники ста вятся неустойчивыми при $M^2/H^2 = 0{,}000702$ и $M^2/H^2 = 0{,}000263$ соответственно.

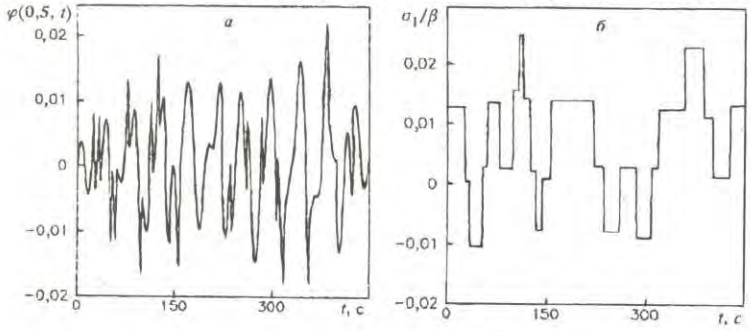
Собственные функции (8) z_i^1, z_i^2 для оператора B^* системы (21)—(23) и функц оналы (9), (10) имеют вид

$$z_i^{1\mathrm{T}} = (l\varphi_i;\ \lambda_i^1\varphi_i;\ b_{1i}^1\varphi_i;\ b_{2i}^1\varphi_i);\quad z_i^{2\mathrm{T}} = (0;\ \lambda_i^2\varphi_i;\ b_{1i}^2\varphi_i;\ b_{2i}^2\varphi_i);$$

$$x_i = \int_0^1 \varphi_i(\zeta)\left[l\varphi + \lambda_i^1 c + b_{1i}^1 u_1 + b_{2i}^1 u_2\right]d\zeta;\quad y_i = \int_0^1 \varphi_i(\zeta)\left[\lambda_i^2 c + b_{1i}^2 u_1 + b_{2i}^2 u_2\right]d\zeta,$$

где $\varphi_i = \sin\pi i\zeta$, а $\lambda_i^1, b_{1i}^1, b_{2i}^1, \lambda_i^2, b_{1i}^2, b_{2i}^2$ — константы, вычисляемые по легко получаем аналитическим формулам, в которые входят параметры b, ρ, ν и значения a_i, ω_i. К эффициенты (11) матриц D и E записываются в виде $\varkappa_{ij} = \sin\pi i\zeta_j^*$; $e_{ij} = 0$.

Выберем значение $M^2/H^2 = 0{,}000329$, при котором неустойчивы две гармони (второй гармонике отвечают корни $s_2 = a_2 \pm i\omega_2 = 0{,}0061 \pm i0{,}177$). Пусть стабил зацию нейтронного поля осуществляет один регулятор ($k = 1$), вносящий реактивнос в точке $\zeta_1^* = 1/4$. В этом случае в уравнении (16) четвертого порядка име $D^{\mathrm{T}} = (\delta_{11}, \delta_{21}) = (0{,}707;\ 1)$; $E^{\mathrm{T}} = (e_{11}, e_{21}) = (0,\ 0)$. Константы в (27) равн $\lambda_1^1 = 0{,}163$; $b_{11}^1 = -0{,}027$; $b_{21}^1 = 0{,}544$; $\lambda_1^2 = -0{,}309$; $b_{11}^2 = 0{,}146$; $b_{21}^2 = 0{,}20$ $\lambda_2^1 = 0{,}247$; $b_{12}^1 = -0{,}024$; $b_{22}^1 = 1{,}46$; $\lambda_2^2 = -0{,}415$; $b_{12}^2 = 0{,}264$; $b_{22}^2 = 0{,}269$. Потреб ем, чтобы между корнями $a_i^0 \pm i\omega_i^0$, $i = 1, 2$, определяющими скользящий режим, корнями $a_i \pm i\omega_i$, $i = 1, 2$, соответствующими двум неустойчивым гармоникам, вы полнялись соотношения (18) $\omega_i^0 = \omega_i/2$; $a_i^0 = -\omega_i/4$, $i = 1, 2$. Тогда в результате оп санной выше процедуры синтеза из системы линейных уравнений четвертого поряд получим векторы $\vec{K} = (\varkappa_{11}, \varkappa_{12}) = (0{,}5882, -0{,}1215)$; $\vec{\Gamma} = (\gamma_{11}, \gamma_{12}) =$ $= (-0{,}2578, -0{,}0011)$, определяющие единственный управляющий сигнал ξ_1 вида (14 Такой управляющий сигнал при параметрах регулятора $V_1 = 0{,}01\,\beta/\mathrm{c}$.; $\Delta = 0{,}01$ $\mu = 0$ приводит к стохастическому режиму в системе (4), (5), (14), (21)—(23), (27 Хаотические колебания $\varphi(\zeta, t)$ в точке $\zeta = 0{,}5$ и изменение $\sigma_1(t)$ показаны на рис. Кривые получены путем численного интегрирования системы с помощью разностно



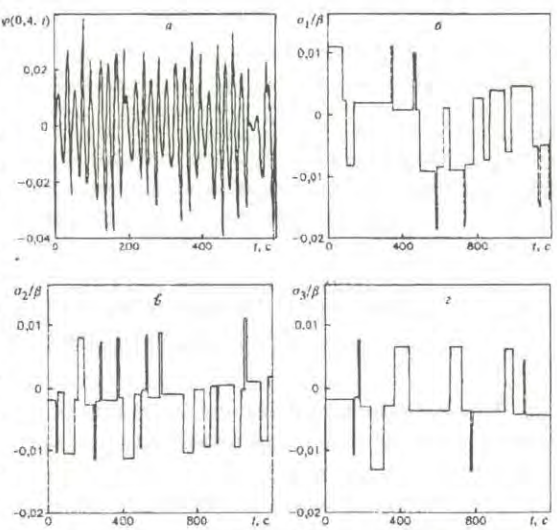
Р и с. 2. Хаотические кол бания нейтронного потока точке $\zeta = 0{,}5$ (*а*) и соотв ствующее им перемещен регулирующего органа (*б*

схемы, использующей разбиение отрезка $\zeta \in [0, 1]$ на достаточно большое число частей. Как видно из рис. 2, отклонение потока нейтронов не превышает 3%-ного стационарного значения. Среднее время между введением управляющего воздействия составляет $\tau_{ср} \simeq 18$ с. В периодических режимах, возникающих при неправильном выборе управляющего сигнала, частота введения управления существенно выше. Так, если провести процедуру синтеза при нарушении условий (18), например, при $\omega_i^0 = 1{,}5\omega_i$; $a_i^0 = -0{,}75\omega_i$; $i = 1, 2$, то получим периодические колебания с $\tau_{ср} \simeq 4$ с.

Выберем теперь значение $M^2/H^2 = 0{,}000165$, при котором неустойчивы три гармоники. Второй и третьей гармоникам отвечают корни $s_2 = a_2 \pm i\omega_2 = 0{,}0135 \pm i0{,}2024$ и $s_3 = a_3 \pm i\omega_3 = 0{,}00346 \pm i0{,}167$. Для стабилизации трех гармоник ($m = 3$) используем три регулятора ($k = 3$), вносящих реактивность в точках $\zeta_1^* = 1/4$, $\zeta_2^* = 1/2$, $\zeta_3^* = 3/4$. В этом случае в системе (16) шестого порядка имеем матрицы $D = \begin{pmatrix} 0{,}707; & 1; & 0{,}707 \\ 1; & 0; & 1 \\ 0{,}707; & -1; & 0{,}707 \end{pmatrix}$ и $E = 0$. Константы в (27) равны $\lambda_1^1 = 0{,}163$; $b_{11}^1 = -0{,}027$; $b_{21}^1 = 0{,}544$; $\lambda_1^2 = -0{,}309$; $b_{11}^2 = 0{,}146$; $b_{21}^2 = 0{,}201$; $\lambda_2^1 = 0{,}21$; $b_{12}^1 = -0{,}026$; $b_{22}^1 = 1$; $\lambda_2^2 = -0{,}375$; $b_{12}^2 = 0{,}208$; $b_{22}^2 = 0{,}244$; $\lambda_3^1 = 0{,}268$; $b_{13}^1 = -0{,}023$; $b_{23}^1 = 1{,}77$; $\lambda_3^2 = -0{,}432$; $b_{13}^2 = 0{,}3$; $b_{23}^2 = 0{,}281$. Синтез управления осуществим по формулам (19), (20) при соотношениях (18) вида $\omega_i^0 = \omega_i/2$; $a_i^0 = -\omega_i/4$; $i = 1, 2, 3$. В результате получим матрицы

$$K = \begin{pmatrix} 0{,}0683; & 0{,}0641; & 0{,}032 \\ 0{,}0966; & 0; & -0{,}0452 \\ 0{,}0683; & -0{,}0641; & 0{,}032 \end{pmatrix}; \quad \Gamma = \begin{pmatrix} -0{,}054; & -0{,}0657; & -0{,}0399 \\ -0{,}0764; & 0; & 0{,}0565 \\ -0{,}054; & 0{,}0657; & -0{,}0399 \end{pmatrix},$$

определяющие три управляющих сигнала ξ_1, ξ_2, ξ_3 вида (14). Такие сигналы при $V_i = 0{,}01\,\beta$/с.; $i = 1$—3; $\Delta = 0{,}01\,\beta$; $\mu = 0$ реализуют стохастический режим в системе (4), (5), (14), (21)— (23), (27). Хаотические колебания $\varphi(\zeta, t)$ в точке $\zeta = 0{,}4$ и изменения $\sigma_1(t)$, $\sigma_2(t)$, $\sigma_3(t)$ показаны на рис. 3. Как видно из рисунка, отклонение потока нейтронов не превышает 4%-ного стационарного значения. Средние времена между последовательными введениями управления составляют $\tau_{ср}^1 \simeq 60$ с, $\tau_{ср}^2 \simeq 40$ с, $\tau_{ср}^3 \simeq 60$ с для первого, второго и третьего регуляторов соответственно. Реализация той же процедуры синтеза при нарушении условий (18) приводит к высокочастотным периодическим режимам. Например, при $\omega_i^0 = 1{,}5\omega_i$; $a_i^0 = -0{,}75\omega_i$; $i = 1$—3 получаются значения $\tau_{ср}^i \simeq 5$ с, $i = 1$—3. Таким образом, за счет реализации стохастического режима удается понизить частоту введения управления приблизительно в 10 раз.



Р и с. 3. Хаотические колебания нейтронного потока в точке $\zeta = 0{,}4$ (*а*) и соответствующие им перемещения трех регулирующих органов (*б*—*г*)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Постников Н.С.** Стохастические колебания в ядерном реакторе с релейной системой регулирования. Атомная энергия, 1994, т. 76, вып. 1, с. 3—11.
2. **Постников Н.С.** Синтез релейных систем регулирования ядерного реактора. — Там же, 1996, т. вып. 6, с. 421—428.
3. **Постников Н.С.** Стохастичность релейных систем с гистерезисом. — Автоматика и телемеханика, 19 № 3, с. 57—68.
4. **Емельянов И.Я., Гаврилов П.А., Селиверстов Б.Н.** Управление и безопасность ядерных энергетическ реакторов. — М.: Атомиздат, 1975.
5. **Филипчук Е.В., Потапенко П.Т., Постников В.В.** Управление нейтронным полем ядерного реактора. М.: Энергоиздат, 1981.
6. **Торлин Б.З.** Пространственная устойчивость реактора с регуляторами. — В кн.: Динамика ядерн реакторов. Ч. 4. — М.: Энергоатомиздат, 1990, с. 283—393.

Статья поступила в редакцию 13 июля 1999

Вопросы атомной науки и техник

Сер. Физика ядерных реакторов, 1999, вып. 2, с. 50—5

УДК 681.3

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ СТЕНДОВЫХ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

А.М. Иванников, А.Е. Карусев, Н.А. Ростов,
Научно-исследовательский институт им. А.П. Александрова,
188537, Сосновый Бор, Ленинградская обл.

Выделены измерительно-вычислительные комплексы (ИВК) стендовых ядерных энергетическ установок (ЯЭУ), ИВК автоматизации натурных испытаний (АНИС) как специфический объект метрол гического обеспечения. Метрологическое обеспечение комплексов АНИС предлагается строить на базе общ методических разработок существовавшей системы МО информационно-измерительных систем (ИИС), о нованной на аттестации и последующей периодической калибровке. Приведены результаты разработк бездемонтажных методов определения метрологических характеристик (МХ) для каналов измерения уров теплоносителя, давления в реакторе и каналов измерения внутриреакторных температур.

METROLOGICAL SUPPORT FOR MEASURING-COMPUTATIONAL COMPLEXES OF STAND NPP'S. A.M. IVANNIKOV, A.E. KAROUSEV, N.A. ROSTOV. Computer measuring systems for bench nuclear energ installations (CMS ANIS) has been separated as a specific object of metrological ensuring. Metrological ensuri of CMS ANIS is proposed to construct on the base of general methodical developments of earlier existent metrologic ensuring for information measuring systems, based on the certification and the following periodical check up. Resul of development of some takedownless method for standardization measures are considered. The takedownless metho for channels that measure level of heat coolant, pressure and temperature into reactor are given.

ИВК СТЕНДОВЫХ ЯЭУ — СПЕЦИФИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

При исследовании полномасштабных стендовых ЯЭУ в настоящее время невоз можно обойтись без использования специально разработанных ИВК на базе мощны вычислительных средств. Такие ИВК являются частью автоматизированных систе научных исследований, которые представляют собой аппаратно-программные комп лексы на основе средств вычислительной техники, предназначенные для автоматиза ции научных исследований [1]. При решении вопросов метрологического обеспечени ИВК стендовых ЯЭУ необходимо учитывать ряд особенностей, выделяющих их сред других измерительно-вычислительных систем.

Эти особенности, с одной стороны, определяют сложности метрологического обеспечения таких комплексов, но, с другой стороны, обеспечивают конкретные возможности, использование которых позволяет разработать приемы и методы, облегчающие решение задач метрологического обеспечения.

Исторически сложившееся в НИТИ название для ИВК полномасштабных стендовых ЯЭУ — ИВК АНИС в настоящей статье используется для выделения таких комплексов, как специфического объекта метрологического обеспечения.

Можно выделить следующие особенности, в большей или меньшей степени присущие ИВК АНИС:

1. Состав измеряемых с помощью ИВК параметров ЯЭУ должен обеспечивать полное представление об установке не только в эксплуатационных, но и в любых исследовательских режимах.

2. По различным причинам (ввод новых измерительных каналов (ИК), модернизация существующих и т.д.) состав ИК ИВК, структура отдельных ИК и программное обеспечение комплекса постоянно изменяются.

3. Длительный (месяцы) и непрерывный (без останова) характер эксплуатации ИВК стендовых ЯЭУ, диктуемый режимами и регламентами ведения исследований. Эта особенность не позволяет отключить ИВК от объекта для метрологического обслуживания в произвольные моменты времени.

4. Расположение и способ установки датчиков на стенде во многих случаях не предусматривают возможность доступа к ним для проведения метрологического обслуживания соответствующих ИК, что приводит к необходимости обслуживать отдельно датчик и остальную часть ИК. При этом в большинстве случаев конструкция датчиков вообще не позволяет провести их метрологическое обслуживание даже при останове стенда.

5. ИВК стендовых ЯЭУ являются системой, комплектуемой на месте эксплуатации из различных компонентов и технических средств. В составе ИВК наряду со средствами измерений среднего качества, с погрешностью, достигающей единиц процентов, используется прецизионная измерительная аппаратура, обеспечивающая погрешность, не превышающую 0,01%.

ОБЩИЙ ПОДХОД К МЕТРОЛОГИЧЕСКОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ ИВК АНИС

В данной статье используется широкое понимание термина метрологическое обеспечение в соответствии с ГОСТ 1.25— 76, как установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений. В узком смысле [2] метрологическое обеспечение ограничивается деятельностью метрологических служб.

С точки зрения государственной системы обеспечения единства измерений ИВК АНИС относятся к ИИС. Ранее законодательная база метрологического обеспечения ИИС определялась ГОСТ 8.437—81 [3], ГОСТ 8.326—89 [4] и ГОСТ 8.438—81 [5]. После отмены в 1997 г. ГОСТ 8.326—89 и введения поправок к ПР 50.2.009 [6] метрологические службы юридических лиц лишились права аттестации одиночных средств измерений (СИ) и ИИС, что создало ситуацию, в которой ИИС, входящие в сферу государственного метрологического контроля, вообще могут остаться без юридического статуса, учитывая скудное финансирование НИОКР. До настоящего времени ИВК АНИС не относились к сфере государственного метрологического контроля. Учитывая, что взамен отмененной системы, основанной на аттестации СИ, нового подкрепленного детальными методическими разработками подхода к метрологическому обеспечению в настоящее время не существует, предлагается вне сферы государственного метро-

логического контроля использовать системные методические разработки, приведен
в указанных стандартах и детализованные в других документах ГСИ.

Общий подход поддержан документами второго уровня, дополняющими и у
няющими основные положения государственных стандартов по метрологическому об
печению ИИС (организация и порядок проведения метрологической экспертизы,
тестация, надзор, анализ состояния метрологического обеспечения ИИС, а также н
мирование и расчет метрологических характеристик). Порядок проведения метро
гической аттестации детализован в МИ 2002—89 [7]. К третьему нижнему уро
относятся типовые программы государственных испытаний и метрологической а
стации систем и их компонентов.

Недостатки всего комплекса документов проанализированы в обзоре [8]. Наибо
существенны и важны для настоящего рассмотрения следующие:

— отставание научно-технической документации по метрологическому обеспе
нию ИИС от перспективных направлений развития техники, технологии и методол
измерений;

— нечеткое разделение требований к метрологическому обеспечению на обя
тельные требования и требования рекомендательного характера;

— «жесткий» характер некоторых методических документов по решению мет
логических задач, требования которых невозможно выполнить из-за недоступно
для производственной практики исходной информации.

К излишне «жестким» необходимо в первую очередь отнести следующие поло
ния документов ГСИ:

1. «Результаты измерений, полученные с помощью ИИС, ... не прошедших м
рологическую аттестацию, следует рассматривать как непригодные к использовани
см. ГОСТ 8.437—81 [3].

2. «После аттестации ИИС не допускается вносить изменения в ее измерительн
каналы, а также в средства измерений, входящих в измерительный канал. В противн
случае должна быть проведена переаттестация ИИС, см. МИ 2002—89 [7].

Метрологическое обеспечение ИВК АНИС до настоящего времени осуществлял
в соответствии с требованиями ГСИ. Разработаны специальные методы и средства
преодоления проблем МО.

В целом, сложившийся в НИТИ подход к обеспечению метрологических хар
теристик ИВК АНИС заключается в следующем:

— для разрабатываемого ИК и ИВК определяются расчетно-экспериментальн
методом его метрологические характеристики;

— разрабатывается методика предварительных испытаний ИВК, в которую вкл
чается раздел определения метрологических характеристик оборудования ИВК и р
дел проверки функционирования ИК, содержащий, в частности, методику провер
работоспособности каналов с некоторой известной точностью, которая, как прави
ниже точности самих проверяемых каналов. Возможна проверка ИК не целиком
позвенно;

— проводятся предварительные испытания ИВК. При положительном результа
испытаний комплекс передается в опытную эксплуатацию. По результатам испытан
уточняются метрологические характеристики ИК и ИВК в целом. Эти метрологическ
характеристики и применяются при использовании ИВК во время опытной экспл
тации;

— в инструкцию по эксплуатации ИВК включается раздел проверки функц
нирования ИК, в который с учетом опыта проведения проверок в ходе предварительн
испытаний переносится соответствующий раздел методики предварительных испы
ний. Проверки обязательно должны охватывать все ИК. Точность проверок огра
чивается затратами на их проведение и временем, необходимым для их проведен

— в ходе опытной эксплуатации в соответствии с инструкцией по эксплуатации ИВК проводятся проверки функционирования, сама методика проверок совершенствуется и дополняется, что обеспечивает постоянный контроль МХ;

— разрабатываются методики определения ИК «сквозным» методом без демонтажа датчиков, служащие впоследствии основой для методик поверки;

— проводится периодическое экспериментальное определение действительных МХ ИК и их элементов;

— на основе накопленной информации рассчитываются межповерочные интервалы ИК, разрабатываются методики калибровки и аттестации ИК, проводится метрологическая аттестация ИК;

— после аттестации основной массы ИК определяется метрологический статус остальных ИК, производится аттестация ИВК. Аттестованный ИВК передается в эксплуатацию. Производится периодическая калибровка ИК.

Сложившийся в НИТИ подход в основном соответствует общему подходу к метрологическому обеспечению измерительно-вычислительных систем [9].

Преодолеть весь комплекс проблем МО на пути аттестации ИВК АНИС до настоящего времени удалось только для наиболее простого — ИВК АНИС-6. Масштаб проблем растет с ростом сложности комплексов.

БЕЗДЕМОНТАЖНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МХ ИК

Для всех бездемонтажных методов определения МХ ИК характерно следующее:

— цель метода — определение МХ каналов, конструкция датчиков которых не позволяет провести их метрологическое обслуживание даже при останове стенда;

— задание необходимого количества уровней входных сигналов обеспечивается сразу для большой группы ИК;

— калиброванные сигналы подаются непосредственно на вход датчика. При этом реализуется проверка МХ ИК, как единого средства измерений.

В НИТИ разработаны и исследованы бездемонтажные методы определения МХ каналов измерения давления в реакторе, каналов измерения уровня теплоносителя и каналов измерения внутриреакторных температур.

Для контроля показаний каналов измерения давления в реакторе создаются изобарические режимы, перекрывающие рабочий диапазон давлений. Величина давления контролируется с помощью прецизионных средств измерения давления, точность которых и определяет точность метода.

Методика определения МХ каналов измерения уровня теплоносителя основана на использовании предварительно снятой зависимости уровня теплоносителя от его объема. При этом устраняются погрешности расчетного определения этой зависимости, возникающие из-за сложной конфигурации сосуда со свободным уровнем и неопределенности объемов заполняющих его конструкций. Проверка осуществляется во всем рабочем диапазоне уровней путем последовательного заполнения объема исследуемого сосуда. Объем заливаемого теплоносителя измеряется прецизионным расходомером. Погрешность метода определяется погрешностью определения зависимости уровня теплоносителя от его объема, погрешностью фиксации исходного уровня и погрешностью прецизионного расходомера.

Конструктивное исполнение внутриреакторных температурных датчиков и их расположение в активной зоне затрудняют или полностью исключают доступ к датчикам для метрологического обслуживания и задания калиброванной температуры. В этих условиях определение МХ каналов измерения внутриреакторных температур на ИВК АНИС, как и на АЭС [10] осуществляется с помощью специально организованных квазиизотермических режимов работы реакторной установки, во время которых до-

стигается практическая изотермичность по водяному контуру. Реализуемые при эт уровни температуры в реакторе перекрывают рабочий диапазон датчиков. Для точно измерения температуры в реактор на время проведения режимов устанавливается сп циальный прецизионный датчик.

Особая сложность разработки бездемонтажных методов определения МХ канал измерения внутриреакторных температур вызвана неопределенностью функций вз имосвязи температур в разных точках реактора. Методика создания квазиизотерм ческих режимов впервые разработана в НИТИ более 20 лет назад и с тех пор постоян совершенствуется.

Общеизвестны недостатки этого метода: неоперативность, громоздкость, нево можность непрерывного контроля за исправностью преобразователей, необходимос создания специальных режимов работы установки. В статье [11] утверждается даж что метод квазиизотермического режима калибровки преобразователей несостоятел в принципе по причине отсутствия градиента температуры вдоль ИК, генерирующе дополнительную погрешность на участке радиационного перерождения термоэлек родов. При отсутствии градиента температуры исчезает указанная дополнительн погрешность, которая восстанавливается в эксплуатационных условиях, когда эт градиент имеет значительную величину.

Несмотря на перечисленные недостатки в [12] метод квазиметрического режи признается одним из основных бездемонтажных методов определения МХ темпер турных датчиков. Рассматривая утверждение о громоздкости данного метода, связа ной с необходимостью создания специальных режимов работы установки, необходи учесть, что метод реализует проверку одновременно всех внутриреакторных датчик которые могут составлять несколько сотен. Раздельная подача необходимых уров входных сигналов на такое количество датчиков даже при возможности непосред венного доступа к ним требует больших затрат времени и ресурсов.

Метод квазиизотермического режима калибровки преобразователей не обеспеч вает непрерывного контроля за исправностью преобразователей, но непрерывный к троль не обеспечивается ни одним известным методом бездемонтажной проверки вн рireакторных датчиков измерения. Единственный из них, обеспечивающий непр рывный контроль за исправностью преобразователей, — статистический метод, ос ванный на установлении регрессионных связей между показаниями датчиков тем ратуры в выделенной группе [13]. Однако этот метод не позволяет реализовать статочную точность и дает лишь экспертную оценку состояния датчиков. В то время периодичность контроля состояния датчиков определяется их надежностью, как показал опыт, для обеспечения исправности реальных внутризонных температ ных датчиков экспериментальных ядерных реакторов достаточно проводить один к зиизотермический режим в год.

Квазиизотермический режим калибровки преобразователей действительно не м жет обеспечить определение составляющей погрешности датчиков, возникающей из радиационного перерождения термоэлектродов. Более того, при работе реактора минимальной мощности, при которой проводятся режимы, нейтронные излучени реакторе значительно меньше тех, которые наблюдаются при эксплуатационных жимах. При этом составляющие погрешности датчиков, вызываемые радиационны эффектами, уменьшаются. Непосредственное измерение этих составляющих погр ности чрезвычайно затруднено [14]. В то же время величина составляющих погр ности датчиков, вызываемых радиационными эффектами, хорошо исследована и правильном выборе датчиков для измерения температуры в реакторе составляет большую величину. В частности для хромель-алюмелевых термоэлектрических п образователей с заземленным спаем суммарная составляющая погрешности, вызван радиационными эффектами, при рабочем режиме работы ВВЭР составляет ок 1 °С и определяется в основном радиационным разогревом термопар [15]. Для х мель-алюмелевых термоэлектрических преобразователей с незаземленным спае постоянной времени 17 с суммарная составляющая погрешность, вызванная радиа онными эффектами термопар, составляет около 2 °С [16].

Таким образом, метод квазиизотермического режима позволяет контролировать
IX температурных каналов без учета радиационной составляющей, величина которой
обавляется к погрешности, определенной при квазиизотермическом режиме, и для
ромель-алюмелевых термоэлектрических преобразователей с постоянной времени
коло 1 с составляет около 1 °С при рабочих режимах реактора.

Квазиизотермичность в реакторе достигается следующим образом:

— до минимума уменьшается теплоотдача из первого контура. В частности, работа
едется с осушенными парогенераторами;

— энерговыделение в реакторе поддерживается на низком, но стабильном уровне;

— циркуляционные насосы первого контура работают на максимальных оборотах;

— перед проведением замеров на каждой «полке» квазиизотермического режима
елается длительная выдержка.

Измерения обязательно проводятся при разогреве и расхолаживании.

Температура в реакторе измеряется с помощью комплекта прецизионной аппа-
атуры, включающего термометр сопротивления ТСП-8042А и специально разрабо-
анный для этой цели вторичный прибор. Непосредственно перед установкой термо-
етра сопротивления в реактор термометр поверяется с помощью установки УТТ-5.
бщая погрешность комплекта прецизионных средств измерений температуры не пре-
ышает 0,4 °С.

Разработана и исследована методика сличения показаний термодатчиков. При
том размер единицы измерения от прецизионного средства измерений температуры
ередается средней температуре каждой температурной зоны и, далее, показаниям
онкретного датчика. Такая схема передачи единиц измерения позволяет контроли-
овать показания термодатчиков даже в промежутке между квазиизотермическими
ежимами. В настоящее время в НИТИ удалось выйти на уровень точности, доста-
очный для определения индивидуальных погрешностей термопар (без учета радиа-
ионных эффектов).

Повышение точности метода проводилось по четырем направлениям:

1. Уменьшение погрешности выходной части ИК. Достигнута погрешность изме-
ения ЭДС термопар средствами ИВК, не превышающая 0,1 °С.

2. Уменьшение помех и наводок, возникающих в линиях связи с датчиками. Уро-
ень сетевых помех в выходном сигнале ИК снижен до 100 дБ при длине линий связи
датчиками около 50 м, при работе их в условиях сильных электромагнитных помех.

3. Совершенствование методики создания квазиизотермического режима, вычис-
ение и учет распределения температуры в зоне. Перепад температур теплоносителя
ежду входом в реактор и выходом составил около 0,8 °С во всем диапазоне рабочих
емператур.

4. Уменьшение погрешности прецизионных средств измерения температуры в ре-
кторе. За все время наблюдения (около двух лет) в пределах погрешности метода не
тмечено ухода средних температур каждой температурной зоны по отношению к по-
азаниям прецизионной аппаратуры измерения температуры в реакторе.

Разработана и внедрена методика определения метрологических характеристик
аналов измерения внутриреакторных температур при квазиизотермическом режиме
аботы реактора. Достигнутая общая погрешность метода позволяет выйти на создание
етодики бездемонтажной поверки внутриреакторных преобразователей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вуколиков В.М.** Методология создания АСНИ, учитывающая точностные критерии. — Измерительная техника, 1991, № 8.

2. **МИ 2247—93.** ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. Репрография ВНИИМ им. Менделеева. — С.-Пб., 1994.

3. **ГОСТ 8.437—81.** ГСИ. Системы информационно-измерительные. Метрологическое обеспечение
новные положения. — М.: Издат. стандартов, 1981.
4. **ГОСТ 8.326—89.** Государственная система обеспечения единства измерений. Системы информа
но-измерительные. Метрологическая аттестация средств измерений. — Там же, 1989.
5. **ГОСТ 8.438—81.** ГСИ. Системы информационно-измерительные. Поверка. Общие положения. —
же, 1981.
6. **ПР 50.2.009—94.** ГСИ. Порядок проведения испытаний и утверждения типа. — Там же, 1994.
7. **МИ 2002—89.** Государственная система обеспечения единства измерений. Системы информаци
измерительные. Организация и порядок проведения метрологической аттестации. — Там же, 19
8. **Калицинский Ю.Р., Колпак Б.Д., Кричевец А.М., Пинчевский А.Д., Речков Г.А., Семенок**
Состояние и перспективы развития нормативно-технической базы метрологического обеспе
ИИС. — Измерительная техника, 1991, № 5.
9. **Кузнецов В.П.** Метрологические аспекты разработки и спецификации измерительно-вычислите
и управляющих систем. — Мир компьютерной автоматизации, 1996, № 3.
10. **Брагин В.А., Батенин И.В., Голованов М.Н. и др.** Системы внутриреакторного контроля АЭС с
торами типа ВВЭР/Под ред. Г.Л. Левина. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
11. **Приймак С.В., Федик И.И., Олейников П.П., Фоменко В.В.** Об одном из подходов повышения точ
реакторных измерений температуры. — Бюллетень подкомитета «Управление качеством и серт
кация продукции в атомной промышленности и энергетике», 1997, вып. 1 (14).
12. **Арнольдов М.Н., Колесников А.Ф., Шевченко В.М.** О проблемах реакторной термометрии. —
же.
13. **Богомолов В.Н.** Метод оперативного контроля работоспособности системы измерительных каналов
гетических установок на основе парных регрессий. — В кн.: Сборник «Методы и средства конт
теплофизических параметров». — Обнинск: ФЭИ, 1996, с. 190—195.
14. **Лысиков Б.В., Прозоров В.К. и др.** Контрольные эксперименты по исследованию мгновенных эфф
ТЭП на ИВВ-2М. — Атомная энергия, 1986, т. 60, вып. 1, с. 16.
15. **Тимонин А.С.** Систематические погрешности измерения температуры в ВВЭР-440 (радиационны
зогрев термопар). — Там же, 1993, № 5, с. 51.
16. **Слесаревский С.О., Белявский А.М. и др.** Погрешность измерения температуры теплоносите
ВВЭР-440. — Там же, 1989, т. 67, вып. 5.

Статья поступила в редакцию 10 ноября 19
Вопросы атомной науки и техн
Сер. Физика ядерных реакторов, 1999, вып. 2, с. 58–

УДК 621.039

ДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ АКТИВНЫХ ЗОН РЕАКТОРОВ

А.В. Пряничников, Е.Ф. Селезнев, И.В. Федоров,
ВНИИАЭС, 109507, Москва, Ферганская ул., 25

Описаны расчетные модели активных зон реакторов, предназначенные для использования в дин
ческих расчетах, в том числе в режимах реального времени.

DYNAMIC CALCULATION MODELS OF THE CORE REACTORS. A.V. PRIANICHNIK
E.F. SELEZNEV, I.V. FEDOROV. The article is devoted to description of dynamic models of the core re
for on-line and off-line calculations.

Динамические модели активных зон реакторов совершенствовались в направле
большей детализации, от точечной модели к одной расчетной ячейке на техноло
ческий канал или тепловыделяющую сборку (ТВС). Степень детализации ограни
валась используемыми расчетными методами и возможностями ЭВМ. Как прави
цель таких расчетов — отслеживание истории целостной технологической едини
такой, как ТВС, стержень СУЗ и т.п.

Практика разработки нейтронных моделей всех реакторов, в том числе, пожал
самого сложного для моделирования реактора РБМК, убеждает в необходимости
менее чем поканального расчета нейтронного поля. Крупносеточный подход, хо

является весьма быстрым алгоритмом, все же не дает необходимой точности пространственного распределения энерговыделения. Кроме того, интерполяция результатов такого расчета внутри полиячейки сама по себе является непростой задачей, и в случае полноценного ее решения создает не меньше проблем, чем снимается использованием крупной сетки. Синтетические методы также весьма эффективны, пока не требуется пространственное описание переноса нейтронов более детальное, чем доступно для анализа штатными системами контроля реактора. Отдельного рассмотрения заслуживают алгоритмы, комбинирующие интегральный метод внутри ячейки и решение диффузионного или Pn-уравнения в активной зоне в целом при условии связи этих двух расчетов по токам на границах ячеек.

Детализация расчета до уровня ТВС в настоящее время наиболее распространена, так как она обеспечивается современными возможностями ведения топливного архива (ТА), где единицей хранения является та же технологическая единица, что и элемент модели.

Однако уже работающие эксплуатационные программы продемонстрировали ограниченность такого подхода, так как большие физические размеры ТВС ведут к разным скоростям реакций в различных твэлах одной ТВС. Например, в твэлах внутренней боковой зоны воспроизводства (ВБЗВ) в быстрых реакторах при наличии значительного градиента плотности потока нейтронов по ТВС. Аналогичный эффект наблюдается в твэлах крайних ТВС активной зоны ВВЭР.

Отслеживание характеристик частей ТВС в настоящее время уже реализовано. Так, в ТА комплекса ГЕФЕСТ [1] хранятся характеристики граней ТВС в максимальном и минимальном потоке и концентрации трех определяющих нуклидов в шести секторах ТВС.

Следующий шаг в этом направлении — переход на расчетные модели с точкой на более мелкую технологическую единицу — твэл [2]. Детальные модели с выделением твэла стали возможны благодаря развитию ЭВМ.

Обоснование безопасности эксплуатации реактора в последнее время требует анализа нестационарных процессов в активной зоне, которые связаны с конкретным твэлом, так как нарушение герметичности твэла приводит к распространению радиации по всему первому контуру.

ПБЯ [3] разрешают эксплуатацию реактора с нарушением герметичности твэлов:

— для ВВЭР и РБМК до 0,2% твэлов с дефектами типа газовой неплотности и до 0,02% твэлов с прямым контактом ядерного топлива с теплоносителем;

— для БН аналогичные параметры достигают 0,05 и 0,005% твэлов соответственно.

Устанавливаемые ПБЯ пределы безопасной эксплуатации по величине дефекта твэлов, то есть параметры твэлов, превышение которых может привести к аварии реакторной установки (РУ), достигают 1% твэлов с дефектами типа газовой неплотности и 0,1% твэлов с прямым контактом ядерного топлива с теплоносителем для ВВЭР и РБМК 0,1 и 0,01% соответственно для реакторов БН.

Без ответа на вопрос, что будет происходить при нарушении герметичности оболочки твэла, невозможно прогнозирование нестационарных процессов в конкретном реакторе, в том числе аварий с уже имевшимися до аварии негерметичными твэлами. Поэтому будущее эксплуатационных моделей за потвэльными моделями.

Эксплуатационные модели должны с той же степенью детализации, что и для ТВС, моделировать органы регулирования — стержни СУЗ, все усложняющаяся конструкция которых также требует большей детализации модели реактора.

Расчетные модели активных зон реакторов, используемые в тренажерах, имеют две особенности: работа в режиме реального времени; отсутствие необходимости ведения ТА.

Вместо ведения ТА в тренажерах моделируется несколько стационарных стартовых состояний, таких, например, как начало кампании, середина кампании и конец кампании.

По первой и главной причине сегодня модели тренажеров ограничиваются мо
лированием ТВС, то есть модели имеют лишь одну расчетную точку на ТВС
технологический канал в плане. Например, для реактора РБМК поканальный тр
мерный расчет нейтронного поля в режиме реального времени, необходимый для т
нажера, находится на пределе возможностей современных компьютеров допусти
стоимости, поэтому используемые сейчас в тренажерах расчетные методы отража
компромисс между точностью моделирования и потребностью в вычислительных
сурсах, и, к сожалению, не свободны от недостатков.

К настоящему времени накоплен достаточный опыт построения и отладки не
ронно-физических моделей для тренажеров АЭС, позволяющий оценить достоинс
и недостатки используемых расчетных методов, а также определить способы их у
вершенствования с учетом реальных возможностей. Прежде всего, необходимо п
робнее рассмотреть требования к точности расчетных методов. Минимальным тр
ванием к точности моделирования является качественное соответствие наблюдаем
на тренажере процессов реальной картине на блоке. При этом следует учитывать,
возможности оператора анализировать физическую картину ограничены имеющи
в его распоряжении оборудованием (системой контроля) и скоростью наблюдаем
процессов. С другой стороны, стремление разработчиков тренажера к увеличению
информативности, стимулируемое заказчиком, приводит к появлению в тренаж
многочисленных сервисных функций — графики физических параметров, не рег
рируемых штатной аппаратурой блока, развитое графическое представление инф
мации. Это позволяет анализировать ход процесса значительно более детально,
это может делать оператор реального блока, и заметно повышает требования к точно
моделирования, приближая их к требованиям, предъявляемым к исследовательск
программам.

Особенно сложным является моделирование аварийных ситуаций, информаци
которых может быть недостаточна для убедительной верификации модели, особе
в случае тяжелых аварий, например, МПА или Чернобыльской аварии РБМК. П
этом расчетные методы, хорошо работающие в штатных режимах, могут оказат
неточными в случае быстропротекающих процессов.

По-видимому, в настоящее время не следует рассчитывать на построение не
ронно-физической модели, в полной мере свободной от каких-либо недостатков. Вме
с тем именно технология разработки тренажеров АЭС позволяет не только конст
ировать модели отдельных систем энергоблока, но и интегрировать их на всех эта
разработки, а также испытывать их в реальных эксплуатационных режимах и а
рийных ситуациях, тогда как модели, изолированные от других систем, неизбеж
ограничены в своем применении в силу условности и неполноты используемой и
информации. Опыт показывает, что без специальной технологии интегрирования
делей разных систем такое объединение практически неосуществимо. Это обстоят
ство стимулирует интерес к тренажерным технологиям и объясняет их интенсив
развитие.

Особенностью константного обеспечения динамических моделей, в том числе т
нажерных, является, с одной стороны, необходимость использования констант в
роком диапазоне режимов работы блока (от расхоложенного состояния до рабоче
аварийного), с другой стороны, очень жесткие требования к их точности и быст
действию. Построение такой системы констант — сложная задача, решаемая для к
дой модели индивидуально.

В настоящее время константы для активной зоны реакторов в моделях тепло
реакторов, рассматриваемых во ВНИИАЭС, готовятся с помощью многогрупповой
лячеечной программы GETERA [4] и аппроксимируются полиномами во всей обла
значений. Программа GETERA рассчитывает нейтронно-физические характерист
методом вероятностей первых столкновений (ВПС) в 300-групповом приближе
Нейтронные сечения готовятся программами комплекса CONSIST [5], созданно

ФЭИ, обрабатывая систему групповых констант БНАБ-93. Эта система разработана на основе оцененных ядерных данных различных библиотек ENDF/B-4(6), ENDL-83, БРОНД-26, ЛИПАР. Программы комплекса CONSIST позволяют считывать нейтронные сечения и блокировать их. Блокировка сечений в программе GETERA производится в приближении сечения разбавления, причем параметр разбавления определяется для конкретной геометрии ячейки или полиячейки.

Расчет полей нейтронов проводится методом ВПС в плоской, цилиндрической или сферической геометрии. Первоначально метод использовался для расчета ячейки с центральной симметрией. Затем он был расширен для расчета полиячеек и кластерных систем. Перенос нейтронов рассчитывается в предположении, что ток нейтронов из ячейки в ячейку пропорционален площади соприкосновения ячеек. В таком предположении реальные системы часто могут быть сведены к простым путем объединения исходных ячеек по составу, геометрии и местоположению. При более подробном описании можно рассчитывать поля и в сложных ячейках.

Параметры, необходимые для описания зависимостей нейтронных констант, выбираются на основе анализа физики активной зоны конкретного реактора. Например, зависимость поглощающих свойств органов СУЗ от спектра нейтронов в реакторе РБМК обусловила включение в число параметров соответствующих полиномов плотности воды в каналах, окружающих ДП и стержень СУЗ.

Исчерпывающая верификация константного обеспечения возможна только в составе интегрированных моделей или тренажера. К сожалению, не удается обойтись без «подгонки» констант, особенно для РБМК. Это объясняется стремлением при подготовке констант гарантировать их точность прежде всего в рабочих режимах реактора, даже в ущерб «крайним» (аварийным, расхоложенному) состояниям. При этом динамический пересчет констант в тренажере отнимает примерно столько же вычислительных ресурсов, сколько расчет нейтронных полей, то есть дальнейшее увеличение точности констант ценой усложнения аппроксимации явно нецелесообразно. Однако удается найти такие поправки к константам, которые имеют ясный физический смысл и должным образом исправляют указанные погрешности. Например, введение поправки, связанной с числом погруженных стержней СУЗ, позволило скорректировать ошибку в расчете K_∞ остановленного реактора РБМК, обусловленную изменением спектра нейтронов из-за введения в активную зону большого количества поглотителя. Ряд других поправок к сечениям поглощения и деления топлива исправляет неточности в расчете эффекта обезвоживания КМПЦ и КОСУЗ на номинале и на остановленном реакторе.

Моделирование выгорания и отравления топлива в динамических моделях не является проблемой, так как выгорание слишком медленный процесс для наблюдения, а отравление может рассчитываться практически с любой точностью. Единственное замечание должно быть сделано относительно коррекции констант для данной загрузки реактора. «Опорное» состояние (загрузка, распределение энерговыделения и т.д. в некотором стационарном режиме при мощности, близкой к номинальной) должно по возможности иметь равновесную концентрацию ксенона, так как в противном случае предположение о его равновесности в этом состоянии, по необходимости сделанное в модели, может заметно ухудшить точность расчета.

Ключевой процедурой при «настройке» нейтронно-физической модели является подготовка номинального состояния, по возможности близкого к соответствующему реальному состоянию блока-прототипа. Необходимо подчеркнуть, что соответствие это условно в том смысле, что данные, имеющиеся в распоряжении разработчиков, не являются полными и не позволяют однозначно определить состояние блока. Хорошо известно, что неопределенность в расчете выгорания топлива, а также небольшие погрешности в расчетах констант не позволяют точно воспроизвести распределение энерговыделения в активной зоне РБМК для произвольного состояния. Поэтому нейтрон-

но-физическая модель для тренажера РБМК дополняется специальным алгорит
коррекции констант по показаниям датчиков СФКРЭ. Для решения этой задачи
пользуется очевидный подход — делается ряд естественных предположений, пре
всего касающихся стационарности, стабильности и безопасности данного состоя
блока. Таким образом, процедура подготовки номинального состояния не являе
формальной (то есть не сводится к процессу ввода данных о блоке в системы тренаже
и всегда проводится разработчиком с учетом особенностей используемых моделей

Особенность динамической нейтронно-физической модели — очень большой
терфейс с другими системами, особенно в тренажерах. Так, полный объем данн
которыми обменивается поканальный нейтронный расчет с другими системами РБ
(при семи расчетных слоях по высоте), — более 60 тыс. чисел. Правда, наиболь
частота обмена (12 Гц), равная частоте пересчета нейтронного поля, требуется не
всех данных — получение температуры графита и передача энерговыделения в граф
могут осуществляться на порядок реже. Тем не менее обмен более чем полови
данных должен проводиться с максимальной частотой.

Серьезная и практически совсем не изученная проблема — требования к точно
и стабильности получаемых и передаваемых данных. Например, в условиях поло
тельной обратной связи по плотности теплоносителя небольшие ошибки в расчете эн
говыделения или плотности теплоносителя могут усиливаться. При этом могут
блюдаться значительные колебания мощности, как локальной, так и полной (коле
ния возникают из-за отрицательной обратной связи по системе автоматического
гулирования мощности). Требования к точности и стабильности передаваемых дан
должны быть ясно сформулированы. Например, можно показать, что скачок плотно
теплоносителя в КМПЦ на 1% вызывает такое же мгновенное изменение мощно
Отсюда следует, что при чувствительности оборудования, регистрирующего мощно
около 0,1%, должна обеспечиваться по меньшей мере такая же точность в расч
плотности воды в КМПЦ. Аналогичные оценки обязательно должны быть сделан
отношении всех интерфейсных данных.

Число энергетических групп, необходимых для адекватного моделирования пере
нейтронов в активной зоне реактора, определяется спектром нейтронов в различных
ластях активной зоны (центральная часть, область около отражателя) и компонен
решетки (ячейка с топливом, канал СУЗ и т.д.), а также его изменением в различ
режимах работы реактора (например, при обезвоживании КМПЦ или КОСУЗ для РБМ
С другой стороны, от количества энергетических групп сильно зависит скорость получе
решения. Здесь необходимо отметить, что требования к числу итераций источника в т
нажере должны удовлетворяться в первую очередь, так как в противном случае возник
заметные погрешности моделирования, наблюдаемые оператором. По-видимому, в т
нажерах следует при необходимости идти на упрощение энергетического разбие
вплоть до одногруппового представления, что значительно меньше сказывается на т
ности моделирования и существенно улучшает сходимость итераций источника. Конеч
при этом возникают проблемы моделирования таких эффектов, как обезвоживание
СУЗ и КМПЦ для РБМК. Удачным подходом можно считать «предварительное» реше
двухгрупповой задачи на уровне ячеечных констант, например, подготовка жестко
спектра наряду с диффузионными константами и использование ее в тренажере для
чета двухгруппового поля нейтронов.

В плане создания мелкосеточных динамических моделей во ВНИИАЭС заверш
работы по созданию инженерной программы МЕТЕЛЬ для АЭС с ВВЭР.

В данной программе нейтронно-физического расчета реактора ВВЭР конста
и поле нейтронов определяются согласованно, с учетом нелинейности уравнения
реноса нейтронов. Для подготовки констант ячеек используется программа GETE
В связи с неудовлетворительными результатами для реакторных сред, содержа
плутоний, используемая в программе модель термализации нейтронов (дифферен
альная модель Кадилака) была заменена алгоритмом, использующим термализ
онные матрицы рассеяния. Это позволило получать качественные результаты для
акторных сред с МОХ-топливом.

Число групп нейтронов в малогрупповом пространственном расчете от 4 до 6 с термализацией нейтронов.

Константы для нестационарных задач получаются с помощью библиотеки малогрупповых сечений для конкретного типа реактора через построение полиномиальных аппроксимаций.

Для качественного учета токов нейтронов на границах расчетной ячейки базовая модель реактора типа ВВЭР-1000 имеет 73 расчетные точки на ТВС в плане, а потвэльная модель имеет одну расчетную точку на твэл. Число расчетных точек по высоте реактора увеличено до 20 для соблюдения требований диффузионного приближения о сопоставимости линейных размеров расчетной ячейки во всех направлениях для снижения расчетной погрешности. Таким образом, базовая модель реактора ВВЭР-1000 содержит почти 240000 расчетных точек, а потвэльная модель более чем один миллион. Расчет проводится в диффузионном, P_2- или P_3-приближениях в трехмерной гексагональной геометрии.

В настоящее время созданы модули программы для решения стационарной, нестационарной, сопряженной задач и задачи с внешним источником, что обеспечивает получение решения для любых режимов работы реактора от глубокой подкритики до аварийных ситуаций на полной мощности.

Таким образом, во ВНИИАЭС созданы и эксплуатируются различные программы нейтронно-физических расчетов реакторов — как программы, работающие в режиме реального времени, с числом расчетных точек от 1000, так и высокоточные инженерные программы с числом расчетных точек более 1 млн. Имеется собственная, признанная в научной среде, разработанная совместно с другими организациями константная база. Для расчетов используются различные приближения (диффузионное, P_2- и P_3-приближения), что обеспечивает обоснование алгоритмических расчетных погрешностей. Для решения нестационарной задачи используются различные приближения: от улучшенной квазистатики до прямых неявных схем.

Верификация программ проведена на основе расчетов российских и международных тестов ячеек и реакторов, а также на базе эксплуатационных данных. Все модули программ созданы в России и поэтому лицензионно чисты.

Для демонстрации возможностей программы МЕТЕЛЬ на рис. 1, 2 представлены: относительное отклонение

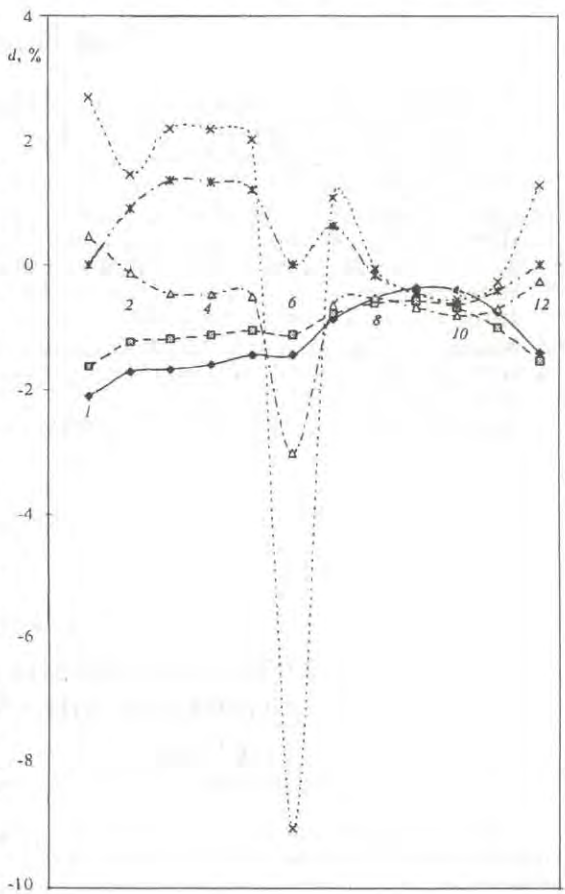


Рис. 1. Относительное отклонение (d, %) полей нейтронов и энерговыделения P_3 от диффузионного D-приближения в твэлах центральной диагонали ТВС (от центра к краю) с учетом центрального стержня (точка *1*), пэла (точка *6*) и водяной границы (точка *12*) для четырехгруппового расчета реактора ($d = ((P_3 - D)/D)\cdot 100$). Кривые *1* (◆), *2* (❑), *3* (Δ), *4* (×) относятся к отклонениям полей нейтронов соответствующих групп, а кривая *5* (*) к энерговыделению

4.15
3.56
-3.78

0.43 4.23
-0.07 3.62
-2.51 -2.57

-4.25 -1.53 3.84
-4.63 -2.24 3.38
-1.53 -1.70 -2.34

-4.32 -3.59 -1.66 4.27
-4.26 -3.88 -2.20 3.78
0.16 -0.09 -1.31 -1.75

-1.68 -4.35 -4.09 -1.20 4.72
-0.89 -4.23 -4.27 -1.74 4.25
2.36 0.06 -0.61 -0.85 -1.27

1.17 -2.84 -2.41 -4.65 -3.06 3.72
2.52 -1.71 -1.72 -4.70 -3.60 3.25
5.02 1.13 1.27 -1.31 -2.71 -2.19

2.69 1.21 -3.56 -3.72 -2.18 4.86
3.81 2.40 -3.00 -3.92 -2.72 4.32
5.93 5.04 0.00 0.13 -0.25 -1.83 -1.46

0.91 1.13 -1.09 -2.98 -0.89 -1.35 4.49
2.21 2.32 -0.10 -2.68 -1.09 -1.88 3.96
0.00 4.00 5.07 2.92 1.52 2.70 -1.52 -2.33

2.99 2.32 0.38 0.25 -1.91 -4.22 -3.36 1.06 4.31
4.23 3.71 1.58 1.45 -0.97 -4.07 -3.74 -0.48 3.79
5.40 4.98 3.67 4.17 2.17 0.23 -0.61 -1.97 -3.63

1.37 2.43 4.15 1.71 -2.32 -5.08 -3.11 2.90 5.85
2.28 3.79 5.49 2.92 -1.70 -5.26 -3.56 2.26 5.43
0.00 3.82 4.94 7.05 5.37 0.00 1.70 -1.04 -1.79 -1.95 -4.57

Р и с. 2. Отклонения энерговыделений в твэла шестой части ТВС (вариант V11S2 [7]) от дан ных программы MCU: x.xx — МЕТЕЛЬ с одно точкой на твэл; x.xx — МЕТЕЛЬ-P_3 с одной то кой на твэл; x.xx — TVS-M (РНЦ КИ)

полей нейтронов и энерговыделения твэлах центральной диагонали ТВ (от центра к краю) с учетом централь ного стержня (точка *1*), пэла (точка и водяной границы (точка *12*) P_3- диффузионного приближения четы рехгруппового расчета реактора; от клонения энерговыделений в твэла ТВС от данных программы MCU [6] полученные при расчете одного из те стов, подготовленных сотрудникам РНЦ КИ для верификации расчетны программ ячеек ВВЭР со смешанны топливом [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Селезнев Е.Ф., Альперович М.Н., Григорьева Н.М. и др.** Аннотация программы ГЕФЕСТ. — ВАНТ Сер. Физика ядерных реакторов, 1994, вып. 4, с. 36—43.
2. **Аввакумов А.В., Малофеев В.М.** Валидация пакета кодов BARS для детального потвэльного расчет легководных реакторов. — Там же, 1999.
3. **Правила** ядерной безопасности реакторных установок атомных станций (ПБЯ РУ АС-8 ПНАЭ Г-1-024—90. Введены в действие ГАН РФ 01.09.90 г. — 52 с.
4. **Белоусов Н.И., Бычков С.А., Марчук Ю.В. и др.** Использование программы GETERA в задачах оценк эффектов реактивности. — В кн.: Внутренняя безопасность ядерно-энергетических установок. — М ЦНИИатоминформ, 1991, с. 145—147.
5. **Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цыбуля А.М.** Система групповых констант БНАБ—93. — М., 1995. — 415
6. **Gomin E., Maiorov L.** The MCU-RFFI Monte-Carlo code for reactor design application. — In: Proc. Inter Conf. — USA, Portland, 1995.
7. **Primm R.T.** Neutronics benchmarks. — ORNL/TM-13603/V3, 1997.

Статья поступила в редакцию 9 августа 1999

Вопросы атомной науки и техник

Сер. Физика ядерных реакторов, 1999, вып 2, с. 64—7

УДК 621.039

ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В.Ю. Емельяненко, М.С. Чувильчиков,
ВНИИАЭС, 109507, Москва, Ферганская ул., 25

Приведен анализ технологии создания интегральных моделей процессов в оборудовании АЭС. Описа составные части технологии: единая база данных (БД), унифицированные графические интерфейсы, а томатические генераторы кода. Особое внимание уделено сопровождению разработки моделей.

THE NUCLEAR POWER PLANTS MODELING TECHNOLOGY. V.Yu. EMELIANENKO, M.S. CHUVILCHIKOV. The analysis of technology for integral modeling of the NPP equipment processes is given. The main parts of technology: database, graphic interfaces, automated code generators, are described. The model design support is emphasized.

Основной тенденцией развития современных систем моделирования является усложнение моделей как за счет более точного учета составляющих внешних воздействий и детализации описания моделируемых процессов, так и за счет создания интегральных моделей, объединяющих модели отдельных процессов в единый комплекс [1]. Современные крупные проекты характеризуются, как правило, следующими особенностями [2, 3]:

— сложность описания (достаточно большое количество функций, процессов, элементов данных и сложные взаимосвязи между ними);

— наличие совокупности тесно взаимодействующих компонентов, имеющих свои локальные задачи и цели функционирования;

— необходимость интеграции существующих и вновь разрабатываемых приложений;

— функционирование в неоднородной среде на нескольких аппаратных платформах;

— разобщенность и разнородность отдельных групп разработчиков по уровню квалификации и сложившимся традициям использования тех или иных инструментальных средств.

Для успешной реализации проекта объект моделирования должен быть прежде всего адекватно описан, должны быть построены полные и непротиворечивые функциональные и информационные модели. Накопленный к настоящему времени опыт моделирования показывает, что это логически сложная, трудоемкая и длительная по времени работа, требующая высокой квалификации участвующих в ней специалистов. Кроме того, в процессе моделирования требования к модели могут изменяться или уточняться, что еще более усложняет разработку и сопровождение таких систем.

За последнее десятилетие в области технических средств программирования сформировалась Computer Aided Software/System Engineering (CASE) технология, представляющая собой совокупность методологий анализа, проектирования, разработки и сопровождения сложных систем и поддерживаемая комплексом взаимоувязанных средств автоматизации разработки программного обеспечения (ПО).

CASE-технология — это инструментарий для системных аналитиков, разработчиков и программистов, автоматизирующий процесс проектирования и разработки ПО [4]. В настоящее время CASE-системы прочно вошли в практику программной индустрии. При этом они используются не только для производства программных систем, но и как инструмент решения проектных задач, связанных с начальными этапами разработки, таких задач, как разработка проектных спецификаций, выпуск проектной документации, планирование и контроль разработок, оперативного и стратегического планирования и управления ресурсами и т.п.

Современные CASE-средства охватывают обширную область поддержки многочисленных технологий разработки ПО — от простых средств анализа и документирования до полномасштабных средств автоматизации. В разряд CASE-средств попадают как относительно дешевые системы для персональных компьютеров с весьма ограниченными возможностями, так и дорогостоящие системы для неоднородных вычислительных платформ и операционных сред. Рынок программных средств насчитывает более 100 различных CASE-средств, наиболее мощные из которых так или иначе используются практически всеми ведущими западными и отечественными разработчиками [5]. Такие средства осуществляют поддержку всех процессов жизненного цикла [6] ПО:

— основные процессы: приобретение, поставка, разработка, эксплуатация, сопр вождение;

— вспомогательные процессы, обеспечивающие выполнение основных процесс документирование, управление конфигурацией, обеспечение качества, верификаци аттестация, оценка, аудит, решение проблем;

— организационные процессы: управление проектами, создание инфраструкту проекта, определение, оценка и улучшение самого программного обеспечения, об чение.

С самого начала CASE-технологии развивались с целью преодоления ограничен (сложность понимания, большая трудоемкость, неудобство внесения изменений в пр ектные спецификации и т.д.), возникающих при разработке больших программн технических комплексов. Анализ приведенных в научной литературе основных х рактеристик современных технологий моделирования позволяет выделить те из ни которые имеют по нашему мнению наиболее важное значение для создания инте ральных моделирующих комплексов:

— единая база данных (БД) проекта;
— поддержка коллективной разработки;
— поддержка управления проектом;
— генерация документации;
— автоматическая генерация кода;
— открытость архитектуры;
— унифицированный графический интерфейс.

В настоящее время ВНИИАЭС имеет законченную отлаженную CASE-технологи моделирования процессов в оборудовании АЭС и моделирования АЭС в целом. Те нология охватывает все этапы — от разработки технического задания до сдачи проек Заказчику: работы по сбору исходных данных, разработке и согласованию предвар тельных спецификаций, созданию программного обеспечения и его компонент в с ответствии с заданными требованиями, включая оформление проектной, промеж точной и эксплуатационной документации, подготовку материалов, необходимых д проверки работоспособности и качества программных продуктов, с занесением вс сведений в унифицированную БД. В свою очередь, создание программного обеспечен включает в себя непосредственно кодирование, автономную отладку, официальн утверждение, интеграцию, комплексную отладку и разработку подсистемы ввода/в вода. Эксплуатация включает в себя работы по внедрению программного обеспечен в эксплуатацию и сдачу заказчику, конфигурирование рабочих мест пользовател обеспечение эксплуатационной документацией, проведение обучения персонала и т.д и непосредственно эксплуатацию, в том числе локализацию проблем и устранен причин их возникновения, модификацию программного обеспечения в рамках уст новленного регламента, подготовку предложений по совершенствованию, развитию модернизации системы.

Единая база данных проекта. Основа технологии — использование БД проект для хранения всей информации о проекте, которая разделяется между разработчика в соответствии с их правами доступа. Содержимое БД включает не только информ ционные объекты различных типов, но и отношения между их компонентами, а так правила использования или обработки этих компонентов. БД хранит объекты разли ных типов: определения экранов и меню, проекты отчетов, описания данных, исходн коды, элементы данных и т.д.

На основе БД осуществляется интеграция средств и разделение системной инфо мации между разработчиками. При этом возможности БД обеспечивают несколь уровней интеграции: общий пользовательский интерфейс по всем средствам, переда данных между средствами, интеграцию этапов разработки, передачу данных и средс между различными платформами.

Поддержка коллективной разработки и управления проектом. Технология поддерживает групповую работу над проектом, обеспечивая возможность работы в сети, экспорт—импорт любых фрагментов проекта для их развития и/или модификации, а также планирование, контроль, руководство и взаимодействие, то есть функции, необходимые в процессе разработки и сопровождения проектов. Эти функции также реализуются на основе БД. В частности, через систему управления БД осуществляется контроль безопасности (ограничения и привилегии доступа), контроль версий и изменений и др. Отдельные исполнители могут разрабатывать и автономно тестировать модели своих систем независимо от официальной общей версии программного обеспечения. После полного тестирования модели могут быть включены в официальную версию системы.

Управление проектом связано с вопросами планирования и организации работ, создания коллектива разработчиков. На всех этапах разработки ведется строгое соблюдение стандартов оформления текстов программ, описания данных и непрерывно осуществляется контроль исполнительской дисциплины с помощью специальной базы данных замечаний. Эта схема обязательно включает итерационные процедуры уточнения требований к системе и рассмотрения вариантов проектных решений. Положительные факторы применения этой схемы заключаются в основном в следующем:

— на каждой стадии формируется законченный, отвечающий критериям полноты и согласованности набор проектной, а затем и эксплуатационной документации, охватывающий все предусмотренные стандартами виды обеспечения (организационное, методическое, информационное, программное, аппаратное и др.);

— выполняемые в логичной последовательности этапы работ достаточно очевидным образом позволяют планировать сроки завершения всех работ и соответствующие затраты.

Генерация документации. Вся документация по проекту генерируется автоматически из информации, хранящейся в БД (как правило, в соответствии с требованиями действующих стандартов). Несомненное достоинство технологии заключается в том, что документация всегда отвечает текущему состоянию дел, так как любые изменения в проекте по необходимости автоматически отражаются в БД. Известно, что при традиционных подходах к разработке ПО документация в лучшем случае запаздывает, а ряд модификаций вообще не находит в ней отражения.

Автоматическая генерация кода. Генерация программ в машинном коде осуществляется на основе БД и позволяет для простых систем автоматически построить до 95% объектного кода или текстов на языках высокого уровня. В настоящее время в технологии используются следующие инструменты: CMS-кодогенератор для моделирования теплогидравлических систем, LCG-кодогенератор для моделирования систем АСУ и ELIS-кодогенератор для моделирования электрических систем.

Открытость архитектуры. В системе с открытой архитектурой предполагается строгое соответствие форматов данных стандартам протокола обмена, наличие нескольких стандартных уровней обмена сообщениями. Это позволяет заменять аппаратуру и программы обмена нижних уровней, сохраняя работоспособность прикладных программ, тем самым обеспечивая переносимость ПО. Технология моделирования ВНИИАЭС является многоплатформенной и реализована как для различных клонов ОС UNIX, так и для работы под управлением Windows NT.

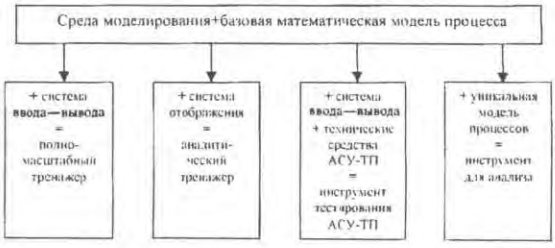
Унифицированный графический интерфейс. Рассматриваемая технология обеспечивает всех участников проекта, включая заказчиков, унифицированным наглядным и интуитивно понятным графическим интерфейсом.

Кодогенераторы для моделирования вспомогательных систем используют унифицированный графический редактор (PM Graphic Editor), представляющий собой новое поколение объектноориентированных инструментальных средств для разработчиков. PM сочетает мощь языковых средств, скорость визуальной разработки и масштабируемую технологию доступа к данным. PM создает удобную интегрированную среду

разработчика, обеспечивая тем самым быстроту, надежность и легкую переносимость решаемых задач. Графическая система базируется на двух фундаментальных понятиях: объекты и связи. Такого вида система описывает множество практических задач: теплогидравлические сети, задачи управления и логики, электронные схемы, и т.д.

Операторские станции аналитического тренажера, предназначенные для моделирования управления энергоблоком с блочного щита управления (БЩУ), используют графический пакет DIAGEN (Diagram Editor), представляющий собой средство разработки и анимации симуляционных схем и панельной графики БЩУ. Инструкторская станция, которая представляет собой мощный графический интерфейс, позволяющий проводить комплексную подготовку персонала с использованием разработанных сценариев с минимальными усилиями, использует промышленный графический пакет DV-Draw (V.I. Corporation).

В составе технологии лежат передовые подходы к моделированию и системному программированию. Технология постоянно развивается. Так в настоящее время добавлены такие элементы, как удаленный доступ и управление моделью через всемирную сеть Интернет, возможность стыковки экспертной системы с базой данных модели. ВНИИАЭС с использованием рассматриваемой технологии строит свои тренажеры на базе исследовательских моделей и предлагает свои достижения в тренажерах использовать для расчетов обоснования безопасности АЭС. При этом производительность современных процессоров обеспечивает расчет и отладку модели в реальном времени с инженерной точностью, что в свою очередь позволяет подключать к тренажеру и тестировать реальные элементы АСУ, а также создавать АСУ широкого применения [7].



Применение технологии моделирования

Имеющаяся технология применяется в промышленном масштабе в течение последнего десятилетия и многократно опробована в составе полномасштабных и аналитических тренажеров АЭС в России и за рубежом. Сфера применения технологии моделирования представлена на рисунке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Спасских В.П.** Вопросы обоснования проектов и математические модели проектируемых объектов. — В кн.: Тез. лекций и докл. школы сем. секции динамики. — М., 1998, с. 4—12.
2. **Вендров А.М.** Один из подходов к выбору средств проектирования баз данных и приложений. — СУБД. 1995, № 3.
3. **Калянов Г.Н.** CASE. Структурный системный анализ (автоматизация и применение). — М.: «Лори», 1996.
4. **Новоженов Ю.В.** Объектно-ориентированные технологии разработки сложных программных систем. — М., 1996.
5. **I/A Series.** Обзор системы. — USA, Foxboro, 1998.
6. **Международные** стандарты, поддерживающие жизненный цикл программных средств. — М.: МП «Экономика», 1996.
7. **Бордюгов А.В., Воскресенский Ф.Ф., Дагаев Д.В. и др.** Средства АСУ ТП широкого применения со встроенной системой автоматизированной разработки. — В кн.: Тез. докл. сем. секции динамики. — Гатчина, 1997, с. 37—39.

Статья поступила в редакцию 9 августа 1999 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Физика ядерных реакторов, 1999, вып. 2, с. 70—74.

УДК 621.039

О НЕКОТОРЫХ ФАКТОРАХ, СУЩЕСТВЕННЫХ ДЛЯ НАЧАЛЬНОГО ЭТАПА РАЗВИТИЯ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Л.В. Смирнов, НИИ механики ННГУ,
603600, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 6

Кратко изложены некоторые результаты первых исследований начального этапа аварии. Обращается внимание на наличие двух одновременно действующих начальных возмущений и существенно нелинейное поведение реактора.

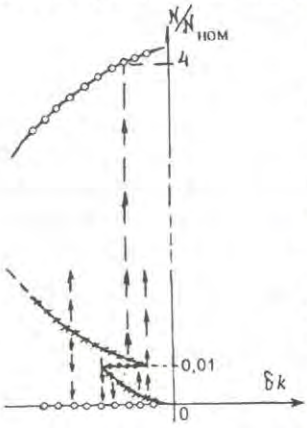
ON SOME FACTORS SIGNIFICANT FOR THE INITIAL STAGE OF THE ACCIDENT AT CHERNOBYL APP. L.V. SMIRNOV. Results of the early investigation of the initial Stage of the accident are summarized. Special attention is draw to the presence of two simultaneously acting perturbations as well as to the substantially nonlinear behavior of the reactor.

Описанию и анализу аварии на ЧАЭС посвящено немало публикаций. Возрос интерес к исследованию реактивностных аварий, как наиболее важных с точки зрения безопасности реакторов. Рассматриваются все более сложные, распределенные модели нейтронно-физических и теплогидравлических процессов в активной зоне. Однако нельзя утверждать, что для аварии на ЧАЭС есть ясность как с источниками начального возмущения, так и с динамическими свойствами объекта. Отсутствие обсуждения и ссылок на некоторые первые результаты, а также утверждения в некоторых публикациях требуют напоминания об этих результатах, о роли рассмотрения простых моделей при исследовании динамики, в частности, при решении задачи идентификации. Возможно, приводимые ниже соображения будут полезны для дальнейших исследований.

Для исследования начального этапа аварии существенны следующие факторы: источник и характер начального возмущения, динамические свойства системы, в частности величина парового коэффициента реактивности во время аварии. Общепринято, что решение задачи идентификации какого-либо процесса состоит из двух этапов. Первый, часто называемый идентификацией в широком смысле, это построение максимально простой модели, объясняющей качественную картину процессов, нахождение основных факторов, определяющих эту картину. Второй этап, когда структура модели ясна, это уточнение модели и изучение количественных характеристик процесса (идентификация в узком смысле). Без выполнения первого этапа решение задачи осложняется. Простота моделей, используемых на первом этапе, обусловлена необходимостью всестороннего, желательно аналитического исследования, определения характера влияния параметров, начальных условий и возмущений, которые можно варьировать.

Попытки объяснения причин, изучения характера аварии начались сразу после того, как стали известны основные факты. Результаты исследований обсуждались на различных совещаниях и семинарах уже осенью 1986 г. Остановимся на работах [1, 2], относящихся к первому этапу идентификации, которые ранее были представлены на совещании в ИАЭ им. И.В. Курчатова и на семинаре по динамике ЯЭУ в Севастополе.

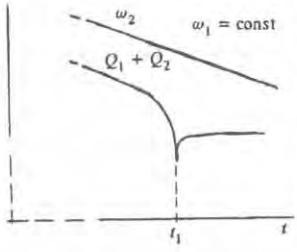
В первой из них рассмотрена упрощенная модель кипящего реактора с точечным пр
ставлением нейтронной кинетики, с учетом инерционной связи между нейтрон
мощностью и тепловым потоком, а также нелинейной зависимости реактивност
паросодержания. Из-за грубости модели результаты носят демонстрационный харак
и дают только качественное представление о происходящих процессах. Основной
этих результатов может быть представлен в виде бифуркационной диаграммы [3,
выражающей зависимость стационарного значения относительной тепловой мощно
$N/N_{ном}$ от управляющего параметра, которым является составляющая реактивно
(δk_1) без парового эффекта. Общий вид этой зависимости с учетом работы регулят
мощности представлен на рис. 1. Точками обозначены устойчивые состояния рав
весия, крестиками—неустойчивые типа седла. Связанный с работой регулятора го
зонтальный отрезок соответствует стационарному реж
работы реактора во время проводимого эксперимента. Мо
отметить, что устойчивые и неустойчивые состояния ра
весия, расположенные на прямой $\delta k_1 = const$, чередуют



Р и с. 1. Бифуркационная диаграмма

В работе [1] автор обращает внимание на возможно
потери управления, соответствующей либо гашению ре
тора (левый конец отрезка), либо нейтронной вспышке и
чительному росту мощности (правый конец). Стрелки у
зывают направление изменения мощности в нестационар
режимах. В представляющей для нас интерес области з
чений параметра δk_1 стационарный режим не является у
тойчивым «в целом», и система имеет несколько (в на
случае пять) состояний равновесия. На отсутствие устой
вости реактора «в целом» при наличии положительных
ратных связей Е.Ф. Сабаев указывал ранее [5].

Асимптотически устойчивый стационарный режим работы реактора при пров
нии эксперимента может быть нарушен не только при обсуждавшейся в [1] по
управления, но и при возмущении, по мощности не связанном с изменением упр
ляющего параметра δk_1. В этом случае в зависимости от знака возмущения либо п
исходит гашение реактора, либо возникает переходный процесс, сопровождающи
слабой или сильной (зависимости от величины положительного парового коэффи
ента реактивности) нейтронной вспышкой [1]. Один из источников такого начальн
возмущения мощности широко анализируется в литературе и связан с положитель
реактивностью, вносимой стержнями аварийной защиты в начале их движения в
тивной зоне. Имеется, однако, и другой механизм внесения положительной реак
ности, связанный с резким уменьшением расхода через реактор при смене направле
течения теплоносителя в выбегающих ГЦН. Приводы этой группы насосов подключ
к отсеченному в начале эксперимента по пару турбогенератору.



Р и с. 2. Качественный вид участка осциллограммы изменения расхода теплоносителя через реактор

В работе [2] рассмотрен гидромеханический пере
ный процесс, возникающий при отключении и медлен
выбеге одного из двух циркуляционных насосов, рабо
щих на общую нагрузку (реактор). Качественный ана
такой упрощенной расчетной схемы позволяет обнару
указанный выше второй источник возмущения. На р
представлен взятый из [2] качественный вид участка
циллограммы изменения расхода теплоносителя чере
актор. Этот участок включает момент смены направл
течения через отключенный насос, а также процесс во
новления и прекращения изменения расхода, связанн
закрытием обратного клапана. Как видно из рисунка,

рость снижения величины расхода теплоносителя через реактор быстро возрастает и достигает максимума в указанный момент. Это явление обсуждалось и в более поздних работах автора (например, [6]) и в слабой форме было обнаружено при численном исследовании отключения одного из четырех ГЦН в модели системы циркуляции ВВЭР-1000 [7]. Отметим, что гидравлические характеристики насосов в этой установке являются монотонно падающими. Резкое уменьшение расхода теплоносителя через реактор при медленном снижении скорости вращения выбегающего насоса связано с наличием горизонтального, а в случае насосов, используемых в РБМК-1000, даже падающего участка гидравлической характеристики. Способ построения графика изменения расхода теплоносителя через реактор в таком переходном процессе обсуждается в [2].

В материалах, собранных в [8], есть несколько упоминаний об отключении насосов, однако при этом имеется в виду работа системы защиты при недопустимом снижении кавитационного запаса.

Быстрое снижение расхода теплоносителя через реактор приводит к соответствующему росту паросодержания, а из-за положительного парового коэффициента реактивности — и к росту мощности. Система регулирования, по-видимому, не успевает компенсировать это достаточно быстрое возмущение. Расчеты показывают, что этот максимум возмущения совпадает во времени с началом движения стержней аварийной защиты. В литературе нет указаний на причину, по которой оператор нажал кнопку аварийного гашения реактора. Можно, однако, предположить, что к этому моменту скорость падения расхода теплоносителя через реактор и скорость движения регулирующих стержней для поддержания мощности резко возросли, что и могло быть причиной действий оператора.

Следует также отметить, что значительный всплеск мощности возникает не только из-за указанного двойного возмущения, но и из-за существенно нелинейного поведения реактора. Для нейтронной вспышки могло оказаться достаточным на первый взгляд небольшое начальное возмущение, которое перебросило изображающую точку в область притяжения другого соответствующего $N/N_{\text{ном}} \simeq 4$ устойчивого состояния равновесия в фазовом пространстве системы. Дальнейшее поведение уже не связано с возмущением. Грубые оценки показывают, что в переходном процессе выделяющаяся мощность на три порядка превышает номинальную [1].

Значительный рост мощности при вспышке приводит к быстрому разрушению активной зоны, что, конечно, существенно меняет динамические свойства системы, и указанное состояние равновесия не достигается. С точки зрения изложенного, по-видимому, целесообразно еще раз рассмотреть используемые математические модели и результаты проводимых в настоящее время исследований.

Автор счел излишним повторное изложение методики и деталей исследований, представленных в работах [1, 2], которые доступны читателям настоящего сборника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сабаев Е.Ф.** Переходные процессы в кипящих канальных реакторах при потере управления на малых уровнях мощности. — ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1988, вып. 1, с. 3—9.
2. **Смирнов Л.В.** Вывод уравнений и исследование динамики систем циркуляции ЯЭУ. — ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1988, вып. 1, с. 25—35.
3. **Горяченко В.Д.** Качественные методы в динамике ядерных реакторов. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 88 с.
4. **Горяченко В.Д.** Элементы теории колебаний. — Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1995. — 429 с.
5. **Сабаев Е.Ф.** Системы сравнения для нелинейных дифференциальных уравнений и их приложения в динамике реакторов. — М.: Атомиздат, 1980. — 192 с.
6. **Смирнов Л.В.** Математические модели динамики и устойчивости систем принудительной циркуляции теплоносителя. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 128 с.

7. **Смирнов Л.В. и др.** Динамические свойства системы циркуляции теплоносителя первого контура ЯЭУ. — ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1991, вып. 3, с. 25—30.
8. **Первая** международная рабочая группа по тяжелым авариям и их последствиям/Под ред. Е.П. Велих и Л.А. Большова. — М.: Наука, 1990. — 100 с.

Статья поступила в редакцию 23 сентября 199

Вопросы атомной науки и техн

Сер. Физика ядерных реакторов, 1999, вып. 2, с. 75—

УДК 621.039

К ВОПРОСУ ОБ АПРОБАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТНЫХ МЕТОДИК НА ПРИМЕРАХ РЕАЛЬНЫХ АВАРИЙ

Д.Г. Кресов, А.Р. Пряхин, ОКБМ,
603603, Нижний Новгород-74, Бурнаковский пр., 15

Представлены некоторые результаты разработки верификационных подходов в условиях неполн экспериментальной информации.

ON THE APPROBATION OF ENGINEERING CALCULATION PROGRAMS ON EXAMPLES OF R INCIDENTS. D.G. KRESOV, A.R. PHYAHIN. Some results of development verification of the approache conditions of incompletness of the experimental information are submitted.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все более актуальными становятся задачи расширения па метрической области использования расчетных методик на диапазон запроектных ловий работы реакторной установки. Большее внимание уделяется расширению д пазона технических характеристик ЯЭУ. Необходимы программы обучения, пред наченные для эксплуатирующего ЯЭУ персонала: рекомендации по управлению а риями, тренажеры, учебные пособия, включающие рассмотрение глубоко запроект ситуаций, с целью «передачи» персоналу технологий управления аварийными п цессами за рамками разрешенных эксплуатационных пределов и т.д. Все это по зумевает обоснование правомерности используемых расчетных методик в широ параметрическом диапазоне, однако, как правило, сопряжено с дефицитом эксп ментальных данных.

Во многом проблема решается привлечением экспериментального материала отдельным физическим эффектам. Несомненным достоинством этих эксперимен является дифференцированное изучение физических явлений. С точки зрения м дик, используемых при проектных расчетах, «выход» подобных экспериментов о жается в разработке феноменологических коэффициентов, эмпирических коррелят замыкающих системы расчетных уравнений, а также критериальных границ. Но добная разработка почти всегда предполагает экстраполяцию экспериментальных ловий на условия установки.

Имеющиеся стенды, структурно подобные моделируемому объекту и использу для исследования аварийных режимов, в свою очередь ограничены допустимым пазоном изменения параметров, а следовательно, номенклатурой возможных ава ных исходов. В этом плане имеющиеся данные по произошедшим авариям вызы определенный интерес, отвечая рассматриваемым требованиям как по структур подобию, так и по диапазону изменения параметров (по определению). Однако влечение данных по аварийным инцидентам в качестве экспериментальных, как вило, осложнено недостатком исходной информации и поэтому требует нетрадиц ных подходов.

ТРУДНОСТИ, СВЯЗАННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ПО АВАРИЙНЫМ ИНЦИДЕНТАМ

Закономерно, что наибольший аварийный опыт был приобретен при эксплуатации сравнительно многочисленных транспортных ЯЭУ на начальных стадиях развития этого направления. Имеющиеся материалы по этим авариям отличаются ограниченностью исходной информации. К тому же отсутствие записывающего оборудования в период аварии придает определенную специфику этим материалам. Во-первых, динамика процесса представлена в терминах событий, а не в традиционной (для задач верификации) форме на плоскости «параметр—время». Во-вторых по имеющемуся у авторов опыту работ, значительная доля информации субъективна — вариант развития аварии ретроспективно восстановлен участниками событий. Результат этой специфики — неоднозначное представление о возможном варианте развитии аварии. Отсюда следует, что в подобной ситуации критериями адекватности описания, безусловно, могут выступать лишь параметры конечного состояния ЯЭУ. При этом содержательный интерес представляют лишь аварии, в которых произошли необратимые процессы (разгерметизация первого контура, разрушение твэлов и т.д.), имеющие количественные характеристики.

Проблема моделирования аварий осложняется еще и трудностями, связанными с описанием таких малоизученных явлений, как процессы, сопровождающие разрушение твэлов [1]. Здесь показателен опыт расчётной «реконструкции» чернобыльской аварии (ЧА) — результат беспрецедентных усилий большого числа отечественных и зарубежных организаций в условиях привлечения данных системы централизованного контроля (СЦК СКАЛА) и станционных телетайпов. Тем не менее отмечается необходимость дополнительных экспериментальных и расчетных исследований, разработки новых математических моделей [2—4].

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД

В связи с изложенным представляется, что для апробации инженерных расчетных программ (исходя из их назначения) можно ограничиться подтверждением корректности описания аварий на этапах, лимитированных достижением границ работоспособности основного реакторного оборудования. При этом в условиях «заданного» сценария (если единственность такового будет обоснована) правомерно сделать вывод о непринципиальности подтверждения деталей динамики. Действительно, если расчет подтверждает интегральные результаты аварии (в терминах соотношения параметр — критериальная граница), это и означает достаточность инженерной методики, т.е. пригодность к анализу свойств вновь проектируемых установок в аналогичных ситуациях. Здесь более важным является подтверждение способности методики к раскрытию механизма, приводящему к нарушению пределов безопасности.

Анализ аварийных инцидентов показывает, что аварию можно условно разделить на область проектных диапазонов изменения параметров (как правило, это начальные этапы аварии) и область запроектных параметров. Исходя из задач корректного «вхождения» в запроектную область представляется необходимым предварительно провести традиционную верификацию расчетных методик в первой области.

Опыт расчетного анализа первой фазы ЧА (от момента срабатывания АЗ-5 до начала плавления топлива) подтверждает целесообразность использования следующих отработанных методических подходов:

— требование верифицированности методик на метрологических данных плановых режимов;

— привлечение к расчету методик различной специализации и соответствующей глубины моделирования отдельных процессов;

— дифференцированное изучение влияния отдельных факторов на последствия аварии.

Поскольку информация об аварии зачастую не содержит достаточных сведений об исходном состоянии установки либо об исходном событии и, как правило, точной динамике развития событий (характерно практически для всех известных аварийных инцидентов на транспортных реакторах), на первый план выдвигается задача обоснования сценария развития аварии. Для ее решения предлагается реализовать следующий алгоритм:

— на основе имеющейся информации сформулировать возможный вариант исходного состояния (как правило, в качестве первого приближения за основу правомерно взять проектные характеристики);

— определить перечень возможных исходных событий;

— провести оценочные расчеты с целью сокращения вариантов сценариев и (или) уточнения исходных посылок (критерием выбора должно служить соответствие расчетных результатов известным объективным данным);

— на базе уточненных таким образом исходных посылок путем расчетов переходных процессов выделить наиболее значимые факторы, качественно влияющие на топологическую картину аварии;

— полученные сценарии (результат дифференцированного рассмотрения отдельных факторов) классифицировать по характеру потенциальной реализации одного из интегральных показателей. А именно, в рамках каждого из сценариев, как правило, можно выделить инвариант, качественно однотипно реализующий топологию аварии. Наличие качественной инвариантности последовательности определяющих событий позволяет сократить объем исследований — ряд расчетных неопределенностей при поиске сценария может быть «вынесен за скобки»;

— в общем случае в рамках выделенного инварианта можно реализовать несколько механизмов, приводящих к искомому показателю. В такой неоднозначной ситуации представляется целесообразным дифференцированный анализ отдельных этапов аварии;

— каждый из выделенных сценариев (качественно отличающихся вариантов развития аварии) проверить на выполнение других известных фактов. А именно, возможно ли в рамках данной топологии (реализуемой определенным набором исходных посылок) соответствовать другому (другим) условию, имевшему место?

За базовый принимается топологический вариант-сценарий, в наиболее полной мере отвечающий всем объективным фактам (условиям).

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРЕДЛАГАЕМОГО ПОДХОДА

Решаемые задачи. Интерес к проблеме верификации в условиях неполноты исходной информации был стимулирован расчетными исследованиями, выполненными в рамках НИР ОКБМ. Целью работ явилось изучение практических возможностей использования данных по реальным аварийным режимам для верификации расчетных методик.

В качестве исходного материала анализировались данные об авариях на транспортных установках, вызванные несанкционированным вводом положительной реактивности, характеризуемые потерей теплоносителя первого контура и разрушением реакторных конструкций. Анализ проводился по верифицированным (в проектной области) методикам, предназначенным для анализа динамики ядерных остановок водо-водяного типа.

Как пример использования предлагаемого подхода приведем основные результаты исследования реактивностной аварии, произошедшей на одном из заказов в 1968 г. [5].

Обстоятельства аварии. Первопричиной аварии послужила ошибочная перефазировка электропитания приводов компенсирующих органов от резервной линии, а усугубляющей ошибкой явилась подача питания на приводы компенсирующих органов без включения питания системы контроля (при расхоложенном состоянии реактора). Подача питания привела к непрерывному извлечению всех компенсирующих органов до верхних упоров. Аварийное состояние реактора было замечено лишь через ~50 мин по повышению уровня γ-излучения в реакторной выгородке. Авария объективно сопровождалась повреждением каналов активной зоны (невозможностью опустить одну из компенсирующих решеток на нижний концевой выключатель). Зафиксирована потеря первым контуром части теплоносителя из-за временной разгерметизации фланцевых соединений.

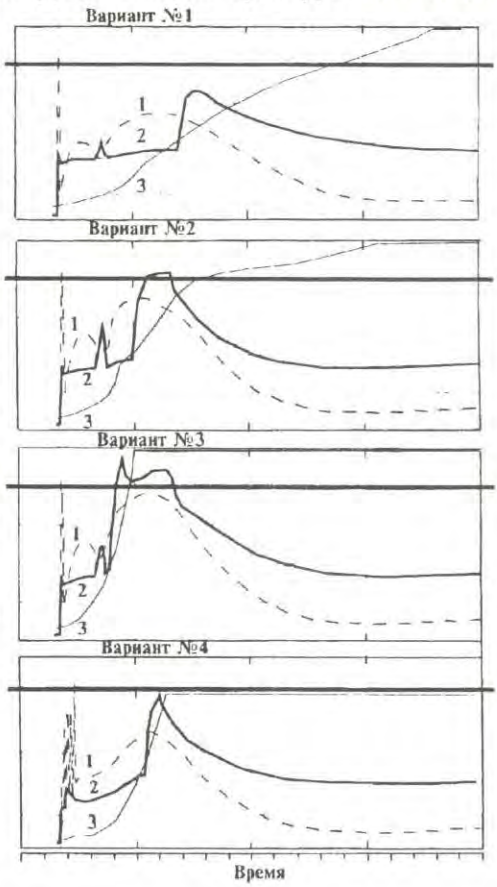
Основные результаты. В соответствии с имеющимися данными в части исходного состояния реактор в расхоложенном состоянии, ЦНПК, насосы третьего и четвертого контуров остановлены, все рабочие органы СУЗ погружены в нижнее положение.

Имеется неопределенность в состоянии арматуры на газовой трассе системы компенсации давления — отключены либо нет ресиверные баллоны (РБ).

При решении задачи нахождения базового сценария аварии были реализованы следующие методические подходы.

1. В условиях исходной неопределенности параметров и состояния ППУ путем дифференцированного расчетного исследования на предмет выявления тенденций были выделены наиболее значимые факторы, влияющие на топологическую картину аварии, в том числе исходное давление в первом контуре, состояние арматуры на газовой трассе системы компенсации давления, «вес» МКП в температурном эффекте. Для этого были проведены расчеты аварии с варьированием различных факторов в пределах их расчетных неопределенностей, а также исходных состояний основного оборудования.

2. Было показано, что варьирование изначально неопределенных исходных посылок не приводит к качественному изменению картины аварии (см. рисунок). Инвариантной осталась последовательность характерных событий: «всплеск» и повторное более плавное увеличение мощности, возрастание температуры твэлов с нарушением пределов безопасности на этапе выхода теплоносителя в закритическое состояние, спад мощности в результате прогрева контурного теплоносителя, разгерметизация первого контура и переход в квазистатику. Как следствие таковой инвариантности, расчетные неопределенности, связанные с эффективностью РО значениями реактивностных эффектов, теплофи-



Варианты протекания моделируемой аварии: 1 — нейтронная мощность реактора; 2 — максимальная по активной зоне температура оболочки твэла; 3 — давление первого контура; жирной горизонтальной линией обозначен температурный порог разрыва оболочки твэла

зическими поправками к нейтронным полям и т.д., при выборе сценария (в качест
базового) оказываются малосущественными. В частности, можно отметить, что перех
доминирующего вклада в реактивность на МКП привел к интегрально большим эне
говыделениям. Как следствие, достижение максимума температуры твэлов реализ
валось при большем значении мощности. Наибольшее значение максимальной те
пературы твэлов наблюдается в ситуации с отключенными РБ. Более жесткая систе
компенсации объема приводит к сравнительно более быстрому повышению давлен
являющемуся сдерживающим фактором для уменьшения плотности теплоносителя
значит, и компенсации положительной реактивности. В результате темп роста мо
ности уже на начальном этапе выше. К моменту достижения температурой мак
мального значения мощность еще увеличивается — качественная особенность толь
этого варианта (во всех остальных случаях повышение температуры происходит у
на спаде мощности). В результате период удержания температуры на опасном уров
в этом варианте наиболее продолжителен. При развитии аварии в предпосылке низк
начального давления существует особенность, связанная с более быстрым развити
процессов кипения. В частности, этап выхода реактора в надкритичность сопров
дается не единичным «всплеском» мощности, а серией нейтронных вспышек, вызв
ных вскипанием теплоносителя на фоне введения положительной реактивности. К
следствие быстрого развития процессов кипения начальный этап аварии проходит
более высоких теплотехнических запасах и, следовательно, более низкой температ
твэлов в активной зоне. Интенсивное кипение более эффективно компенсирует в
димую положительную реактивность, приводя в итоге к относительно меньшим ур
ням мощности и температуры твэлов.

3. Дополнительный расчетный анализ, заключающийся в фрагментарном рассм
рении различных этапов аварии в условиях варьирования определяющих фактор
позволил обосновать единственно возможный в данной ситуации механизм разруше
границ каналов. Были показаны недостижимость пределов безопасности на эт
«вспышки» мощности и, наоборот, возможность их нарушения в период перехода т
лоносителя в закритическую область параметров за счет смены условий теплоотв
в нижней части активной зоны (переход от неравновесного кипения к конвективн
теплообмену). Как показали расчеты начальной стадии аварии, варьирование ве
чины критического теплового потока в рамках максимальной погрешности его оп
деления незначительно сказалось на развитии теплогидравлических процессов и
намике параметров реактора в целом, что связано с отсутствием в каналах даже
равновесного пара практически на всем этапе роста температуры твэлов. Таким
разом, процесс вспышки мощности близок к адиабатическому варианту (в услов
слаборазвитого расхода конвективная теплоотдача мала) и, следовательно, может р
сматриваться как предельно консервативный.

4. Исходя из данных о конечном температурном состоянии теплоносителя б
сделано заключение о консервативности исходных оценок начала разгерметиза
первого контура. При этом увеличение предельного давления продлило в расче
время нахождения твэлов в экстремальных условиях.

Имея в виду слабую зависимость топологической картины аварии от исход
посылок и в то же время расчетные погрешности и конструктивные неопределенно
отдать предпочтение какому-либо из рассмотренных вариантов в данной ситуа
представляется неправомерным. Можно лишь констатировать, что расчетный ана
выявив условия и механизм нарушения пределов безопасности в ходе реактивност
аварии, показал возможность адекватного описания ее интегральных последствий.
четно были превышены критерии безопасности как в части целостности первого к
тура, так и в части термического разрушения конструкции активной зоны, что со
суется с имеющимися данными по аварии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, полученные при исследованиях инцидентов на ЯЭУ, подтверждают эффективность предложенного алгоритма восстановления топологической картины аварии в условиях неполноты первичной информации. Это позволяет сделать вывод о практической возможности привлечения имеющихся данных по реальным авариям в качестве дополнительного экспериментального материала и исследования механизмов, приводящих к нарушению пределов безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Седов А.А.** Некоторые безопасные и феноменологические аспекты быстрых реактивностных аварий водоохлаждаемых реакторов. Методологические проблемы их моделирования. — ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 1996, вып. 3.
2. **Афанасьева А.А., Федосов А.М., Дондерер Р. и др.** Анализ аварии на Чернобыльской АЭС с учетом разрушения активной зоны. — Атомная энергия, 1994, т. 77, вып. 2, с. 87—93.
3. **Подлазов Л.Н., Трехов В.Е., Черкашов Ю.М. и др.** Расчетное моделирование аварии на четвертом энергоблоке Чернобыльской АЭС. — Атомная энергия, 1994, т. 77, вып. 2, с. 93-100.
4. **Новосельский О.Ю., Подлазов Л.Н., Черкашов Ю.М.** Чернобыльская авария. Исходные данные анализа. — ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 1994, вып. 1, с. 3—5.
5. **Полвека** в атомном машиностроении/Под общей редакцией Ф.М. Митенкова. — Н. Новгород: КиТиздат, 1997. — 304 с.

Статья поступила в редакцию 19 апреля 1999 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Физика ядерных реакторов, 1999, вып. 2, с. 78—83.

УДК 621.039.553:621.039.58

КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ТВЭЛ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ ТВЭЛОВ В НОРМАЛЬНЫХ И АВАРИЙНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А.В. Алексеев, ГНЦ РФ «Научно-исследовательский институт атомных реакторов», 433510, Димитровград-10 Ульяновской обл.

Создан комплекс программ ТВЭЛ для расчета стационарного и нестационарного распределения одномерного и двумерного температурного поля многоэлементного облучательного устройства или твэла сложного профиля сечения. Программы предназначены для расчета нормальных и аварийных режимов. Приведены результаты сопоставительного анализа данных, полученных с помощью разработанных и известных кодов или аналитических методов. Комплекс целесообразно применять для уточнения распределения температуры твэлов при использовании контурных программ (таких, как TRANS и ТРАП).

SET OF THE CODES TVEL FOR CALCULATIONS TEMPERATURE OF FUEL ELEMENTS IN TRANSIENT AND ACCIDENT PROCESSES. A.V. Alekseev. There is a set of the computer codes that is intended for calculating the temperature in the stationary and transient regimes for one- and two- dimensions fields of a irradiation rig or fuel element with complicated profile. The codes are created to be used for normal and accident conditions. The result of data analysis done for developed and weel-known codes are discussed. The set of codes should be implied to refine the temperature distribution within the fuel element when the profile codes such as TRANS and ТРАП are used.

ВВЕДЕНИЕ

Комплекс программ ТВЭЛ позволяет рассчитать температуру твэлов и облучательных устройств в стационарных и нестационарных режимах при переменных по периметру коэффициентах теплопередачи зазоров и теплоносителя. Комплекс целе-

сообразно применять для уточнения распределения температуры твэлов при исполь-
зовании контурных программ, таких, как TRANS и ТРАП [1, 2], а также для пре-
тестовых расчетов температуры облучательных устройств.

ОПИСАНИЕ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ

Назначение комплекса программ — расчет одномерного или двумерного темп-
ратурного поля твэла или экспериментального устройства сложного профиля сечен-
в стационарных, переходных и аварийных режимах.

Отличительной особенностью комплекса является детальный расчет температу-
ного поля при переменном по высоте или периметру коэффициенте теплопереда-
через газовые зазоры или к теплоносителю. При *XY*-геометрии рассчитывается ра-
пределение температуры в нескольких сечениях (до 30). При этом в аксиальном н-
правлении учитывается перенос тепла только теплоносителем. При *RZ*-геометрии мож-
но рассчитывать перенос тепла в аксиальном направлении по компонентам твэла.

Некоторые примеры решаемых задач: расчет температуры твэлов со смещени-
таблеток топлива в радиальном направлении относительно оболочки; расчет темп-
ратуры топлива с высоким выгоранием (учет накопления плутония в поверхностн-
слое и, как следствие, неравномерного энерговыделения по радиусу); расчет темп-
ратуры оболочки и топлива при неравномерном охлаждении оболочки по периметр-
что характерно при авариях LOCA с резким снижением давления и деформацией об-
лочки, и другие задачи с изменением во времени коэффициента теплопередачи
периметру и высоте твэла.

Математическая модель основана на численном решении уравнений баланса эн-
гии и массы и реализована методом конечных элементов. Устройство разбивается
конечные элементы в виде плоских, цилиндрических или сферических слоев (од-
мерная задача), треугольников или колец (двумерная *XY* или *RZ*). Аппроксимац-
температуры осуществляется с помощью кусочно-линейной зависимости от декартов-
координат, построенной с помощью линейных базисных функций для каждого кон-
ного элемента [3]. Уравнение баланса энергии записывается для каждого узла сет-
Система уравнений решается фронтальным методом Гаусса.

Рассчитываются распределение температуры в нескольких (до 30) сечениях, р-
положенных вдоль оси устройства, а также энтальпия и расход охлаждающего т-
теплоносителя (по одному значению в каждом сечении).

Для двумерной задачи распределение коэффициента теплопередачи по перимет-
поверхности теплообмена задается значениями в узловых точках как кусочно-лин-
ная функция от координат. Распределение плотности потока тепла по периметру им-
квадратичную зависимость от координат и рассчитывается с использованием тем-
ратуры и коэффициента теплоотдачи в узлах поверхности.

Для одномерной задачи максимальное количество рассчитываемых элементов (
талей) равно 20.

Принято, что каждая деталь выполнена из определенного материала. Для удобст
пользователя имеются данные по теплофизическим свойствам алюминия, графи
бериллия, натрия, калия, углеродистой стали, перлитной стали, аустенитной ста
сплава Zr + 1%Nb, циркалоя, бронзы Cu + 5%Mn, сплава U—Al, диоксида ура
карбида урана, кермета UO_2 + 79%Cu, порошка UO_2, диоксида плутония, Zr
Al_2O_3, вольфрама, карбида бора, MgO. Между деталями могут быть зазоры, зап-
ненные смесями газов с водяным паром.

Имеется модель расчета давления и состава смеси газов в герметичном объем
учетом температуры и изменения состава из-за пароциркониевой реакции [4].

Некоторые особенности расчетной модели. При расчете режимов с кризисом кипения теплоносителя используются зависимости из программы TRANS-8K (НИКИЭТ) [1] для нижней границы температуры стенки, соответствующей режиму развитого пленочного кипения, а также для коэффициента теплоотдачи в переходном режиме пленочного кипения (выход из кризиса кипения).

При расчете проводимости газового зазора рассчитывается проводимость газовых зазоров с учетом свободной конвекции и теплопроводности газовых смесей. Учитывается термическое расширение топлива и оболочки и рассчитывается тепловая проводимость зазора с учетом аккомодации молекул газа при взаимодействии с поверхностью [5].

Для учета источников тепла подсчитываются источники, распределенные по объему элементов (реакция деления или радиационное энерговыделение) и по поверхности элемента из циркония на границе с паром (пароциркониевая реакция). Энергия реакции пара с цирконием учитывается известными зависимостями [6].

Структура комплекса. Комплекс состоит из программ ГЕОМЕТРИЯ, ТВЭЛ и ТВЭЛ-3, написанных на языке Fortran Power Station 4.00 и являющихся DOS-приложением в системе Windows на ЭВМ типа IBM PC.

Назначение программы ГЕОМЕТРИЯ — разбиение расчетного устройства на конечные элементы. Результаты используются в качестве исходных данных для программ ТВЭЛ и ТВЭЛ-3, рассчитывающих распределение температуры в системах координат R или RZ, код ТВЭЛ и XY, код ТВЭЛ-3 соответственно. Программа ГЕОМЕТРИЯ позволяет выбрать требуемую форму элементов, количество конечных элементов и вывести на экран рисунок разбиения. Используются следующие стандартные исходные элементы (пять вариантов, при этом возможны комбинации нескольких связанных между собой элементов):

1) сектор многослойного цилиндра, слои расположены по радиусу, возможна полость в центре;

2) многослойный многоугольник;

3) твэл крестообразного сечения с оболочкой и без зазора между топливом и оболочкой (два варианта: 1/8 и 1/2 сечения);

4) цилиндр для задачи в RZ-геометрии.

Исходные данные для программ ТВЭЛ и ТВЭЛ-3:

— геометрические параметры, полученные с помощью программы ГЕОМЕТРИЯ;

— геометрические параметры канала с твэлом или с облучательным устройством, охлаждаемым теплоносителем;

— число сечений, распределение температуры в которых рассчитывается;

— материалы элементов устройства;

— зависимости теплофизических свойств материалов от температуры;

— параметры реакции циркония или стали с паром;

— функции изменения во времени энерговыделения в элементах твэла или облучательного устройства, расхода, давления и энтальпии теплоносителя на входе в устройство;

— распределение энерговыделения по радиусу и высоте в зависимости от решаемой задачи;

— коэффициенты теплопередачи зазоров и от твэла к теплоносителю в зависимости от азимутального угла и осевой координаты (определяются по эмпирическим зависимостям или задаются в табличной форме);

— зависимости поверхностной плотности критического теплового потока от относительной энтальпии и коэффициента теплопередачи при кризисе кипения от массовой скорости;

— шаг времени расчета и вывода результатов.

Используются таблицы свойств воды и пара в интервале температуры 40—800 °С и давления 0,1—21 МПа и таблицы свойств газов.

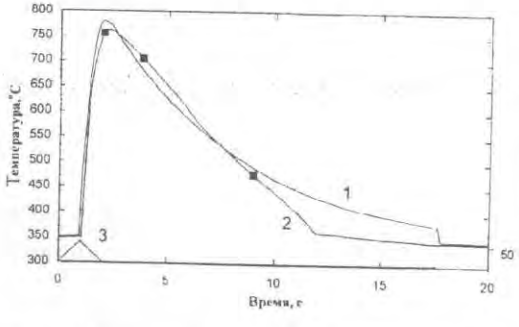
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ДЛЯ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОГРАММЫ

ПРОГРАММА ТВЭЛ

Для демонстрации возможностей программы при расчетах режимов с резким изменением температуры (вход и последующий выход из кризиса кипения) выбраны расчеты аварийных процессов в активной зоне водоохлаждаемого реактора с импульсом мощности (авария RIA) или снижением расхода (быстрый вход в режим «малая течь»). Процесс расчета в данных примерах устойчив.

Расчет температуры твэла ВВЭР при импульсе мощности. Расчет твэла в режиме с импульсом мощности в аварии, вызванной всплеском реактивности, выполнен по программам КАНАЛ из комплекса ТЕЧЬ-М4 и по рассматриваемому коду ТВЭЛ. Принято, что полуширина импульса мощности равна 1 с и амплитуда 50. Параметры теплоносителя: давление 15,7 МПа; массовая скорость 714 кг/(м^2·с); температура на входе 340 °С. Исходная тепловая нагрузка твэла 40 Вт/см. Параметры фрагмента твэла: длина 50 мм; диаметр оболочки 9,15×0,65 мм; диаметр осевого отверстия 1,4 мм; исходная проводимость зазора между топливом и оболочкой 7000 Вт/(м^2·°С).

В программе ТВЭЛ значения критической плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи к теплоносителю при вхождении в режим с кризисом кипения на поверхности оболочки задавались равными $1{,}8 \cdot 10^6$ Вт/м^2 и 2400 Вт/(м^2·°С), в кризисе и при выходе из кризиса использовались зависимости из программы TRANS-8K. В программе КАНАЛ эти величины рассчитываются по эмпирическим зависимостям и интерполяционным формулам [7].

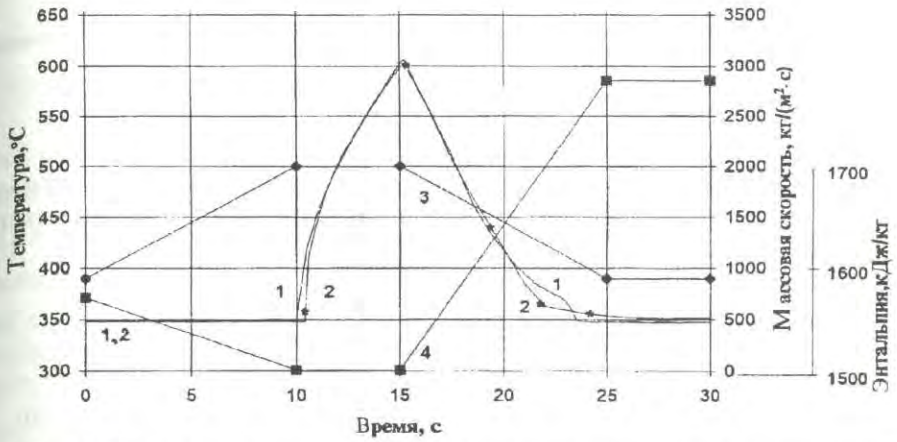


Р и с. 1. Температура внешней поверхности оболочки твэла ВВЭР при импульсе мощности. Результаты, полученные с использованием программ: 1 — ТВЭЛ; 2 — КАНАЛ; 3 — относительная мощность (исходные данные)

Форма импульса и зависимости температуры внешней поверхности оболочки от времени приведены на рис. 1. Значения температуры, полученные по программам КАНАЛ и ТВЭЛ близки до момента времени, равного 8 с (500 °С), после которого температура по программе ТВЭЛ снижается медленнее, чем по программе КАНАЛ. Это обусловлено различием принятых в программах способах расчета коэффициента теплоотдачи в переходном режиме на конечной стадии расчета. На начальном участке различие расчетных значений величины T—T_s не превышает 8% (T_s — температура насыщения).

Расчет твэла ВВЭР в режиме изменения расхода и энтальпии теплоносителя. Расчетные параметры: тепловая нагрузка твэла 100 Вт/см; давление теплоносителя 15,7 МПа; относительное уменьшение массовой скорости 100 раз (исходное значение 714 кг/(м^2·с)); начальная температура теплоносителя на входе в участок 340 °С.

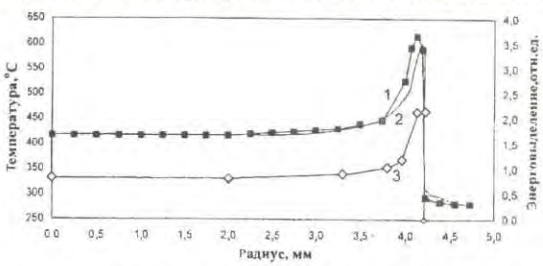
Зависимости температуры оболочки, энтальпии и массовой скорости теплоносителя от времени приведены на рис. 2. Значения коэффициента теплоотдачи к теплоносителю и критической плотности теплового потока в программе ТВЭЛ задавались как функции от относительной энтальпии и массовой скорости. Отличия результатов расчетов установлены в переходных режимах со сменой режимов охлаждения и по величине незначительны. Причины различий заключаются в использовании различных замыкающих соотношений в переходных режимах, т.е. те же, что при расчете температуры в режиме с импульсом мощности.



Р и с. 2. Твэл ВВЭР в режиме изменения расхода и энтальпии теплоносителя. Температура внешней поверхности оболочки, полученная с использованием программ: 1 — ТВЭЛ; 2 — КАНАЛ; 3, 4 — удельная энтальпия и массовая скорость соответственно (исходные данные)

Расчет режима испытания твэла PWR при имитации аварии, вызванной ростом реактивности (испытание RepNa1 на реакторе CABRI) [8]. Характеристики твэла и параметры режима испытаний: выгорание топлива 63 МВт·сут/кг U; толщина RIM-слоя (слоя с повышенным содержанием плутония, образовавшегося при значительном выгорании топлива) 0,2 мм; теплопроводность RIM-слоя при расчете по программе ТВЭЛ 1,5 Вт/(м·°С); температура теплоносителя ($T_{\text{тепл}}$) 280 °С; полуширина импульса мощности 9,5 мс; максимальный прирост энтальпии топлива 410 кДж/кг; прирост энтальпии топлива к моменту 74 мс 43 кДж/кг.

Результаты получены по программам SCANAIR [8] и ТВЭЛ. На рис. 3 приведено сравнение распределений температуры по радиусу твэла в момент времени 74 мс, для которого в работе [8] приводятся результаты расчета по программе SCANAIR. Отличия значений температуры незначительны и максимальны при расчете температуры RIM-слоя (не более 60 °С, различие в величине $T—T_{\text{тепл}}$ не превышает 15%) и, вероятно, объясняются высокими значениями коэффициентов теплопередачи зазора и теплопроводности топлива в области RIM-слоя, используемыми в коде SCANAIR (см. зависимость температуры от времени и ее градиент на участках, прилегающих к максимуму).

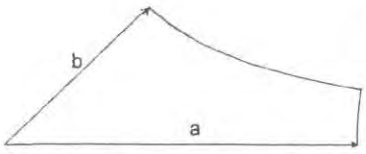


Р и с. 3. Расчетное распределение температуры по радиусу твэла в испытании RepNa1 на 74 мс. Результаты, полученные с использованием программ: 1 — ТВЭЛ; 2 — SCANAIR; 3 — энерговыделение (исходные данные)

ПРОГРАММА ТВЭЛ-3

Расчет температуры твэла крестообразного профиля сечения. Результаты расчета по программе ТВЭЛ сравниваются с данными, полученными аналитическим стационарным методом конформных отображений [9]. В этом методе 1/8 часть сечения твэла без оболочки заменяется областью более простой формы с равной оригиналу площадью сечения. Расчеты по программе ТВЭЛ выполнены с использованием следующих параметров твэла: ε = 1,4, 2,1 и 2,4; $\varepsilon = a/b$, где a и b — длина полки и радиус впадины сечения соответственно (рис. 4).

Сравнение результатов расчетов (табл. 1, где $\text{Bi} = \alpha d/\lambda$; $d = 4f/\Pi$; f и Π — сечение и периметр твэла соответственно; λ — теплопроводность топлива) показывает хорошее



Р и с. 4. Расчетная область (1/8 сечения) твэла крестообразного сечения без оболочки

совпадение значений коэффициента неравномерности плотности теплового потока ($k = Q_{S,\max}/Q_{S,\text{ср}}$) по периметру оболочки твэла. Отличие значений k минимально (< 0,5%) при $\varepsilon = 1{,}4$ и в целом не превышает 1,5%.

Т а б л и ц а. 1. Коэффициент неравномерности плотности теплового потока

Bi	$\varepsilon = 1{,}4$		$\varepsilon = 2{,}1$		$\varepsilon = 2{,}4$	
	ТВЭЛ	[9]	ТВЭЛ	[9]	ТВЭЛ	[9]]
0,5	1,111	1,11	1,258	1,26	1,341	1,33
1	1,190	1,19	1,398	1,40	1,489	1,48
2	1,294	1,30	1,523	1,54	1,631	1,64
5	1,437	1,44	1,670	1,695	1,774	1,79

Расчет температуры твэла с азимутальной неравномерностью коэффициента теплопередачи. Выполнены расчеты температуры твэла с неравномерным по периметру коэффициентом теплопередачи газового зазора между оболочкой и сердечником и неравномерным коэффициентом теплообмена с теплоносителем. Данная задача решена аналитическим стационарным методом в [10].

Характеристики твэла и параметры стационарного режима его охлаждения приняты такими, как в [10]: диаметр топлива (без отверстия) 12 мм; толщина оболочки из стали 0,4 мм; плотность теплового потока на внешней поверхности оболочки твэла 10^6 Вт/м^2; температура теплоносителя 100 °С; теплопроводность UO_2, UC и стали 3,5, 22 и 17 Вт/(м·°С) соответственно.

НЕРАВНОМЕРНОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ЗАЗОРА МЕЖДУ ТОПЛИВОМ И ОБОЛОЧКОЙ α_3

Рассчитана температура оболочки и сердечника в секторе твэла, равном 180 °С. Варианты расчетов: 1 — топливо UO_2, 2 — топливо UC. Коэффициент теплопередачи зазора топливо—оболочка (Вт/(м·°С)) задавался в виде зависимости $\alpha_3 = 5\cdot 10^3/(1 + 0{,}9\cos(\phi))$, где $\phi = 0$—180 °С — азимутальный угол.

Коэффициент теплообмена с теплоносителем задавался $\alpha_T = 10^4$ Вт/(м^2·°С). Сектор твэла делился на 18 сегментов по углу и 14 слоев по радиусу, которые в свою очередь делились на 486 треугольных конечных элементов. Значения разности температур внешней поверхности оболочки и теплоносителя в нескольких точках периметра сектора твэла в 180 °С приведены в табл. 2. Относительное различие значений разности температуры не более 2%.

Т а б л и ц а 2. Разность температур оболочки и теплоносителя

Топливо	0		90°		180°	
	[10]	ТВЭЛ-3	[10]	ТВЭЛ-3	[10]	ТВЭЛ-3
UO_2	91,8	92,2	99,7	99,4	110,0	108,6
UC	74,3	74,1	95,7	94,0	139,8	138,9

НЕРАВНОМЕРНОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ α_T

Рассчитана температура оболочки и сердечника с топливом UC в секторе твэла, равном 30°. Распределение α_T (Вт/(м^2·°С)) по периметру принималось по зависимости [10] $\alpha_T = 10^4(1-0{,}3\cos(6\phi))$.

Варианты значений $\alpha_3 = 0{,}25\cdot10^4, 0{,}50\cdot10^4, 10^5$ Вт/(м^2·°С). Радиальные границы сектора считались теплоизолированными. Для расчета по программе ТВЭЛ-3 сектор разбивался на 10 сегментов и 22 слоя по радиусу (430 конечных элементов). Результаты расчетов по программе ТВЭЛ-3 практически равны данным работы [10] (табл. 3).

Таблица 3. Разность температуры оболочки и теплоносителя

α_3, Вт/(м^2·°С)	0		15°		30°	
	[10]	ТВЭЛ	[10]	ТВЭЛ	[10]	ТВЭЛ
$0{,}25\cdot10^4$	121,0	120,7	102,0	101,6	85,8	85,8
$0{,}5\cdot10^4$	119,5	119,2	101,8	101,5	86,9	86,7
10^5	113,8	113,4	101,3	101,1	91,0	90,5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, поверочными расчетами температуры твэлов различной формы подтверждена достоверность получаемых результатов одномерных и двумерных расчетов температуры твэлов в стационарных и аварийных режимах с использованием комплекса программ ТВЭЛ. Точность двумерных расчетов проверена аналитическим методом, одномерных — сравнением с результатами расчетов по другим программам.

Комплекс целесообразно применять для уточнения распределения температуры твэлов при использовании контурных программ (таких, как TRANS и ТРАП).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Миронов Ю.В., Разина Н.С., Фомичева Т.И.** Математическая модель и метод численного решения нестационарных задач в программе TRANS-7. — ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1987, вып. 3, с. 3— 11.
2. **Спасских В.П., Зайцев С.П., Волков Г.А.** — ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1982, вып. 7(20), с. 72.
3. **Стренг Г., Фикс Дж.** Теория метода конечных элементов. — М.: Мир, 1977.
4. **Викторов М.М.** Методы вычисления физико-химических величин и прикладные расчеты. — Л.: Химия, 1977.
5. **Харитонов В.В., Кокорев Л.С., Дельвин Н.Н.** О роли коэффициента аккомодации в контактном теплообмене. — Атомная энергия, 1973, т. 5, с. 360—361.
6. **Соляный В.И., Бибилашвили Ю.К., Драпенко Б.В. и др.** Исследования коррозионного поведения оболочек твэлов из сплава Zr—1%Nb в паре при высоких температурах. — ВАНТ. Сер. Атомное материаловедение, 1988, вып. 2, с. 89.
7. **Ефанов Е.Д. и др.** Анализ экспериментов по повторному заливу и верификация расчетных кодов. Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР. — В кн.: Тр. междунар. конф. «Теплофизика-98». — Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 1998, т. 1, с. 400—410.
8. **Papin J., Rigat H., Breton J.P., Schmitz F.** The behaviour of irradiated fuel under RIA transient: interpretation of the CABRI experiments. — IAEA Technical Committee Meeting on «Behaviour of LWR core materials under accidents conditions» (Dimitrovgrad, Russia, 9—13 October 1995). — Димитровград: ГНЦ НИИАР, 1996.
9. **Гарусов Е.А., Грачев С.Д.** Теплоотвод от тел крестообразного поперечного сечения: Препринт № 660 Ленинградского института ядерной физики им. Б.П. Константинова АН СССР. — Л., 1981.
10. **Nijsing R.** Temperature and heat flux distribution in nuclear fuel element rods. — Nucl. engng and design, 1966, vol. 4, p. 1—20.

Статья после переработки поступила в редакцию 18 апреля 1999 г.

Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Физика ядерных реакторов, 1999, вып. 2, с. 83—89.

УДК 536.24

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА И ЭВОЛЮЦИИ ОБВОДНЕННОГО АЭРОЗОЛЯ В ПРИЛОЖЕНИИ К ТЯЖЕЛЫМ АВАРИЯМ НА АЭС С ВВЭР

А.Г. Годизов, ГНЦ РФ Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, 249020, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1

Цель данной работы — установление связи между двумя уровнями детализации описания аварий: от дифференциального (кинетическое уравнение) к интегральному (моменты функции распределения).

PHYSICAL-MATHEMATICAL MODELS OF HYDRATED AEROSOLS TRANSPORT AND EVOLUTION AS APPLIED TO MAJOR ACCIDENTS IN PWR-TYPE APP's. A.G. CODIZOV. The purpose of the present work consists in a establishment of connection between two levels of detailed elaboration of the description of failures: from differential (kinetic equation) to integrated (moment of distribution function).

Используемые обозначения

ρ — плотность смеси; ρ_1 — плотность воздуха; ρ_v — плотность пара; ρ_{vs} — плотность насыщенного пара; $\vec{V}$ — скорость среды; P — водность; ρ_w — плотность конденсированной воды; D — коэффициент диффузии пара в воздухе; D_d — коэффициент диффузии капель; S — площадь поверхности капли; S_s — площадь поверхности эквивалентного солевого ядра; S_n — площадь поверхности нерастворимого ядра конденсации; c_v — удельная теплоемкость смеси; L — скрытая теплота конденсации пара; k — теплопроводность смеси; R — радиус капли; K_{ij} — коэффициент турбулентной диффузии несущей среды; n — счетная концентрация капель; α_p, α_μ — коэффициенты, учитывающие вероятность прилипания капель к поверхностям; v_n — нормальная составляющая скорости потока к поверхности.

При авариях на ВВЭР АЭС с потерей теплоносителя в контейнменте происходят сложные физико-химические процессы, перенос пара, тепла и аэрозольных частиц. Изучение микрофизических процессов, протекающих под замкнутой герметичной оболочкой (ЗО) при тяжелых авариях с потерей теплоносителя, необходимо для обеспечения безопасности АЭС и оценки вредных влияний на окружающую среду в случае разгерметизации ЗО.

Поскольку полное описание и численное моделирование сценария тяжелой аварии в рамках единой физико-математической модели практически невозможно, сценарий аварии разбивается на фрагменты, в рамках которых изучаются наиболее значимые процессы. Одним из таких фрагментов является проблема переноса радиоактивности под ЗО АЭС.

В процессе аварии под ЗО поступают перегретый пар и многочисленные радиоактивные продукты деления (ПД). С целью упрощения модели переноса их можно разбить на три группы: летучие, малолетучие и нелетучие. К первой группе отнесем радиоактивные благородные газы, которые не вступают ни в какие химические реакции и процессы переноса которых аналогичны процессам переноса воздуха. Типичным представителем второй группы является газообразный йод I_2. В парогазовой среде контейнмента протекают быстрые химические реакции

$$I_2 + 2H_2O \rightarrow 2IOH + H_2 \qquad (1)$$

и

$$I_2 + H_2 \rightarrow 2HI. \qquad (2)$$

Химические вещества IOH и HI, хорошо растворяясь, интенсивно поглощаются конденсированной влагой до установления динамического равновесия. Представителями третьей группы являются нерастворимые соединения, например окись урана UO_2.

При разгерметизации контура высокого давления под ЗО ВВЭР поступает перегретый пар, который в процессе расширения и перемешивания с воздухом контейнмента остывает и конденсируется на ядерных компонентах (ЯК), содержащихся в воздухе и поступающих вместе с паром, на холодных поверхностях контейнмента и оборудования. В условиях такой аварии на начальной стадии практически весь аэрозоль оказывается капельным. Дальнейшая эволюция радиоактивного аэрозоля тесно связана с процессами объемной конденсации, включающими конденсационный рост капель в поле пара, коагуляцию капель, седиментацию и осаждение на поверхностях контейнмента и оборудования.

Наиболее полная постановка задачи объемной конденсации и переноса ПД представляет собой систему трехмерных интегродифференциальных уравнений, описывающих движение парогазовой капельной турбулентной среды, эволюции функции распределения капель по размерам, содержанию гигроскопических веществ и размерам нерастворимых ЯК $f(\vec{x}, t; S, S_s, S_n)$, а также термогидродинамических полей плотности пара $\rho_v(\vec{x}, t)$, плотности воздуха $\rho_1(\vec{x}, t)$, плотностей летучих и малолетучих ПД $\rho_i^{\text{ПД}}(\vec{x}, t)$, температуры среды $T(\vec{x}, t)$ с соответствующими начальными и граничными условиями.

Важными для прогноза негативных последствий аварии и выработки мер по наиболее полной ее локализации являются сведения о содержании ПД в объеме и на поверхностях контейнмента в каждый момент времени.

Если записана система трехмерных стохастических уравнений, то осреднением по пространственным координатам возможен переход к двумерной, одномерной и в сосредоточенных параметрах задачам. Исходная система уравнений конденсации имеет вид:

$$\frac{df}{dt} + f\operatorname{div}\vec{V} + \frac{\partial}{\partial s}\dot{s}f = I_f + St; \tag{3}$$

$$\rho = \rho_1\rho_v + P; \tag{4}$$

$$\frac{d\rho_1}{dt} + \rho_1\operatorname{div}V + 0; \tag{5}$$

$$\frac{d\rho_v}{dt} + \rho_v\operatorname{div}\vec{V} = -\frac{\rho_w}{2\sqrt{4\pi}}\overline{s^{1/2}\dot{s}f} + D\Delta\rho_v; \tag{6}$$

$$\frac{dP}{dt} + P\operatorname{div}\vec{V} = -\frac{\rho_w}{2\sqrt{4\pi}}\overline{s^{1/2}\dot{s}f} + D_d\Delta P; \tag{7}$$

$$\frac{d}{dt}(c_v\rho T - LP) + (c_v\rho T - LP)\operatorname{div}\vec{V} = -\operatorname{div}P_p\vec{V} + k\Delta T. \tag{8}$$

Здесь

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{V}\frac{\partial}{\partial\vec{x}}; \tag{9}$$

$$\dot{s} = \frac{8\pi D}{\rho_w}[\rho_v - \rho_{vs}(1 + F)]; \tag{10}$$

$$\overline{Af} = \int_0^\infty ds \int_0^\infty ds_s \int_0^\infty ds_n Af(\vec{x}, t; S, S_s, S_n); \tag{11}$$

$$P = \frac{4\pi}{3}\rho_w \overline{R^3 f} \text{ (водность)}. \tag{12}$$

Система уравнений (3)—(8) вместе с соотношениями (9)—(12) описывает термодинамическую эволюцию среды с учетом фазовых переходов пар—жидкость.

Для получения турбулизованных уравнений применяется процедура Рейнольдса $A = \overline{A} + A'$, предполагается возможность диффузионного приближения $T_L \ll t$, $L \ll 1$. В линейном приближении по пульсациям можно получить явные решения для пульсационных величин с учетом их неадиабатичности. Эффектами вязких сил на временах $t \le T_1$ пренебрегаем, в связи с чем $\mathrm{div}\vec{V}' = 0$. Вычисление турбулентных потоков проводится впрямую с использованием соотношения

$$\langle v_i'(t) v_j'(t_1)\rangle = v^2 \exp -(|t - t_1|/T_L)\partial_{ij}. \tag{13}$$

Коэффициент турбулентной диффузии определен как

$$K_{ij} = \int_0^t dt_1 \langle v_i'(t) v_j'(t_1)\rangle. \tag{14}$$

При условии, что пульсационные скорости много меньше скорости звука $|v'| \ll c$, выполняется соотношение

$$\rho' \ll \overline{\rho}, \tag{15}$$

что существенно упрощает уравнения для осредненных величин.

Определяя время фазовой релаксации пара к равновесному значению насыщенного пара как

$$\tau^{-1} = 4\pi D\overline{Rf}, \tag{16}$$

запишем уравнения стохастической конденсации в виде

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} f v_i - \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial x_i} K_{ij}\frac{\partial f}{\partial x_j} - \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial x_i}\left[K_{if} f_{2f}\frac{8\pi D}{\rho_w}\frac{\overline{\rho} c_v}{L}\frac{T_L}{2}\frac{1}{1+\frac{\gamma_1 T_L}{2\tau}}\frac{\partial f}{\partial s}\right] + \frac{\partial}{\partial s}\dot{s} f -$$

$$- \frac{1}{2} K_{if} f_{2i}\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial s}\frac{8\pi D}{\rho_w}\frac{\rho c_v}{L}\frac{T_L}{2}\frac{2+\frac{\gamma_1 T_L}{2\tau}}{\left(1+\frac{\gamma_1 T_L}{2\tau}\right)^2} -$$

$$- \frac{1}{2} K_{if} f_{2i} f_{2j}\left(\frac{8\pi D}{\rho_w}\frac{\rho c_v}{L}\right)^2\left(\frac{T_L}{2}\right)^2\frac{3+\frac{\gamma_1 T_L}{\tau}}{\left(1+\frac{\gamma_1 T_L}{2\tau}\right)^2\left(1+\frac{\gamma_1 T_L}{\tau}\right)}\frac{\partial^2 f}{\partial s^2} = I + St; \tag{17}$$

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}\rho_v v_i = \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial x_i}\left[K_{if} f_{1f}\frac{\rho c_v}{L}\frac{\gamma_1 - 1}{\gamma_1}\right] + \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial x_i}\left[K_{if} f_{2f}\frac{\rho c_v}{L}\frac{1}{\gamma_1}\frac{1}{1+\frac{\gamma_1 T_L}{2\tau}}\right] + \frac{\rho_w}{2\sqrt{4\pi\tau}}\overline{s^{1/2}\dot{s} f} -$$

$$- \frac{1}{2} K_{if} f_{2i}\frac{\rho c^v}{L}\frac{T_L}{2}\frac{2+\frac{\gamma_1 T_L}{2\tau}}{\left(1+\frac{\gamma_1 T_L}{2\tau}\right)^2} - \frac{\partial}{\partial x_j}\frac{1}{\tau} +$$

$$+ K_{ij} f_{2i} f_{2j} \frac{\rho_w}{32\pi} \left(\frac{8\pi D}{\rho_w} \frac{\rho c_v}{L} \right)^2 \left(\frac{T_L}{2} \right)^2 \frac{\left(3 + \frac{\gamma_1 T_L}{\tau} \right) \overline{R^{-1} f}}{\left(1 + \frac{\gamma_1 T_L}{2\tau} \right)^2 \left(1 + \frac{\gamma_1 T_L}{\tau} \right)} = \frac{\partial}{\partial x_i} D \frac{\partial \rho_v}{\partial x_i}; \qquad (18)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho c_v T + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho c_v T + P_p) v_i - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_i} K_{ij} f_{1j} \frac{\rho c_v}{\gamma_1} -$$

$$- \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K_{ij} f_{2j} \frac{\rho c_v}{\gamma_1} \frac{1}{1 + \frac{\gamma_1 T_L}{2\tau}} \right] - \frac{L \rho_w}{2\sqrt{4\pi}} \overline{s^{1/2} \dot{s} f} +$$

$$+ \frac{1}{2} K_{ij} f_{2i} \rho c_v \frac{T_L}{2} \frac{2 + \frac{\gamma_1 T_L}{2}}{\left(1 + \frac{\gamma_1 T_L}{2\tau} \right)^2} - \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{1}{\tau} -$$

$$- K_{ij} f_{2i} f_{2j} \frac{L \rho_w}{32\pi} \left(\frac{8\pi D}{\rho_w} \frac{\rho c_v}{L} \right)^2 \left(\frac{T_L}{2} \right)^2 \frac{\left(3 + \frac{\gamma_1 T_L}{\tau} \right) \overline{R^{-1} f}}{\left(1 + \frac{\gamma_1 T_L}{2\tau} \right)^2 \left(1 + \frac{\gamma_1 T_L}{\tau} \right)} =$$

$$= - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[LD \frac{\partial \rho_v}{\partial x_i} - \chi \frac{\partial T}{\partial x_i} \right]; \qquad (19)$$

$$\rho = \rho_1 + \rho_v + P; \qquad (20)$$

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho_1 v_i - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_i} K_{ij} \frac{\partial \rho_1}{\partial x_i} = 0; \qquad (21)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_v + P) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_v + P) v_i - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_i} K_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \times$$

$$\times (\rho_v + P) = \frac{\partial}{\partial x_i} D \frac{\partial \rho_v}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} D_d \frac{\partial P}{\partial x_i}. \qquad (22)$$

Здесь

$$\gamma_1 = 1 + \frac{1}{\rho c_v} \frac{\partial \rho_{vs}}{\partial T} = 1 + \frac{L^2 \rho_{vs}}{\rho c_v R_v T^2}; \qquad (23)$$

$$f_{1i} = \frac{1}{\rho c_v} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho c_v T + P_p + L \rho_v); \qquad (24)$$

$$f_{2i} = \frac{\gamma_1}{\rho c_v} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho c_v T + P_p) - f_{1i}. \qquad (25)$$

Эффект скольжения тяжелой примеси относительно несущей среды может быть учтен в разной величине коэффициентов турбулентной диффузии для несущей среды и примеси.

Для спектров с малой дисперсией удобно избавиться от кинетического уравнения, задавшись модельным представлением времени фазовой релаксации τ и момента $\overline{R^{-1} f}$ через счетную концентрацию частиц и водность. Вместо кинетического уравнения в модели записывается уравнение переноса для счетной концентрации капель.

Пусть, например, спектр капель по размерам является δ-функцией.

$$f(S_s, S, t) = n\delta(S - S_0)\,\delta\,(S - S_0);\ S_0 > S_{s0};$$

$$n(t) = \int_0^\infty dS_s \int_0^\infty dS\, f(S_s, S, t); \tag{26}$$

$$P(t) = \frac{4\pi}{3}\rho_w \int_0^\infty dS_s \int_{S_{s0}}^\infty dS\, f(S_s, S, t)R^3 = \frac{4\pi}{3}\rho_w \frac{S_0^{3/2}}{(4\pi)^{3/2}}n; \tag{27}$$

$$\tau^{-1} = 4\pi D\int_0^\infty dS_s \int_0^\infty dS\, Rf(S_s, S, t) = 4\pi D\frac{S_0^{1/2}}{(4\pi)^{1/2}}n. \tag{28}$$

Исключая из (27) и (28) S_0, получим

$$\tau^{-1} = D\left(\frac{3(4\pi n)^2 P}{\rho_w}\right)^{1/3}. \tag{29}$$

Помимо водности P можно ввести запыленность μ, т.е. массу нерастворимых ЯК в единице объема:

$$\mu = \frac{4\pi}{3}\rho_n \int_0^\infty dS_n \int_0^{S_n} dSR^3 f(S_n, S). \tag{30}$$

Из уравнения (17) интегрированием по размерам капель и нерастворимых ЯК можно получить уравнения для водности и запыленности как моментов третьего порядка, и система уравнений объемной конденсации оказывается замкнутой без привлечения кинетического уравнения.

При моделировании процессов переноса ПД в контейнменте неизбежны определенные упрощения, допустимые при ограничении конечных целей, закладываемых в модель. Наиболее радикальные упрощения связаны с отказом от трехмерности задачи и от решения кинетического уравнения для функции распределения капель. Так, осреднение уравнения (17) по пространственным координатам сводит его к уравнению диффузии в пространстве размеров

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial S}\dot{S}f - K_{\text{эф}}\frac{\partial^2 f}{\partial S^2} = I_{эф} + St_{\text{эф}} + \text{(потоки на поверхности)}. \tag{31}$$

При учете коагуляции капли разного размера, содержащие разное количество гигроскопических веществ и разные нерастворимые ЯК, сталкиваясь, перемешивают эти характеристики спектра. Последующие седиментация и осаждение на поверхностях оборудования и контейнмента также существенно меняют спектр капель по всем характеристикам. В полной постановке задачи целью является определение спектра капель как функции времени, что позволяет контролировать все характеристики аэрозоля по всем параметрам. И эта задача все же еще весьма громоздка для численной реализации. Дальнейшее упрощение связано с моделями, не содержащими кинетического уравнения.

Контроль за летучими ПД осуществляется аналогично контролю за воздухом. Если летучая компонента ПД короткоживущая, то в уравнение переноса просто добавляется постоянный сток, пропорциональный плотности радиоактивной компоненты.

Для малолетучих ПД типа йода можно предположить быстрое установление динамического равновесия между газовой фазой и растворенной в воде. Тогда контроль за содержанием малолетучей компоненты ПД в объеме осуществляется по контролю за содержанием в газовой фазе и за водностью, так как выполняется закон Генри для плотности растворенного вещества.

Водность определена как

$$P = \frac{4\pi}{3}\rho_w \int_0^\infty dS_n \int_0^\infty dS_s \int_{S_n}^\infty R^3 f(S_n, S_s, S, t). \tag{32}$$

Уравнение для водности следует из уравнения (31):

$$\frac{\partial P}{\partial t} - \frac{\rho_v - \rho_{vS}}{\tau} - K^*_{\text{эф}}\overline{R^{-1}f} = I(P) - \alpha_p \frac{\overline{v_n}}{\overline{l}} P. \tag{33}$$

Время фазовой релаксации пара τ и момент функции распределения капель $\overline{R^{-1}f}$ получаются как функции P и n при задании вида спектра капель по размерам.

Вместо кинетического уравнения (31) появляется уравнение для счетной концентрации капель:

$$\frac{\partial n}{\partial t} - \alpha_p \frac{\overline{v_n}}{\overline{l}} n + I(n) + St(n). \tag{34}$$

Для контроля за нелетучими ПД введем аналогично водности запыленность:

$$\mu = \frac{4\pi}{3}\rho_n \int_0^\infty dS_n \int_v^\infty dS_s \int_0^{S_n} R^3 f(S_n, S_s, S, t), \tag{35}$$

μ — масса нерастворимых ЯК в единице объема.

Процессы коагуляции не меняют водность и запыленность, так как в этих процессах сохраняется масса. Уравнение для запыленности μ имеет вид

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} = -\alpha_\mu \frac{\overline{v_n}}{\overline{l}} \mu + I(\mu). \tag{36}$$

Масса нелетучих ПД пропорциональна запыленности.

Таким образом, в задачах, в которых не требуется знание микрофизических свойств аэрозоля, содержащего ПД, а необходима только информация о массовом содержании составляющей ПД в объеме и на поверхностях, можно обойтись без решения кинетического уравнения (17) или (31).

Так как контейнмент представляет собой систему помещений, то для каждого помещения записывается соответствующая система уравнений, в которых учитывается обмен характеристиками между помещениями. Вид обменных слагаемых моделируется с учетом конкретных условий обмена.

Очевидно, что проблема переноса радиоактивных ПД в условиях контейнмента может быть представлена двумя уровнями детализации описания. Для прогноза последствий аварии в режиме пассивного наблюдателя достаточно описания процессов в контейнменте в уравнениях для интегральных характеристик типа водности и запыленности с учетом наиболее неблагоприятных последствий.

Для условий активных воздействий на течение аварии с целью ее наиболее полной локализации требуются модели, содержащие кинетическое уравнение. Эти модели на порядки более сложны в численной реализации, но позволяют проводить численные эксперименты по воздействию на спектр радиоактивного аэрозоля по размерам с целью интенсификации конденсационного и коагуляционного роста частиц и последующего их осаждения, что делает атмосферу контейнмента более безопасной с точки зрения радиоактивного загрязнения.

Модели без кинетического уравнения проще в численной реализации, но не позволяют в полной мере учитывать активное воздействие на метеорологическую обстановку в контейнменте и дают интегральный результат без учета деталей эволюции радиоактивного аэрозоля.

Если последние дают приемлемые для инженерных приложений оценочные результаты, то для прогноза радиационного загрязнения в случае раскрытия контейнмента необходимо знание спектра аэрозоля по размерам, ибо перенос тяжелой примеси в турбулентной атмосфере зависит от эффективного коэффициента турбулентной диффузии, следовательно, от размера и массы аэрозоля (легкие и тяжелые частицы транспортируются на разные расстояния с разной скоростью и разной концентрацией). Для решения таких задач необходимы модели с кинетическим уравнением.

Статья поступила в редакцию 22 января 1999 г.

Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Физика ядерных реакторов, 1999, вып. 2, с. 90—96.

УДК 536.24

РАСЧЕТЫ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ЗАЩИТНЫХ ОБОЛОЧКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОДА КУПОЛ

А.Д. Ефанов, А.А. Лукьянов, Н.Н. Шаньгин, Ю.С. Юрьев,
ГНЦ РФ Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского,
249020, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1

Представлены математические модели теплопереноса, реализованные в коде КУПОЛ-М и приведены результаты расчетов модельных экспериментов и максимальной проектной аварии на АЭС нового поколения с ВВЭР-640.

DESIGNING NONSTATIONARY HEAT AND MASS TRANSPORT IN CONTAINMENT SHELLS USING THE KUPOL CODE. A.D. YEFANOV, A.A. LOUKYANOV, N.N. SHAN'GIN, Yu.S. YUR'EV. The mathematical models of heat and mass transfer implemented in the code CUPOL-M, are presented. The calculation results of the model experiments and VVER-640 LOCA simulation are reported.

Последним барьером безопасности при авариях на АЭС нового поколения является защитная оболочка (ЗО). Ее целостность определяется характером протекания целого ряда теплофизических, аэродинамических и физико-химических процессов, сопровождающих аварию с большой течью теплоносителя.

Код КУПОЛ-М* предназначен для расчета характеристик этих процессов в обоснование безопасности АЭС с ВВЭР нового поколения. Основой кода является математическая модель с сосредоточенными параметрами, полученная интегрированием уравнений газодинамики методом контрольного объема. Объем ЗО представляется рядом взаимосвязанных боксов (контрольных объемов), каждый из которых может иметь несколько связей с другими боксами или с окружающей средой. Топология связанных боксов произвольна. Считается, что газокапельная среда в боксе идеально перемешана, т.е. определяются средние термодинамические характеристики атмосферы в каждом боксе. Через связи боксов осуществляется перенос газокапельной среды. Между собой боксы могут быть разграничены стенами.

*Расчетные и экспериментальные исследования тепломассопереноса в ЗО при тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР. — В кн.: Сборник трудов ФЭИ. — Обнинск, 1995.

Пусть два смежных бокса соединены связью j, тогда для нее можно записать уравнение движения, приближенно представляющее закон сохранения импульса. Для произвольной связи оно имеет вид

$$\frac{V_j^{n+1} - V_j^n}{\Delta\tau} = -\frac{1}{\Delta X_j}\left(\zeta \frac{|V^{n+1}|V^{n+1}}{2} + \frac{\Delta P + \Delta P_{NC}}{\rho}\right)_j, \qquad (1)$$

где V_j — скорость смеси в j-й связи; $\Delta\tau$ — шаг интегрирования по времени; ΔX_j — характерный размер j-й связи; ζ — коэффициент гидравлического сопротивления j-й связи; ΔP — перепад давления на j-й связи; ΔP_{NC} — перепад давления на j-й связи за счет силы тяжести; ρ — плотность смеси; n, $n+1$ — индексы, характеризующие «старый» и «новый» шаг по времени соответственно.

Для особо выделенных связей в правую часть уравнения движения вводится источник, моделирующий конвективный перенос импульса по координате X:
для X-компоненты

$$S_k^{CONV_X} = -\frac{U_k^n}{\Delta X_k}\left(U_k^n - U_{k-1}^n \frac{S_{k-1}}{S_k}\right) + \zeta_k \frac{|U_k^n| U_k^n}{2} f_k(\mathrm{Fr}) \quad (U_k^n > 0), \qquad (2)$$

$$S_k^{CONV_X} = -\frac{U_k^n}{\Delta X_k}\left(U_{k+1}^n \frac{S_{k+1}}{S_k} - U_k^n\right) + \zeta_k \frac{|U_k^n| U_k^n}{2} f_k(\mathrm{Fr}) \quad (U_k^n < 0); \qquad (3)$$

для Y-компоненты

$$S_m^{CONV_Y} = -\frac{U_k^n}{\Delta X_k}\left(V_m^n - V_{m-1}^n \frac{S_{m-1}}{S_m}\right) + \zeta_m \frac{|V_m^n| V_m^n}{2} f_m(\mathrm{Fr}) \quad (U_k^n > 0), \qquad (4)$$

$$S_m^{CONV_Y} = -\frac{U_{k+1}^n}{\Delta X_{k+1}}\left(V_{m+1}^n \frac{S_{m+1}}{S_m} - V_m^n\right) + \zeta_m \frac{|V_m^n| V_m^n}{2} f_m(\mathrm{Fr}) \quad (U_k^n < 0), \qquad (5)$$

где U — X-компонента скорости; V — Y-компонента скорости; S — сечение связи;

$$f(\mathrm{Fr}) = 0 \quad (\mathrm{Fr} > 1);$$

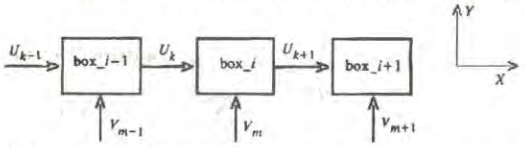
$$f(\mathrm{Fr}) = 0{,}9 \quad (\mathrm{Fr} < \mathrm{Fr}^*);$$

$$f(\mathrm{Fr}) = 0{,}9\,\frac{(\mathrm{Fr}^{-1} - 1)}{(\mathrm{Fr}^{*-1} - 1)} \quad (\mathrm{Fr}^* \le \mathrm{Fr} \le 1);$$

$f(\mathrm{Fr})$ — функция, нормирующая уменьшение местного гидравлического сопротивления при сильном влиянии естественной конвекции; Fr — число Фруда, характеризующее отношение инерционных сил к силам естественной конвекции; Fr* — критическое значение числа Фруда; k и m — индексы, интерпретация которых схематически представлена на рис. 1.

В случае существования нескольких k-х или m-х связей, так же как и $k-1$, $k+1$ или $m-1$, $m+1$ (моделирование коллектора), скорости U или V осредняются с весом сечений соответствующих связей.

Коэффициент гидравлического сопротивления в зависимости от геометрии помещения и его связей может быть задан в виде коэффициента местного гидравлического сопротивления, определяемого направлением движения смеси в связи (два значения коэффициента), либо в виде коэффициента гидравлического сопротивления трения. В этом случае $\zeta = \zeta^* L / d_{\mathrm{eq}}$ (ζ^* — задаваемое значение, L — характерная длина помещения вдоль по потоку, d_{eq} — эквивалентный диаметр).



Р и с. 1. Схема выделенных связей с конвективным переносом импульса вдоль оси X

Перепад гидростатического давления между боксами определяется как разность гидростатических давлений в боксах на уровне связи. Используя разложение распределения плотности газа в поле сил тяжести (формула Больцмана) в степенной ряд, получим

$$\Delta P_{NC} = g\left\{\rho_M(Z_m - Z) - \rho_G^0\left[\frac{\alpha}{2}(Z_m - Z) - \frac{\alpha^2}{6}(Z_m^3 - Z^3)\right]\right\}_{i1} -$$

$$- g\left\{\rho_M(Z_m - Z) - \rho_G^0\left[\frac{\alpha}{2}(Z_m - Z) - \frac{\alpha^2}{6}(Z_m^3 - Z^3)\right]\right\}_{i2}, \qquad (6)$$

где g — ускорение силы тяжести; $\rho_M = \rho_G^0 + \rho_D$ — плотность газокапельной смеси; ρ_G^0 — плотность газа при $Z = 0$ (нижняя отметка бокса); Z_m — высота бокса; Z — гидростатическое давление столба газа на уровне связи; $\alpha = M_G g/(RT)$; M_G — молекулярная масса газа; R — универсальная газовая постоянная; T — температура; $i1$ — номер бокса, в который входит связь; $i2$ — номер бокса, из которого выходит связь, (индексы $i1$ и $i2$ принадлежат к параметрам ρ_M, Z_m, ρ_G^0, α).

Для каждого i-го бокса и k-й компоненты смеси записывается уравнение переноса

$$V_i\frac{d\rho_k^i}{d\tau} = \sum_i \rho_k^j U^j S^j + G_k^i - \sum_l J_{i,k}^l, \qquad (7)$$

где V_i — объем бокса; ρ_k^j — плотность k-й компоненты в связи j, т.е. компоненты в боксе, из которого поступает смесь; S^j — сечения связей i-го бокса; G_k^i — общий источник данной компоненты в i-м боксе (например, течь из первого контура); $J_{i,k}^l$ — источник за счет l-процесса (например, конденсации в i-м боксе).

Для пара учитываются:

— сток или источник пара в объеме бокса за счет конденсации на каплях или их испарения соответственно;

— сток за счет конденсации на стенках бокса;

— источник пара за счет химической реакции водорода с кислородом;

— сток за счет работы спринклерной системы.

В уравнениях переноса водорода и кислорода учтены стоки за счет химической реакции.

Из уравнений переноса газовых компонент с учетом универсального газового закона получается уравнение для давления P_G (индекс i опущен)

$$\frac{V}{R}\frac{d}{d\tau}\left(\frac{P_G}{T}\right) = \sum_j \frac{1}{M_G^j}\rho_G^j U^i S^i + \sum_k \frac{G_k}{M_k} + \sum_k \frac{\sum_l J_k^l}{M_k}, \qquad (8)$$

где

$$M_G = \rho_G / \sum_k \frac{\rho_k}{M_k}. \qquad (9)$$

Уравнение энергии, выраженное через температуру газа, имеет вид

$$V\rho_M C_m\frac{dT}{d\tau} = -\sum_n \rho_M^n C_M^n U^n S^n (T - T^n) + J_{H_2}^c r_{H_2} + J_v^v(h_v - h_D) - Q^s -$$

$$- \sum_m \alpha^m F^m (T - T^m) + (C_v G_v + C_{N_2} G_{N_2} + C_{O_2} G_{O_2} + C_{H_2} G_{H_2})(T_G^0 - T) +$$

$$+ C_D G_D (T_D^0 - T) + V \frac{dP_G}{d\tau}, \qquad (10)$$

где $C_M = (\rho_v C_v + \rho_{N_2} C_{N_2} + \rho_{O_2} C_{O_2} + \rho_{H_2} C_{H_2} + \rho_D C_D)/\rho_M$ — удельная теплоемкость газокапельной смеси; r_{H_2} — удельная теплота горения водорода; h_v и h_D —удельные энтальпии пара и капель; Q^s — мощность охлаждения газа каплями спринклера; α^m — коэффициент теплоотдачи к m-й поверхности; F^m — площадь поверхности; T_w^m — температура поверхности; C — удельная теплоемкость компонент смеси; T_G^0 — температура выбрасываемого теплоносителя; T_D^0 — температура выбрасываемых капель; индекс n относится только к тем связям, через которые смесь втекает в рассматриваемый бокс.

Модель теплообмена со стенами и различным оборудованием включает одномерное уравнение теплопроводности для плоской стенки, гипотезу аналогии тепло- и массообмена для расчета поверхностной конденсации пара и эмпирические зависимости для коэффициентов теплоотдачи. Для каждой многослойной стены уравнение энергии (без индекса стены)

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = a_w^m \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} \qquad (11)$$

с граничными условиями

$$-\lambda_w \left(\frac{\partial T_w}{\partial x}\right)_b = \alpha (T - T_w^b) + q_w^b \qquad (12)$$

и условиями сшивки на границах слоев

$$-\lambda_w^m \left(\frac{\partial T_w}{\partial x_m}\right)_m = -\lambda_w^{m+1} \left(\frac{\partial T_w}{\partial x}\right)_{m+1}; \quad T_w^m = T_w^{m+1}, \qquad (13)$$

где T_w — температура стенки; a_w и λ_w — температуропроводность и теплопроводность стенки; x — координата; q_w^b — удельный тепловой поток за счет поверхностной конденсации пара (в случае внешней границы ЗО $q_w^b = 0$); индекс b относится к границе стенки; m — номер слоя.

Процесс объемной конденсации пара описывается обыкновенным дифференциальным уравнением для счетной концентрации капель в каждом контрольном объеме.

В настоящее время код КУПОЛ-М аттестован в ГАН РФ в части расчета следующих основных величин:

— изменение во времени температуры и давления газа в помещениях ЗО;

— нестационарное распределение температуры в стенах и оборудовании;

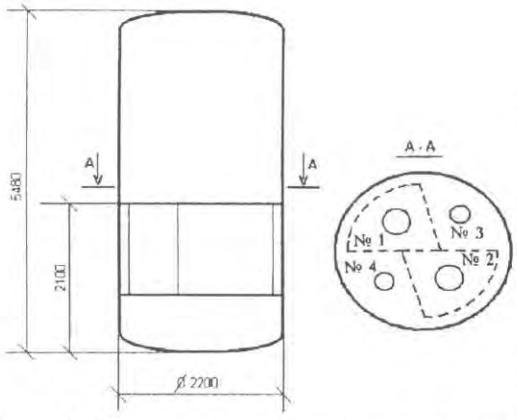
— временные зависимости плотности пара и воздуха в помещениях ЗО;

— интенсивность конденсации пара и температура образующегося конденсата в каждом помещении ЗО;

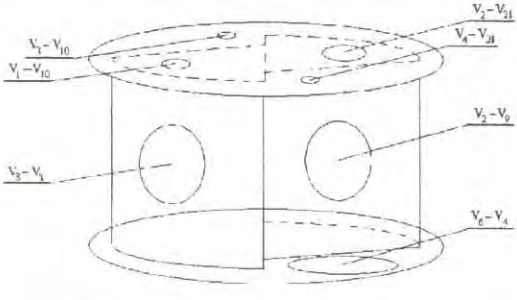
— расходы газовой смеси в проходках между помещениями.

Рассмотрим два примера расчета по коду КУПОЛ-М массопереноса газовой смеси в экспериментальной модели ЗО и в ЗО АЭС с ВВЭР-640 при развитии максимальной проектной аварии.

На экспериментальной установке, моделирующей ЗО контейнмента со смежными помещениями исследовался процесс распространения водорода. Основой установки является вертикальная цилиндрическая емкость объемом 20 м^3, в которой размещена вставка из системы тонкостенных перегородок, образующих девять взаимосвязанных помещений (боксов). Схематически экспериментальная модель показана на рис. 2,



Р и с. 2. Схема экспериментальной установки для исследования распространения водорода



Р и с. 3. Общий вид вставки, имитирующей связанные помещения ЗО

общий вид вставки с нумерацией боксов — на рис. 3. Импульсный режим выброса водорода осуществлялся по затухающей экспоненте

$$G_V = 63{,}36 \exp(-0{,}99\tau), \qquad (14)$$

где G_V — объемный расход водорода, н. дм^3; τ — время, с.

Первичный анализ экспериментальных результатов показывает, что в объеме установки возникает естественная циркуляция газовой смеси с подъемным течением в боксах № 1, 3 и опускным в боксах № 2, 4. Соответственно верхние отверстия в боксах № 1 и 3 формируют всплывающие за счет естественной конвекции струи с повышенным содержанием водорода, которые, проникая к верхней крышке установки, создают условия для стратификации водорода по высоте.

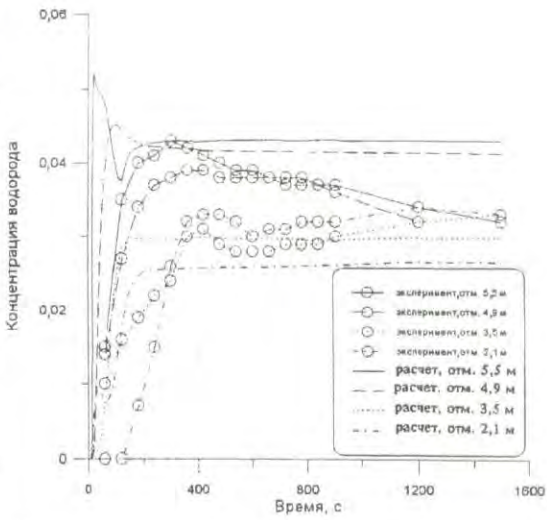
В импульсном режиме подачи водорода процесс массопереноса существенно нестационарный. В начальный период времени восходящие струи насыщены водородом и в верхней части установки образуется легкий слой газовой смеси с максимальной концентрацией водорода в установке. Затем по мере уменьшения интенсивности источника и развития общей циркуляции смеси в нижнем объеме установки концентрация водорода падает и вслед за этим уменьшается насыщенность водородом струйного потока. Таким образом, относительно тяжелые затопленные струи попадают в уже стратифицированную по плотности (концентрации водорода) среду в верхнем объеме. При этом расслоение газовой смеси должно сохраняться а струйный поток проникает до высоты, на которой концентрация водорода близка к концентрации в струе. Некоторое превышение концентрации водорода в горизонтальном слое, которого достигает струя, определяется ее инерцией и вязкостью газовой смеси. При больших скоростях потока на его структуру оказывает существенное влияние турбулентность, развитие и затухание которой определяется не только градиентами скорости, но и в большей мере градиентами плотности.

Учитывая сложный характер течения газовой смеси, расчетную область разбили на 24 контрольных объема с 44 связями. В верхнем объеме выделялась подъемная ветвь, моделирующая струйный поток, в виде контрольных объемов, объединенных связями, которые описываются уравнениями движения с конвективным переносом импульса (см. рис. 1).

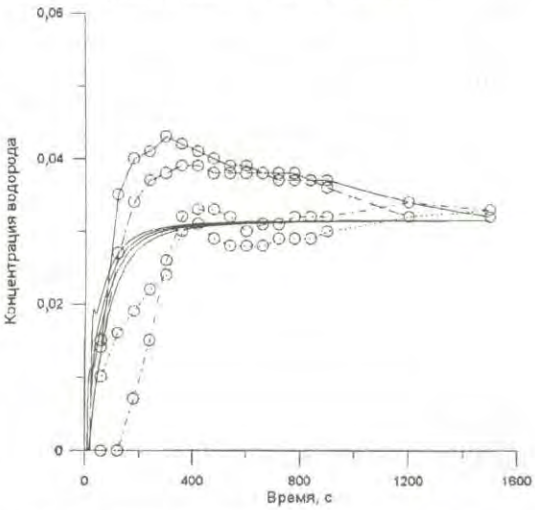
На рис. 4 приведено сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными. Как и в эксперименте, максимальная концентрация водорода наблюдается в верхней части свободного объема. Развитие процесса в расчете происходит существенно быстрее: максимум концентрации водорода в расчете достигается к 50 с, в эксперименте — к 300 с. Возможно, такая задержка в регистрации процесса в эксперименте объясняется инерционностью датчиков водорода, постоянная времени которых в экспериментальной работе не указана, но, по оценке, может достигать десятков секунд. Качественное отличие расчета концентрации водорода наблюдается в нижней

части свободного пространства установки: концентрация водорода в эксперименте на отметке 2,1 м выше, чем на отметке 3,5 м. Однако это различие в пределах погрешности эксперимента. К концу эксперимента за счет диффузии водород полностью смешивается с воздухом. В расчете выравнивание концентрации водорода не происходит и водородовоздушная смесь остается стратифицированной по высоте. Для сравнения рис. 5 иллюстрирует результаты расчета той же задачи, но без учета конвективного переноса импульса в струйном потоке. Как видно из рисунка, расслоение водорода по высоте установки практически не наблюдается.

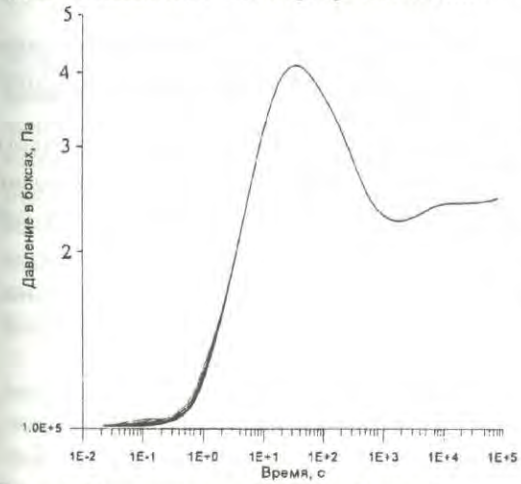
Максимальной проектной аварией на реакторе ВВЭР считается авария с гильотинным разрывом холодной нитки главного циркуляционного контура. Данные расчета этой аварии, проведенного в обоснование безопасности АЭС нового поколения с реактором ВВЭР-640, приведены на рис. 6—9. В начальный момент времени при максимальном выбросе теплоносителя из контура наблюдаются перепады давления между боксами, скорость смеси в проходках при этом доходит до ~100 м/с. Далее давление продолжает расти и достигает максимума на ~20-й секунде. Температура в далеко отстоящих «не продуваемых» паром боксах за счет сжатия газа становится существенно выше температуры насыщения. По мере уменьшения



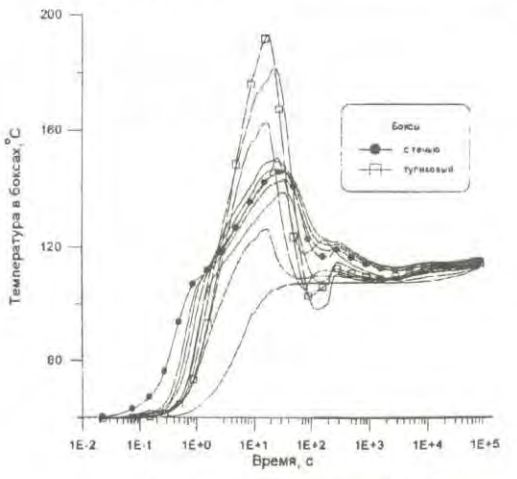
Р и с. 4. Сопоставление расчета с конвективным переносом импульса в связях и эксперимента



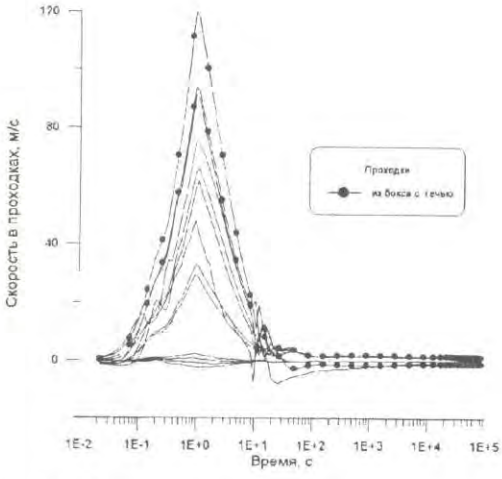
Р и с. 5. Расчет без учета конвективного переноса импульса в струйном потоке



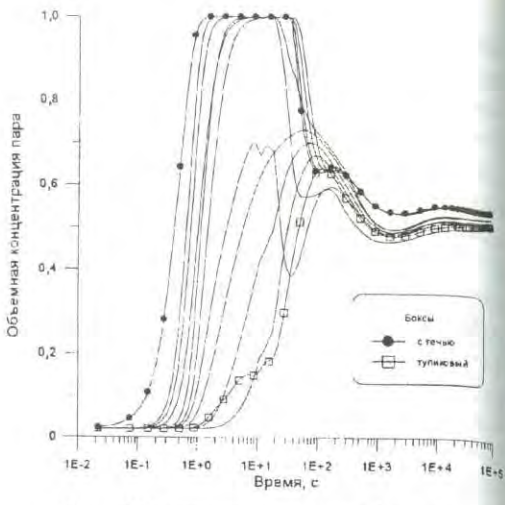
Р и с. 6. Изменения давления под оболочкой



Р и с. 7. Температура газа в боксах



Р и с. 8. Скорость смеси в проходках



Р и с. 9. Концентрация пара в боксах

выброса теплоносителя давление за счет конденсации пара на поверхностях стен и оборудования падает, скорости уменьшаются, и наступает режим преимущественно естественной циркуляции парогазовой смеси. Температура газа в помещениях ЗО выравнивается. Затем с прогревом стен падает эффективность поверхностной конденсации и давление в ЗО вновь начинает расти. Температура газа соответствует температуре насыщения паров воды. Передача тепла к конечному поглотителю осуществляется за счет внешнего охлаждения ЗО.

* *
*

Модель с сосредоточенными параметрами, реализованная в коде КУПОЛ-М, при соответствующей нодализации расчетной области позволяет получить распределение характеристик газового потока не только по отдельным помещениям ЗО, но и в объеме конкретно выбранного помещения.

Влияние естественной конвекции, учитываемое в уравнении движения также в рамках модели с сосредоточенными параметрами, в зависимости от характеристик потока и геометрии помещений может приводить к стратификации или перемешиванию газовой смеси.

Введение в уравнение движения конвективного переноса импульса дает дополнительные возможности для более точного описания процесса распространения затопленных струй в большом объеме.

Статья поступила в редакцию 22 января 1999 г.

Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Физика ядерных реакторов, 1999, вып. 2, с. 96—102.

УДК 621.039

ОБЗОР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ И АНАЛИЗ ПОЛНОТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

В.Н. Зимаков, С.П. Витин, В.А. Ефимов, НИТИ им. А.П. Александрова, 188537, г. Сосновый Бор Ленинградской обл.

Рассмотрены основные вопросы верификации комплексных математических моделей динамики ЯЭУ по результатам экспериментов, проведенных на полномасштабных стендовых реакторных установках: МЕЛЕКСЕСС, ВОРОНЕЖ, ЛЕНИНГРАД.

A SURVEY OF THE EXPERIMENTAL BASIS FOR VERIFYING INTEGRATED SOFTWARE COMPLEXES AND ANALYSIS OF FULLY USING THE OBTAINED DATA. V.N. ZIMAKOV, S.P. VITIN, V.A. YEFIMOV. The paper is devoted to basic problems of verification of complex mathematical models of nuclear power installations dynamics on the basis of data received as a result of experiments on full-scale reactor test facilities: MELEKESS, VORONEZH, LENINGRAD.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безопасности ядерных энергетических установок (ЯЭУ) требует наличия арсенала экспериментальных средств и расчетных программ, сопровождающих ЯЭУ от проектных проработок до вывода из эксплуатации. Разнообразие задач, возникающих при проектировании и эксплуатации ЯЭУ, отражается в большом количестве экспериментальных стендов и расчетных программ различного назначения. Условно всю экспериментальную базу и программную продукцию можно разделить на несколько категорий, причем особое место занимают полномасштабные стендовые ЯЭУ и описывающие их интегрированные программные комплексы.

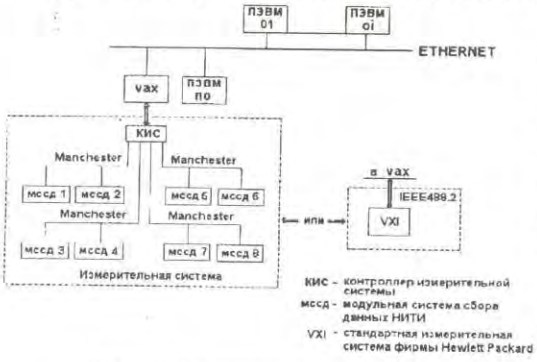
Поскольку основным направлением деятельности НИТИ им. А.П. Александрова является экспериментальная отработка перспективных судовых ЯЭУ, расчетное сопровождение экспериментальных исследований всегда было в центре внимания и основывалось на применении интегрированных программных комплексов. Таким комплексам отводится особенно важная роль в период пуска ЯЭУ и в начальный период эксплуатации. Дело в том, что испытательные режимы на установках, особенно потенциально опасные, должны быть предварительно изучены на математических моделях (ММ). Прогнозные оценки того или иного события на ЯЭУ будут иметь высокую точность только в том случае, если ММ достаточно хорошо верифицирована.

Экспериментальные исследования полномасштабных ЯЭУ проводились и проводятся в НИТИ на стендах МЕЛЕКЕСС, ЛЕНИНГРАД, ВОРОНЕЖ. Сбор и обработка экспериментальной информации со стендов осуществляется измерительно-вычислительными комплексами АНИС. Эти данные являются основой верификации интегрированных программных комплексов, эксплуатирующихся в НИТИ.

СИСТЕМЫ СБОРА И РЕГИСТРАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Все экспериментальные стенды НИТИ помимо штатной системы измерений оснащены мощными измерительно-вычислительными комплексами (ИВК). Принципы их построения носят общий характер, имеются лишь незначительные отличия, в основном касающиеся используемой вычислительной техники.

В ИВК последних поколений, таких, как АНИС-В1, в качестве ЭВМ сбора, регистрации и обработки информации используются VAX (Alpha) с операционной системой Open VMS (рис. 1). Экспериментальная информация вводится в VAX от измерительной системы через высокоскоростной канал ввода/вывода с пропускной способностью 10 Мб/с. Управление режимом работы ИВК осуществляется с пульта оператора, в качестве которого используется ПЭВМ PC/AT, работающая в режиме X-терминала. В качестве устройств отображения информации также используется ПЭВМ. Обмен информацией между VAX и ПЭВМ осуществляется через сеть Ethernet.



Р и с. 1. Структурная схема ИВК

ИВК АНИС обеспечивает следующие режимы работы:

— регистрация экспериментальной информации (ЭИ);

— циклическая регистрация ЭИ;

— просмотр и обработка зарегистрированной ЭИ на ПЭВМ отображения;

— запуск функциональных программ как в режиме on-line, так и в режиме постобработки;

— архивизация ЭИ.

Программное обеспечение ИВК АНИС состоит из следующих функционально связанных между собой подсистем:

— база метрологических данных (содержит информацию по всем измерительным каналам, построена с использованием СУБД Oracle);

— архив экспериментов и база данных с классификатором экспериментов;

— подсистема формирования таблиц экспериментов и режимов опроса для работы в реальном масштабе времени;

— функции масштабирования и доступа к данным для режимов реального времени и постобработки;

— обеспечение достоверности ЭИ;

— мониторы чтения, обеспечивающие управление считыванием зарегистрированной ЭИ и программами обработки;

— сетевые мониторы, обеспечивающие передачу масштабированных значений в ПЭВМ отображения;

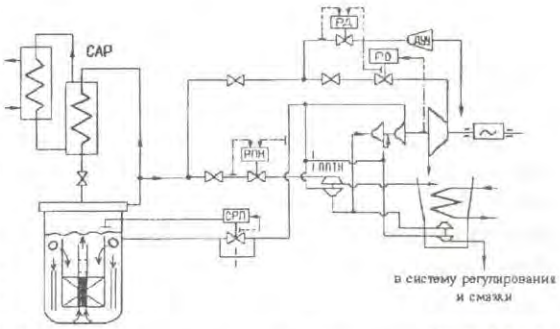
— программное обеспечение системы отображения на ПЭВМ.

Существующие ИВК АНИС обеспечивают регистрацию нескольких сот аналоговых и нескольких тысяч дискретных сигналов с частотой от 100 до 0,003 Гц. Частота опроса устанавливается в зависимости от физических характеристик регистрируемого процесса. Записанная ЭИ хранится на магнитных носителях в виде архива с соответствующей базой данных. Обработка ЭИ заключается в обеспечении поиска и доступа к зарегистрированной информации, масштабировании и последующем применении программ различного назначения: представлении на графики и дисплеи, записи в файлы, статистической обработки, печати протоколов событий и т.п.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ СТЕНД МЕЛЕКЕСС

Малогабаритная ядерная энергетическая установка МЕЛЕКЕСС испытывалась в период 1971—1988 г. и в настоящее время находится в законсервированном состоянии. Она оснащена водо-водяным кипящим реактором с естественной циркуляцией теплоносителя, включает паровую турбину с электрогенератором (ЭГ), пусковую систему, системы регулирования, аварийного расхолаживания, конденсатно-питательную (рис. 2).

В режиме пуска пар из реактора поступает на пусковой питательный турбонасос (ППТН), подающий питательную воду из конденсатора в реактор. При переводе на энергетический режим пар из реактора подается на главную турбину, которая помимо ЭГ раскручивает и соосный с ней навешенный питательный насос (НПН). При достижении определенного напора в линии подачи питательной воды от НПН система регулирования перекрывает подачу пара на ППТН. В дальнейшем с помощью системы регулирования поддерживаются необходимые значения параметров установки в соответствии с задаваемой нагрузкой.



Р и с. 2. Принципиальная схема установки МЕЛЕКЕСС: САР — система аварийного расхолаживания; РД — регулятор давления; РО — регулятор оборотов; ППТН — пусковой питательный турбонасос; ДУУ — дроссельно-увлажнительное устройство; РПН — регулятор питательного насоса; СРП — система регулирования питания

Из этого краткого описания принципа действия установки видно, что при переключениях и изменениях режимов работы систем возможны значительные изменения параметров, т.е. возмущения теплотехнических величин. Учет таких обстоятельств особенно важен, так как реактор обладает склонностью к самовозбуждению колебаний нейтронной мощности и потому в зависимости от величины возмущения возможны недопустимые отклонения реактивности. Задача исследования динамики установки как бы распадается на две части: исследование динамики установки на комплексной ММ с учетом работы всех систем и динамики непосредственно реактора, работающего вблизи границы устойчивости. Этими двумя задачами и продиктованы требования к полноте использования экспериментальных данных в математических моделях при верификации.

При описании теплогидравлических процессов математические модели, как правило, основываются на незамкнутой системе уравнений. Недостающие связи между переменными устанавливаются с использованием корреляционных зависимостей, получаемых на основе специально поставленных опытов. Прямому измерению такие зависимости на полномасштабных ЯЭУ пока недоступны. Поскольку выбор и применение корреляционных зависимостей связаны с определенного рода волюнтаризмом исследователя, справедливость их применения (а вместе с этим и всего программного комплекса) должна устанавливаться на основе верификации ММ.

Верификация интегрированных программных комплексов оказывается весьма сложным и трудоемким делом, поскольку приходится одновременно настраивать большое количество разнородных, а часто и конкурирующих параметров. Именно поэтому представляется исключительно важной формулировка и постановка на ЯЭУ таких экспериментов, которые бы при строго определенном возмущении позволяли последовательно настраивать ту или иную отдельную корреляционную зависимость или хотя бы минимальное их количество.

Уникальность стенда МЕЛЕКЕСС состоит в особенностях его конструкции и динамики реактора. Благодаря этим особенностям удалось выполнить ряд экспериментов,

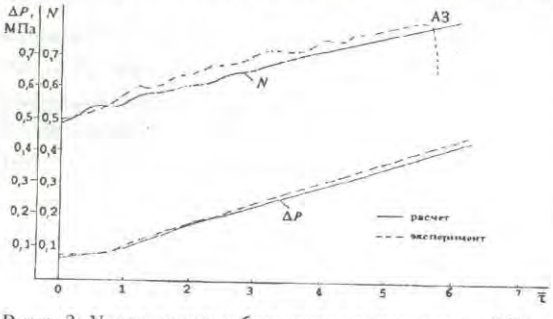
которые позволяют по измеряемым интегральным параметрам (мощности, давлению) выбирать корреляционные зависимости для описания процессов теплообмена и гидравлики в активной зоне с минимальным количеством побочных факторов, негативно влияющих на точность моделирования. Такими экспериментами явились случаи частичного или полного прекращения отбора пара из реактора.

Система экспериментальных измерений параметров установки не позволяет получить данные в необходимом объеме. Не измеряются паросодержание в парогенерирующих каналах (ПГК), его распределение вдоль каналов и по радиусу активной зоны, влажность пара на выходе из реактора, расход теплоносителя по каналам. Однако многие важные параметры регистрируются, например нейтронная мощность реактора, давление в реакторе, уровень теплоносителя, температура питательной воды, перепад давления, период разгона реактора.

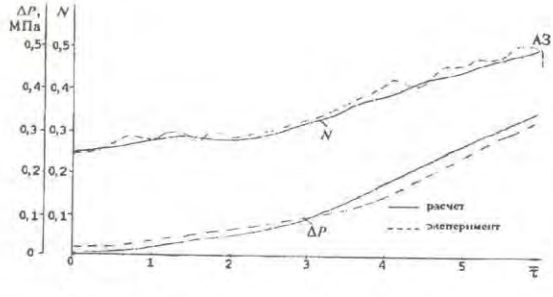
Имеющегося набора экспериментальных данных (всего зарегистрировано 775 экспериментов) оказывается достаточно для верификации математической модели динамики реактора при описании ее в сосредоточенных, а частично в распределенных параметрах, например, при учете распределенности тепловых параметров вдоль канала. При этом следует помнить о том, что совпадение расчетных данных с экспериментальными не может (и не должно!) быть полным.

В качестве примеров верификации рассмотрим случаи полного или частичного прекращения отбора пара из реактора [1] (рис. 3, 4). Эти режимы для математического описания являются довольно сложными с точки зрения формирования давления в реакторе, поскольку связаны с процессами теплообмена в ПГК и барботажном слое.

Уменьшение отбора пара из кипящего реактора приводит к росту давления, следствием чего является уменьшение среднего паросодержания в активной зоне, увеличение реактивности и нейтронной мощности. Поскольку никаких экспериментальных сведений о паросодержании в активной зоне, расходах по ТВС в нашем распоряжении нет, то верификация ММ может быть выполнена только частично по динамике изменения давления и нейтронной мощности. На рис. 3 показано уменьшение отбора пара из реактора на 27%, а на рис. 4 — полное прекращение. В обоих случаях видно, что расчетные значения давления и нейтронной мощности близки к экспериментальным. Самым главным результатом в этих случаях является то, что удалось правильно описать связь теплогидравлических процессов с нейтронно-физическими. Формирование среднего паросодержания в активной зоне при увеличении давления (а эти процессы взаимосвязаны) в исследованном диапазоне параметров описано с приемлемой для практики точностью.



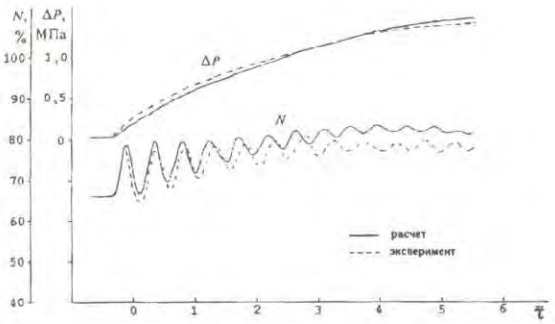
Р и с. 3. Уменьшение отбора пара из реактора на 27%, АЗ — аварийная защита



Р и с. 4. Полное прекращение отбора пара из реактора при низкой мощности

При более высоких уровнях мощности частичное уменьшение отбора пара из реактора сопровождается проявлением склонности активной зоны к возникновению колебательных режимов работы. На рис. 5 показан режим срабатывания аварийной защиты турбогенератора (АЗТГ) на мощности 68% $N_{ном}$ [2]. Сравнение расчета с экспериментом показывает, что частота колебаний нейтронной мощности моделиру-

ется с погрешностью менее 10%. Это свидетельствует о достаточно хорошем описании процессов гидравлики в активной зоне. Приведенные примеры не требуют учета в ММ описания работы других систем кроме реактора. Однако при изучении условий возникновения аварийных ситуаций, связанных, например, с работой систем ПТУ, необходимо учитывать работу всех систем. Такая ситуация возникает, например, при описании динамики установки в случае полного или частичного прекращения подачи охлаждающей воды на конденсатор. Экспериментальные исследования по изменению расхода охлаждающей воды на конденсатор проводились с целью определения:



Р и с. 5. Режим срабатывания аварийной защиты турбогенератора

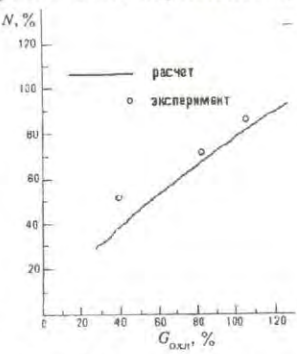
— максимальной мощности установки при пониженных расходах охлаждающей воды;

— скорости падения вакуума в главном конденсаторе (ГК) после полного прекращения подачи охлаждающей воды;

— величины «выбега» давления в ГК после срабатывания АЗ по сигналу $P_{ГК}^{max}$.

Следует отметить, что данные эксперименты, особенно с полным прекращением расхода охлаждающей воды, являются уникальными, очень сложными в практическом исполнении, а в некоторых случаях (с учетом особенностей установки МЕЛЕКЕСС) и опасными. Именно из-за потенциальной опасности эти эксперименты проводились на частичных безопасных уровнях мощности, и результаты экстраполировались на номинальный уровень мощности расчетным путем.

На рис. 6 показаны результаты расчетов и экспериментов по определению максимальной мощности установки при пониженных расходах охлаждающей воды на конденсатор. Расчетная зависимость удовлетворительно согласуется с экспериментом, причем расчетные значения расхода охлаждающей воды определены с некоторым запасом, т.е. на данном уровне мощности необходимый минимальный расход охлаждающей воды по результатам испытаний оказался меньше расчетного. Порядок проведения испытаний предусматривал медленное снижение расхода охлаждающей воды при неизменной мощности установки. Уменьшение расхода охлаждающей воды прекращалось при повышении температуры питательной воды до 70 °С.



Р и с. 6. Зависимость максимальной мощности установки МЕЛЕКЕСС от расхода охлаждающей воды на ГК

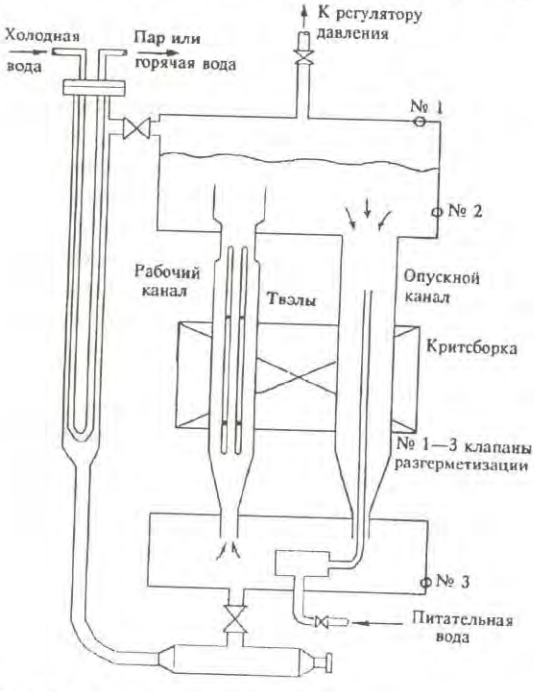
Эксперименты с полным прекращением подачи охлаждающей воды были проведены на уровнях мощности 41 и 47% $N_{ном}$. Расчетные значения времени достижения уставки срабатывания АЗ по давлению в ГК и величины «выбега» давления в ГК после срабатывания АЗ оказались близкими к экспериментальным (погрешность ~8÷9%).

В случаях, подобных рассмотренным, в ММ необходимо учесть все измеряемые параметры по паровым и водяным коммуникациям и, естественно, в реакторе. Здесь обычно сталкиваются со значительными трудностями, обусловленными приближенным знанием характеристик насосов, турбин, запорно-регулирующей арматуры, сопротивлений трубопроводов. Добиваясь хорошего совпадения результатов расчетов с экспериментом, необходимо помнить, что при неточной исходной информации по конструкции такое совпадение может являться простой случайностью. Поэтому убедиться в адекватности ММ объекту можно будет только на основе сравнения по широкому спектру разнообразных экспериментов. Сама ММ должна иметь гибкую, легкоперестраиваемую структуру, позволяющую проводить расчет с различным количеством учитываемых элементов или систем.

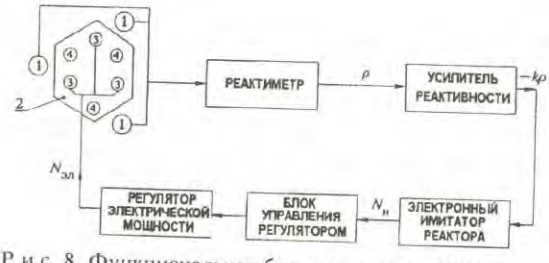
СТЕНД МЭР — ПОЛУНАТУРНАЯ МОДЕЛЬ РЕАКТОРА

Поскольку в экспериментах была отмечена склонность реактора МЕЛЕКЕСС к нестабильности нейтронного потока, то естественным оказалось стремление изучить это явление различными способами. Кроме расчетно-теоретических исследований [1—3] в ЦНИИ им. А.Н. Крылова на стенде МЭР проводились эксперименты по определению границы устойчивости кипящего реактора, охваченного сильной обратной связью по реактивности. В отличие от установки МЕЛЕКЕСС на стенде МЭР измерялся расход теплоносителя в парогенерирующих каналах.

Конструкция стенда МЭР показана на рис. 7. Стенд может работать как по одноконтурной, так и по двухконтурной схеме. В данном случае рассматривается одноконтурная схема. Принцип действия стенда следующий (рис. 8). Входной сигнал реактиметра, пропорциональный реактивности критсборки, снимается с трех иозационных камер, усиливается широкополосным инвертирующим усилителем и подается на вход электронного имитатора нейтронной кинетики. Сигнал с имитатора кинетики, пропорциональный энерговыделению, с помощью блока управления регулирует величину электрической мощности, выделяемой в рабочих каналах стенда.



Р и с. 7. Принципиальная схема гидравлического контура стенда МЭР для работы по одноконтурной и двухконтурной схемам



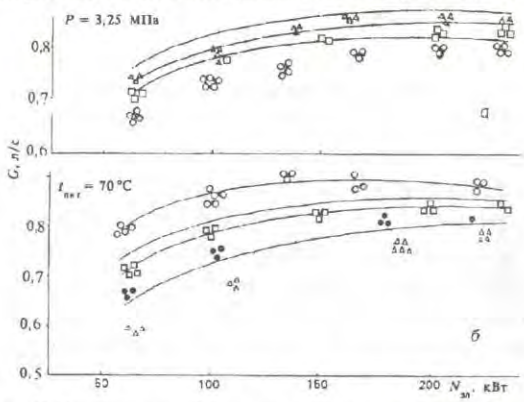
Р и с. 8. Функциональная бок-схема стенда МЭР: 1 — ионизационные камеры; 2 — критическая сборка; 3 — имитаторы рабочих каналов; 4 — опускные каналы

Гидравлический контур состоит из шести параллельных каналов, встроенных в критсборку и расположенных на одинаковом расстоянии от ее центра. Три канала — опускные, имитирующие межканальное пространство реактора, остальные — рабочие парогенерирующие каналы с восходящим движением теплоносителя. Опускные и рабочие каналы объединены по входу и выходу камерами смешения. Размеры камер смешения выбраны такими, чтобы их постоянные времени были равны соответствующим постоянным времени камер смешения исследуемого реактора. В рабочих каналах размещены 19 стержневых пучков имитаторов твэлов, изготовленных из полых стальных трубок. Трубки запаяны с обоих концов, и внутри находится воздух. Рабочие каналы идентичны между собой и в расчетной модели представлены одним эквивалентным каналом. Однако возможность учета теплового и гидродинамического различия каналов в программе сохранена, по мере надобности в рассмотрение можно включить все парогенерирующие каналы. Опускные каналы в ММ объединены в один эквивалентный. Через опускные каналы снизу вверх пропущены трубки подвода питательной воды. Здесь же могут быть размещены алюминиевые вытеснители, с помощью которых можно исследовать влияние соотношения доли канальной и межканальной воды на статические и динамические характеристики стенда.

Давление в контуре и положение уровня раздела фаз в верхней камере поддерживаются с помощью систем автоматики. Регулятор давления имеет следящую систему, которая позволяет вносить возмущения по положению клапана травления пара.

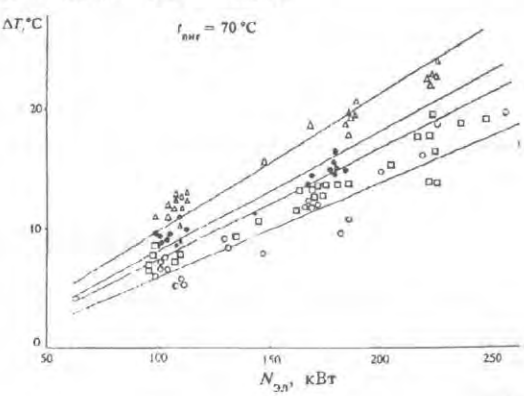
Почему помимо экспериментальных и расчетно-теоретических исследований непосредственно реактора потребовались эксперименты на стенде? Дело в том, что колебания нейтронной мощности в реакторе установки МЕЛЕКЕСС имеют некоторые особенности, которые не удалось воспроизвести в расчете ни на модели в сосредоточенных параметрах, ни на одноканальной распределенной модели. Одной из таких особенностей является непостоянство амплитуды колебаний нейтронной мощности — чередование периодов с большой и малой амплитудами. Такая картина носит устойчивый характер, и потому периоды с увеличенной амплитудой называются «пакетами» колебаний. Вторым и самым важным обстоятельством явилось то, что на установке МЕЛЕКЕСС некоторые режимы осуществить невозможно из-за их потенциальной опасности, в то время как на стенде МЭР при малом коэффициенте обратной связи по реактивности это выполнить безопасно.

Экспериментальные исследования нестабильности работы кипящих реакторов на стенде МЭР оказались весьма сложными с точки зрения интерпретации и переноса полученных результатов экспериментов на условия установки МЕЛЕКЕСС. Потребовались расчетные исследования на той же ММ, что и для стенда МЕЛЕКЕСС, которая позволяла бы воспроизводить характерные особенности работы стенда МЭР и которую пришлось верифицировать по экспериментальным данным, полученным на стенде. Верификация выполнялась на основе сравнения результатов расчетов статических и динамических характеристик стенда с экспериментальными данными. На рис. 9, 10 показаны зависимости расхода в контуре и недогрева теплоносителя на входе в парогенерирующие каналы от мощности при различных температурах питательной воды и давлениях в контуре. Совпадение расчета с экспериментом получено удовлетворительное. Погрешности составляют порядка 10% номинальных значений величины для всей области экспериментальных данных. После того как достигли совпадения результатов по статическим характеристикам, было проведено сравнение динамических характеристик.

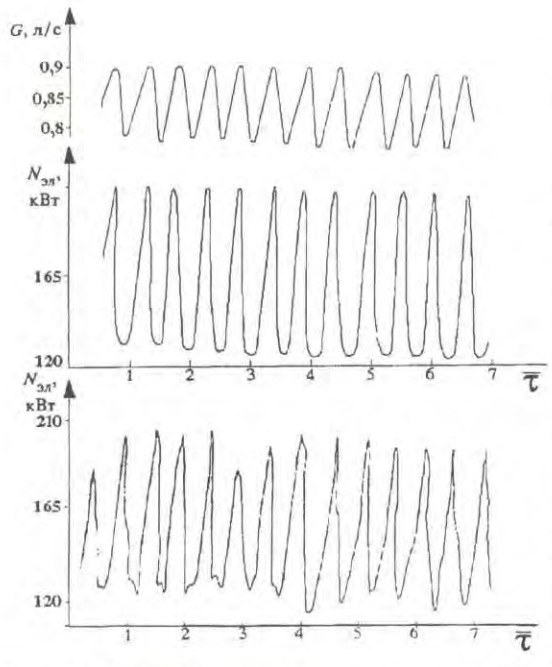


Р и с. 9. Зависимость объемного расхода в контуре стенда МЭР от электрической мощности: *а* — при $t_{пит}$ = 150 (Δ), 70 (❑) и 20 °С (○); *б* — при P = 2 (○), 3,25 (❑), 4,05 (●) и 6,8 МПа (Δ); точки — эксперимент; кривые (сверху вниз) — расчет

На рис. 11 показаны колебания мощности стенда. Видно, что «пакетов» колебаний не получено ни в расчете, ни в эксперименте. Однако характеристики колебаний электрической мощности стенда ММ отражает правильно, почти совпадает частота колебаний, нестабильность мощности проявляется при одинаковых значениях коэффициентов усиления обратной связи по реактивности и т.д.



Р и с. 10. Зависимость недогрева теплоносителя на входе в парогенерирующие каналы стенда МЭР от электрической мощности при P = 6,8 (Δ), 4,05 (●), 3,25 (❑) и 2 МПа (○); точки — эксперимент; кривые (сверху вниз) — расчет



Р и с. 11. Резонансные колебания электрической мощности стенда МЭР в расчете (вверху) и эксперименте (внизу)

При верификации ММ стенда использовались конструктивные исходные данные, известные с высокой степенью точности, и именно они закладывались в модель. Тем не менее получить хорошее соответствие расчета с экспериментом оказалось непросто из-за особенностей конструкции стенда.

При верификационных расчетах важно не только правильно отразить геометрию стенда и его статические характеристики, но и методически правильно описать элементы, которые на первый взгляд кажутся предельно простыми для моделирования. Для стенда МЭР таким элементом оказался трансформатор в цепи обратной связи по реактивности. В случае моделирования трансформатора как безынерционного элемента никаких колебаний электрической мощности стенда получить не удается даже при двух- или трехкратном увеличении коэффициента усиления реактивности по сравнению с экспериментальным.

В действительности в цепь передачи сигнала по реактивности трансформатор вносит фазовое запаздывание. При учете этой особенности картина возникновения колебаний мощности стенда воспроизводится ММ с приемлемой точностью. Следовательно, помимо подробного воспроизведения в ММ геометрических характеристик установки, работы систем автоматики, необходимо стремиться к подробному описанию элементов, даже на первый взгляд второстепенных.

Сравнение экспериментальных данных, полученных на разных установках, является трудоемким в связи с различными способами записи экспериментов и их обработки. Часто графически совместить такие результаты невозможно. Поэтому при выполнении верификационных расчетов следует ориентироваться на экспериментальные данные, которые приводятся в легко читаемых форматах.

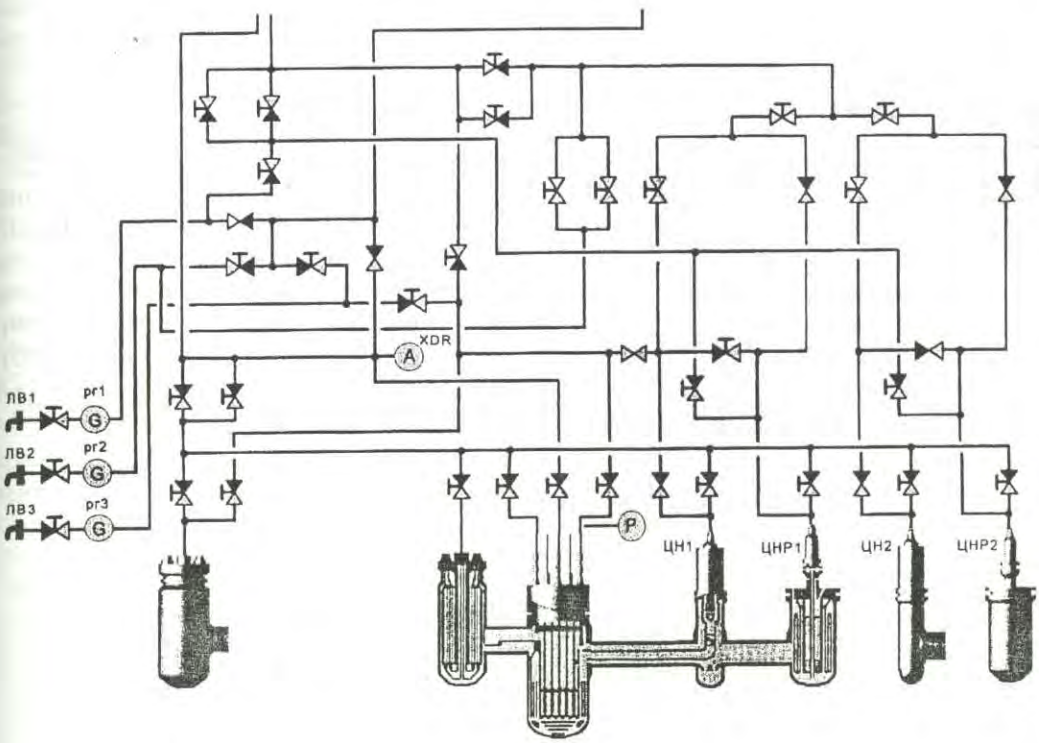
При математическом описании ядерных реакторов активную зону часто представляют одним средним эквивалентным каналом. В таких случаях ее реальная геометрия искажается, поскольку не учитываются радиальные размеры реактора. Для упомянутого здесь случая генерации «пакетов» колебаний решающим оказался как раз учет радиального поля энерговыделения. Так как ПГК с различным энерговыделением имеют разную частоту колебаний, между каналами имеется сдвиг фаз. Если он нулевой, то колебания расхода в отдельных каналах возбуждают колебания общего расхода циркуляции, что в свою очередь проявляется в увеличении амплитуды колебаний нейтронной мощности. Если же колебания в отдельных каналах оказываются в противофазе, то амплитуды колебаний общего расхода и нейтронной мощности уменьшаются.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ СТЕНД ВОРОНЕЖ

Стенд ВОРОНЕЖ представляет собой двухконтурную ядерную энергетическую установку ледокольного типа с водо-водяным реактором (ВВР). Этот стенд был введен в эксплуатацию в 70-е годы, и к настоящему времени накоплен довольно большой архив экспериментальной информации (~10 000 экспериментов). Благодаря исполь-

зованию одинаковых вычислительной базы и программ обработки архив полностью доступен и для сотрудников НИТИ, и для сотрудников организации главного конструктора. Эта форма взаимодействия установилась в последние год—два.

Конструктивно стенд ВОРОНЕЖ включает паропроизводящую и паротурбинную установки (ППУ, ПТУ) со всеми элементами в натуральную величину и реальными системами управления. В состав ППУ (рис. 12) входят: первый контур; газовая система КО; система подпитки и аварийной проливки (насосы, емкости, трубопроводы); система ББР; системы третьего и четвертого контуров; система вакуумирования; система осушения и дренажа; другие вспомогательные системы.

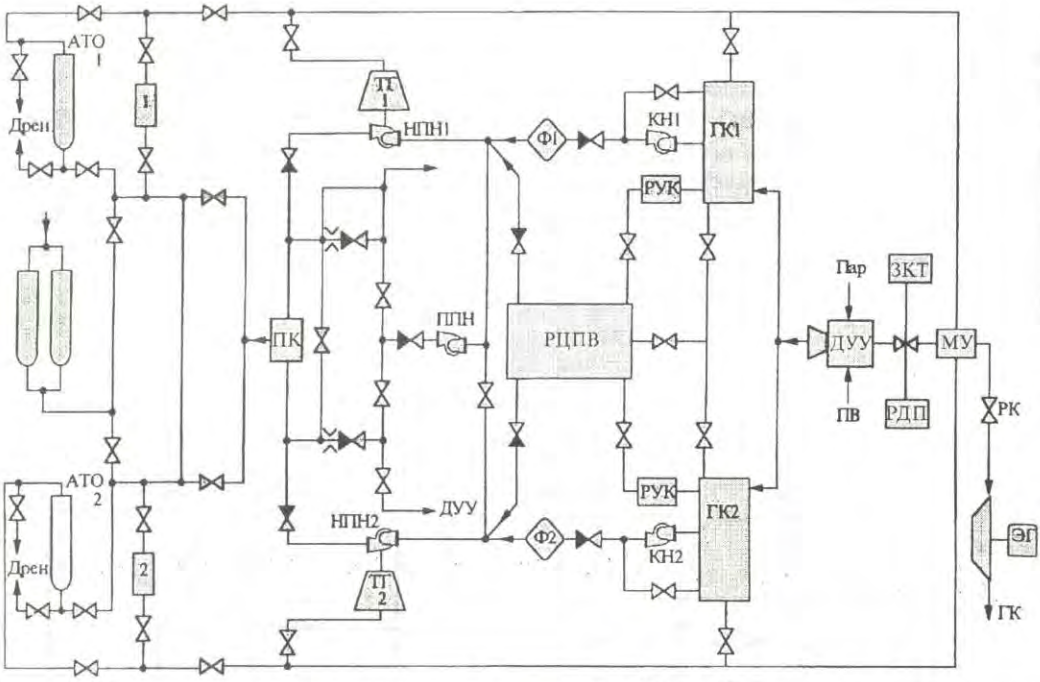


Р и с. 12. Принципиальная схема первого контура стенда ВОРОНЕЖ: ЦН — циркуляционный насос; ЦНР — циркуляционный насос расхолаживания

ПТУ (рис. 13) включает ГТЗА с электрогенератором; конденсатно-питательную систему; систему паропроводов; автономный турбогенератор с системой охлаждения; систему смазки и регулирования; систему охлаждения.

Система измерений, количество измеряемых сигналов отражены в таблице.

Для расчетного сопровождения испытаний, обеспечения безопасности, анализа полученных результатов, отработки вопросов управления и диагностирования ЯЭУ во всех спецификационных режимах и во всем диапазоне мощностей была разработана комплексная ММ динамики стенда ВОРОНЕЖ. Подробность описания систем установки позволяет формировать сигналы управления на все управляемые элементы и соответственно получать изменение контролируемых параметров в результате изменения состояния этих управляемых элементов. В ММ учтены практически все системы установки.



Р и с. 13. Принципиальная схема второго контура стенда ВОРОНЕЖ: АТО — аварийный теплообменник; ПК — питательный клапан; ГК — главный конденсатор; Ф — фильтр; ППН — пусковой питательный насос; ТГ — турбогенератор; НПН — навешенный питательный насос; ЭГ — электрогенератор; РУК — регулятор уровня в конденсаторе; РЦПВ — расходная цистерна питательной воды; РДП — регулятор давления пара; МУ — маневровое устройство; ЗКТ — задатчик клапана травления

КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ СТЕНДА ВОРОНЕЖ

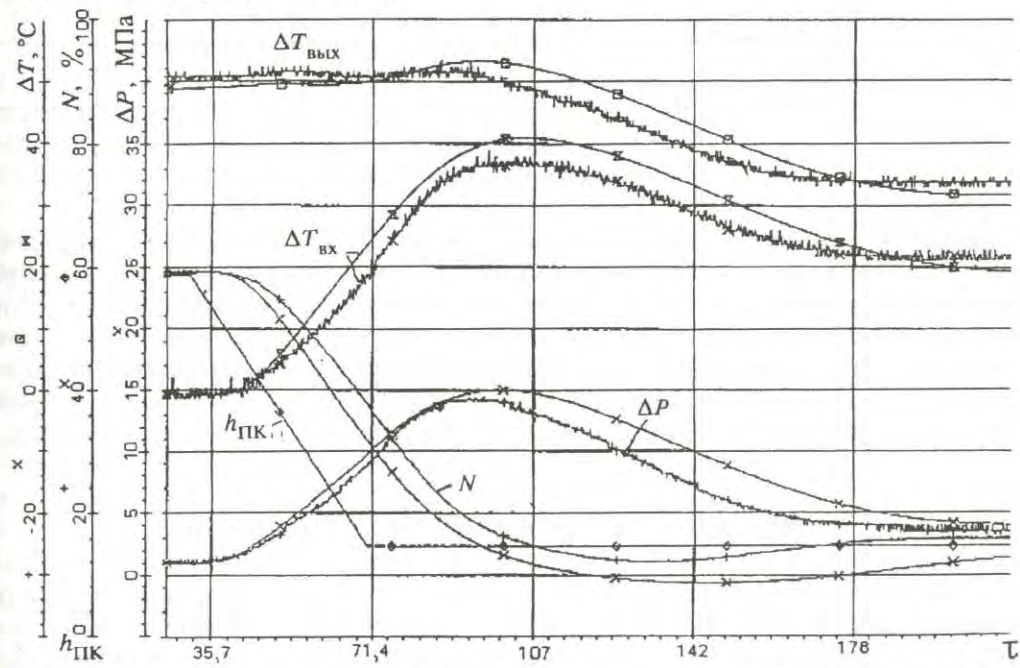
Параметр	Место измерения
Температура	По а.з. и реактору — по высоте ТВС и твэлов, МКП, во входной и выходной камерах реактора, перед ФИО — несколько десятков По 2-му к. — питательной воды и пара (по каждому ПГ), МУ По 3-му к. — после т/о 1—3 и 3—4-го к., БСВЗ По 4-му к. — на входе и выходе секций ГК; выходе т/о 3—4-го к., цист. МОРЕ По блоку очистки и расхолаживания — около 70 термопар по всей конструкции По системе КО — около 30 термопар по всей конструкции
Давление и перепады давления	В 1-м к. и системе КО (по группам) Во 2-м к. — за КН и ПН, за ПГ, в МУ В 3-м к. В контуре охлаждения В КБ системы расхолаживания
Расход	По 2-му к. — общий и по каждому ПГ
Уровень	В баллонах КО В секциях ГК В КБ системы расхолаживания В цистернах 2-го к. и РБ 3-го к.
Оборот	ЦНПК Линии вала АТГ
Нейтронно-физические характеристики	Нейтронная мощность Реактивность и период Нейтронные потоки по высоте ТВС в различных ячейках (несколько десятков)

Окончание таблицы

Положение управляющих органов	Положение секций КР Положение групп стержней АЗ (сигнализаторы) Положение регулирующих клапанов (ПК, КТ, КПХ)
Сигналы о состоянии арматуры и работе оборудования	Клапанов (на верхних или нижних концевиках) — несколько десятков Некоторых насосов — около 15
Сигналы, вырабатываемые СУ	Причины срабатывания АЗ Причины срабатывания ПС Причины появляющихся ограничений мощности

Для повышения точности расчетных прогнозов разработанная ММ верифицировалась посредством сравнения рассчитываемых параметров с аналогичными экспериментальными [4], зарегистрированными в различных сериях экспериментов. По результатам сравнения в ММ корректировались коэффициенты уравнений, причем для ответственных систем корректировка выполнялась с использованием методов идентификации (например, для прямоточного и U-образного парогенераторов).

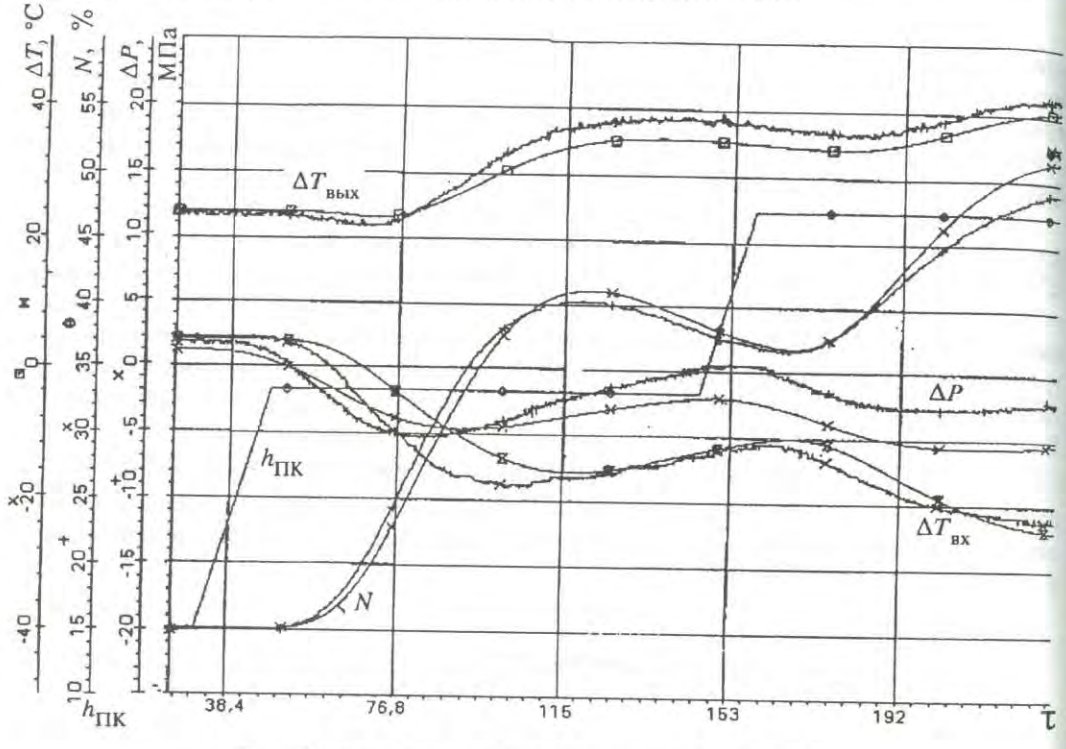
Основные режимы работы установки, на основании которых выполнялась верификация ММ, — маневрирование мощностью, переключения ЦНПК, переходы ЕЦ—ПЦ и обратно, изменение параметров охлаждающей воды внешнего контура. С использованием вычислительной техники расчетные результаты совмещали с экспериментальными данными на одном графике, что позволило наглядно отследить погрешности ММ по любому параметру в любой момент времени (расчетные кривые на графиках в отличие от экспериментальных не «дрожат» и потому легко различимы). В качестве примера можно привести (рис. 14) случай уменьшения мощности реактора с 60 до 15% $N_{ном}$ в режиме саморегулирования при работе двух ЦНПК. В переходном процессе наибольшее отклонение расчетных параметров — нейтронной мощности, давления в контуре, температуры теплоносителя на входе и выходе из активной зоны — в пределах 5% текущих значений.



Р и с. 14. Переход мощности с 60 на 15%: $\Delta T_{вх}$, $\Delta T_{вых}$ — отклонения температуры теплоносителя на входе и на выходе активной зоны; N — нейтронная мощность; ΔP — отклонение давления в компенсаторе объема; $h_{ПК}$ — положение питательного клапана

Наибольшие сложности при математическом описании подобных процессов связаны с учетом закономерностей теплообмена в активной зоне и парогенераторах, а также гидравлики первого контура. При сравнении результатов расчетов с экспериментом были использованы практически все измеряемые параметры.

Приблизительно такая же погрешность описания процессов в реакторной установке, как и в предыдущем примере, достигается при маневрах с увеличением мощности (рис. 15). Причем для анализа выбран даже более сложный случай, при котором увеличение мощности с 15 до 48 % $N_{ном}$ осуществляется в два приема. Распространение тепловых волн по контуру имеет более сложный характер, чем на рис. 14, тем не менее совпадение расчета с экспериментом удовлетворительное.



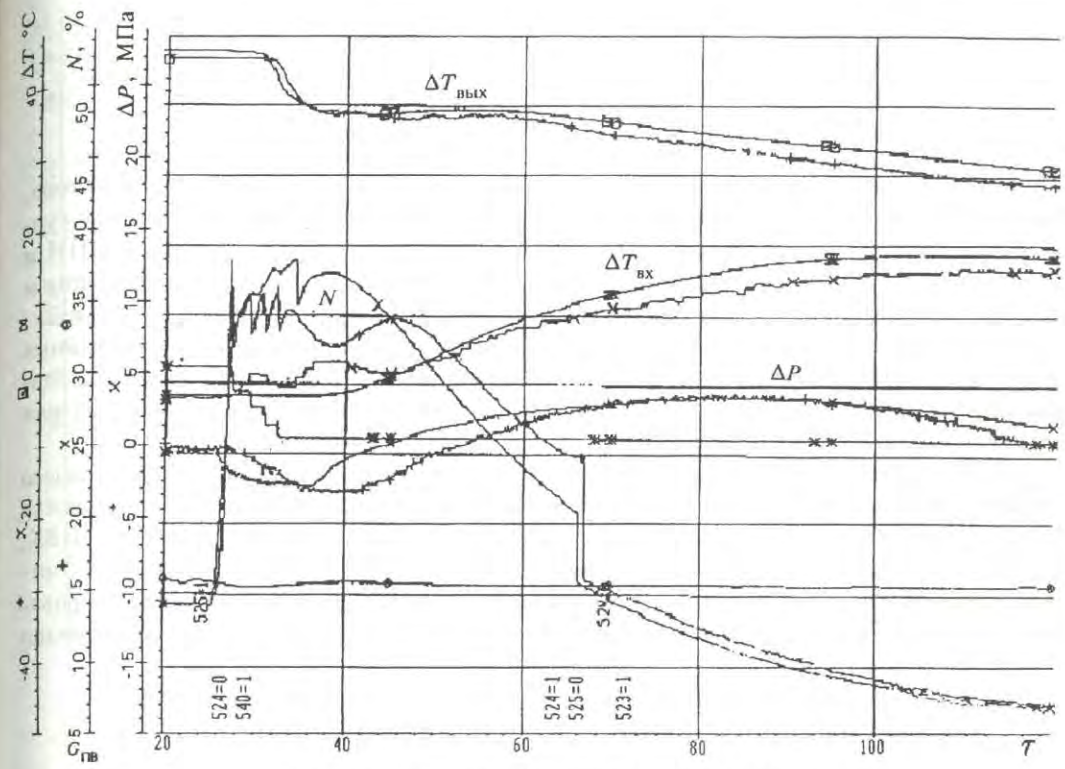
Р и с. 15. Двухступенчатый переход мощности с 15 на 48%

Еще более сложным случаем переходного процесса является режим перехода с естественной циркуляции на принудительную (рис. 16), характеризующийся быстрым ростом нейтронной мощности в момент включения насосов и вмешательством органов регулирования в процессе ограничения мощности. Совпадение результатов расчета и эксперимента оказалось удовлетворительным. Наиболее важные особенности переходного процесса — моменты переключений — ММ отражает правильно. Отклонение основных параметров, полученных в расчете, от экспериментальных не более 5%.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ СТЕНД ЛЕНИНГРАД

Основной проблемой исследований на стенде ЛЕНИНГРАД явилась отработка технологий принципиально новой двухконтурной ЯЭУ с жидкометаллическим теплоносителем в первом контуре. Упрощенная принципиальная схема установки с одной петлей теплообмена показана на рис. 17.

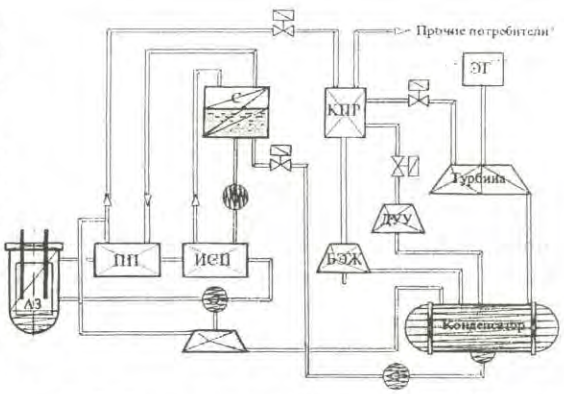
Теплоноситель первого контура подается насосом в активную зону, нагревается и поступает в верхнюю смесительную камеру, откуда по трубопроводам последова-



Р и с. 16. Переход с ЕЦ на ПЦ на мощности 14%

тельно подается в пароперегреватель и испаритель-парогенератор. После этого теплоноситель поступает на всас насоса, и контур циркуляции замыкается.

Во втором контуре в качестве теплоносителя используется вода. Циркуляция воды осуществляется насосами, однако на частичных уровнях мощности в контуре МПЦ возможна и ЕЦ теплоносителя. В сепараторе образуется парожидкостная смесь, пар из которой сепарируется и поступает в пароперегреватель. Основная часть перегретого пара на энергетических уровнях мощности подается на турбину и частично на турбоприводы насосов первого контура.



Р и с. 17. Принципиальная схема стенда ЛЕНИНГРАД: АЗ — активная зона; ПП — пароперегреватель; ИСП — испаритель; С — сепаратор; КПР — коробка парораспределения; БЭЖ — блок эжекторов

Рассмотрение технологической схемы установки, имеющей три петли теплообмена, показывает сложные взаимосвязи всех контуров и систем, которые при математическом моделировании вызывают значительные сложности как при организации, так и при верификации программы. На основе анализа особенностей исследуемой установки в проекте было определено число точек измерений, которое по аналоговым каналам составляет:

температура теплоносителя	129
температура сред в контурах	66
нейтронно-физические параметры	11
положение стержней СУЗ	11
давление сред в контурах	30

расходы и уровни сред	17;
положение регулирующих органов ППУ и ПТУ	21
обороты насосов и ТГ	9
токи и напряжения ЭЭС	16
по дискретным каналам	~600

Математическая модель динамики установки включает описание [5] реактора, трех петель теплообмена со встроенными теплообменниками, двух автономных турбогенераторов, главного конденсатора, конденсатно-питательной системы с ППН и НПН, системы трубопроводов с запорно-отсечной арматурой, системы управления и защиты. ММ позволяет рассчитывать все основные режимы работы установки: пуск, работу на энергетических уровнях мощности, расхолаживание и некоторые аварийные ситуации. В ММ рассчитываются все интегральные параметры, выход которых за аварийные уставки на реальной установке приводит к срабатыванию АЗ реактора или отключению части оборудования.

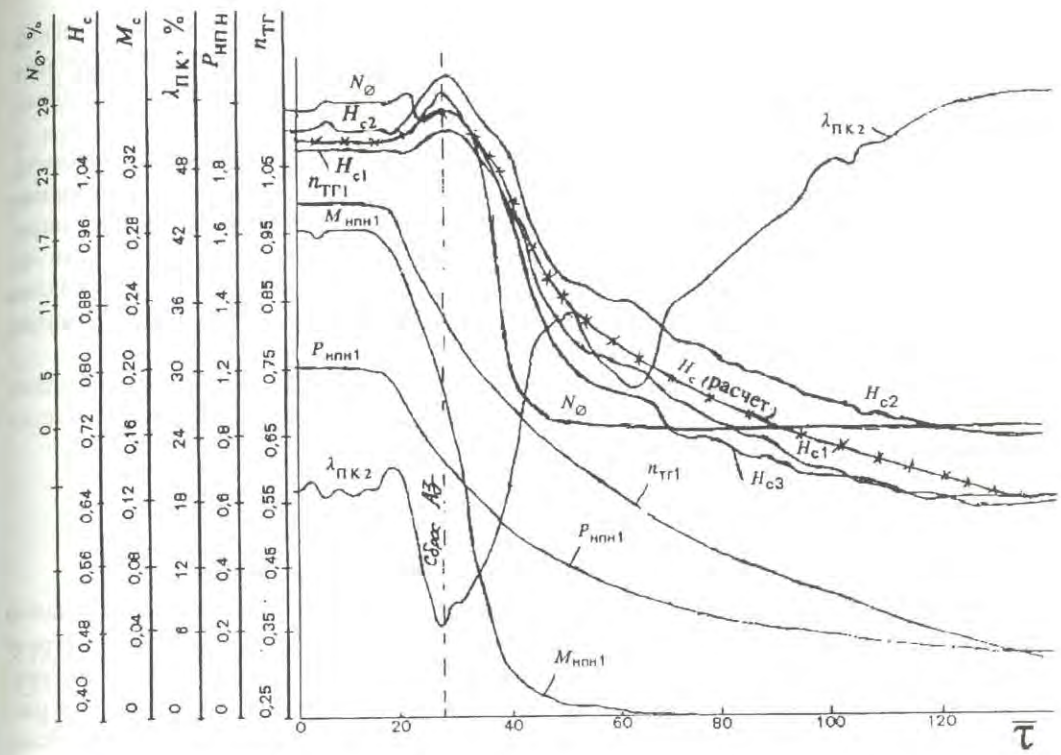
Для установления адекватности расчетных процессов реальным в ММ каждого элемента или системы выделяются входные и выходные переменные, которым могут быть поставлены в соответствие экспериментальные данные, регистрируемые ИВК. Качество моделирования переходных процессов проверяется сопоставлением с соответствующими экспериментами, причем многие из таких экспериментов планировались и проводились специально (всего на установке проведено и зарегистрировано ~5000 экспериментов).

Идентификация ММ осуществляется по следующим параметрам:

— тепловой мощности реактора;
— температурным коэффициентам реактивности;
— весам стержней СУЗ в реактивности;
— средней температуре теплоносителя на входе в реактор;
— средней температуре теплоносителя в верхней смесительной камере;
— расходам теплоносителя в реакторе и по петлям теплообмена;
— расходам котловой и питательной воды по каждой петле теплообмена;
— уровням теплоносителя в сепараторах и другим параметрам.

Однако большая размерность системы, сложные взаимосвязи параметров и неполная наблюдаемость переменных состояния не позволяют использовать для идентификации известные классические методы. Поскольку установка ЛЕНИНГРАД оснащена измерительно-вычислительным комплексом, для идентификации параметров применялся более простой способ, при котором первоначально в модель подается часть экспериментальных данных с последующим уменьшением их числа в процессе идентификации. Использование этого подхода позволило добиться погрешности моделирования основных параметров до 1,5% в стационарных режимах и до 3—5% в динамических.

Чтобы подтвердить высокое качество разработанной ММ, рассмотрим пример расчета режима выпаривания воды из сепараторов при остановке последнего из двух турбопитательных насосов и сравним результаты [5] с экспериментальными данными (рис. 18). После выключения навешенного питательного насоса давление за ним уменьшается и при выполнении условия $P_{\text{НПН}} = 0{,}67\ P^{\text{ном}}_{\text{НПН}}$ проходит сигнал на сброс АЗ реактора. По сигналу АЗ включается ППН, но воду в сепаратор не подает до тех пор, пока давление во втором контуре выше напора, развиваемого ППН. При этом происходит выпаривание воды из сепараторов. Одновременно со сбросом АЗ происходит перестройка насосов подачи котловой воды в испаритель-парогенератор с большой скорости на малую. Уровни теплоносителя в сепараторах при этом увеличиваются, питательный клапан вследствие этого прикрывается, усугубляя аварийную ситуацию, поскольку происходит дальнейшее выпаривание воды во всех сепараторах. Опасность этой ситуации состоит в том, что при уменьшении уровней до критических отметок



Р и с. 18. Режим отключения последнего из двух питательных насосов

дальнейшая работа ППН приведет к попаданию «холодной» (~68÷70 °С) питательной воды на трубные доски испарителя, что может вызвать их растрескивание или даже разрушение.

Цель расчета состояла в том, чтобы определить максимальный уровень мощности, при котором остановка последнего из двух работающих турбопитательных насосов не приводит к забросу «холодной» воды в испаритель. Результаты расчета и эксперимента приведены на рис. 18. Чтобы не загромождать рисунок, вместе с экспериментальными кривыми приведена только одна наиболее сложная для расчета зависимость изменения уровня теплоносителя в сепараторе-парогенераторе. Достигнутая погрешность моделирования для указанной зависимости составила ~5%.

Архив экспериментальной информации по стенду ЛЕНИНГРАД предоставляет большие возможности для верификации комплексных ММ. В качестве подтверждения сказанного можно отметить некоторые наборы экспериментов, по которым верифицировалась ММ стенда ЛЕНИНГРАД:

— стационарные уровни мощности с шагом по 5 ± 10% от МКУ до 100% на различные моменты кампании. Эти данные позволяют верифицировать поле температур на выходе из активной зоны, которое зависит от ее профилирования по радиусу и от геометрии входных и выходных патрубков;

— переходные процессы с изменением мощности от 15 до 100% и обратно. При моделировании этих режимов удалось определить скорость изменения важных эксплуатационных параметров (мощность, расход, давление) и изучить последствия возможных рассогласований в системах управления нейтронной мощностью и расходом теплоносителя (рассогласование не более 0,2%);

— плановые режимы с отключением всех насосов первого контура на малых (0—1% $N_{ном}$) уровнях мощности. В этих режимах удалось четко определить знак и величину температурного коэффициента реактивности по направлению движения автоматических регуляторов и условия развития ЕЦ;

— плановые режимы с имитацией отключения насосов МПЦ в энергетическом диапазоне мощностей. Расчет этих режимов и настройка ММ позволили определить максимальные безопасные уровни мощности, при которых возможна работа установки в режиме ЕЦ по второму контуру;

— аварийные режимы с отключением одной, двух и трех петель теплообмена одного и двух турбогенераторов с НПН, закрытием отсечных клапанов на главном паропроводе. В этих режимах использовались практически все регистрируемые параметры и благодаря этому удалось со сравнительно малой погрешностью описать закономерности теплообмена по всем теплообменникам, коэффициенты сопротивления магистралей и клапанов, постоянные времени насосов, характеристики регулирующих органов, т.е. достичь высокого качества ММ.

Верификация комплексной ММ установки ЛЕНИНГРАД, как и в предыдущих случаях, выполнялась от частного к общему с использованием максимально возможного количества экспериментальных величин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Верификация интегрированных программных комплексов является чрезвычайно сложным и трудоемким делом, в котором заметную, а иногда и решающую роль играет не механическое применение твердо установленных теоретических или полуэмпирических зависимостей, а соображения здравого смысла. Независимо от сложности рассматриваемого объекта верификация ММ должна начинаться с обязательного определения геометрических характеристик оборудования и систем. Этот этап с учетом реального состояния наших проектов может играть важнейшую роль в точности расчетных оценок. Кроме геометрических размеров должны быть максимально точно установлены характеристики запорно-регулирующий арматуры, клапанов, насосов, трубопроводов, вес регулирующих стержней по реактивности, свойства теплоносителя и т.п.

Независимо от информационной емкости реальных систем измерений, применяемых на современных реакторных установках, в конечном итоге количества экспериментальных данных для полной верификации ММ оказывается недостаточно. Поэтому перед верификацией интегрированных программных комплексов желательно (иногда необходимо) тестировать ее элементы по результатам экспериментов на локальных стендах.

Опыт верификации интегрированных программных комплексов для целого ряда полномасштабных ЯЭУ показывает, что хорошие совпадения результатов расчета с экспериментом можно обеспечить для ММ с различной степенью подробности описания физических процессов. Самым важным моментом здесь оказываются правильно установленные функциональные зависимости между различными физическими процессами. Такие зависимости, как правило, устанавливаются на основе рассмотрения статических характеристик реактора. Именно поэтому верификация интегрированных программных комплексов может быть полной только в том случае, если основана на сопоставлении статических и динамических характеристик, полученных в расчете и эксперименте, включая информацию по реальным аварийным режимам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ивличев В.В.** Особенности динамики малогабаритных ядерных энергетических установок с кипящими реакторами: Автореф. дис. на соиск. уч. степени к.т.н. — М.: ИАЭ, 1978.
2. **Зимаков В.Н.** Исследование колебательных режимов работы кипящих водо-водяных реакторов на основе комплексного математического полунатурного моделирования: Автореф. дис. на соиск. уч. степени к.т.н. — М.: ИАЭ, 1983.
3. **Сулыбкин С.В.** Устойчивость кипящих реакторов с естественной циркуляцией теплоносителя: Автореф. дис. на соиск. уч. степени к.т.н. — М.: ИАЭ, 1990.

4. **Витии С.П.**, Зимаков В.Н., Спиридонова Л.И. и др. Использование экспериментальных данных наземного прототипа судовой атомной энергетической установки для верификации математических моделей различного назначения. — В кн.: Тез. докл. Семинара по динамике. — Димитроград, НИИАР, 1996.
5. **Ефимов В.А.** Проблемы обеспечения безопасности при отработке ЯЭУ с жидкометаллическим теплоносителем на стенде-прототипе: Автореф. дис. на соиск. уч. степени к.т.н. — Обнинск: ФЭИ, 1989.

Статья поступила в редакцию 22 января 1999 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Физика ядерных реакторов, 1999, вып. 2, с. 103—119.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА И УСТОЙЧИВОСТИ КИПЯЩЕГО ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОТОКА В РЕЖИМАХ АВАРИЙНОГО РАСХОЛАЖИВАНИЯ БЫСТРОГО РЕАКТОРА

А.П. Сорокин, А.Д. Ефанов, Е.Ф. Иванов, Д.Е. Марцинюк, О.А. Корхов, Г.П. Богословская, К.С. Рымкевич, В.Л. Мальков, ГНЦ РФ Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, 249020, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1

Представлены описание экспериментальной установки, датчиков и методик измерений, экспериментальные данные по исследованию кипения жидкометаллического теплоносителя в модели тепловыделяющей сборки быстрого реактора в режимах аварийного расхолаживания с малыми скоростями циркуляции. Анализируются физика, характеристики и устойчивость наблюдавшихся в экспериментах различных режимов кипения (пузырьковый, снарядный, дисперсно-кольцевой), в результате чего получена картограмма. Приведены описание математической модели процесса кипения жидкометаллического теплоносителя в контуре естественной циркуляции и результаты тестовых расчетов для режимов с повышением энерговыделения и при резком сбросе давления.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF HEAT EXCHANGE AND STABILITY OF LIQUID METAL STREAM UNDER FAST REACTOR ACCIDENT HEAT REMOVAL CONDITIONS. A.P. SOROKIN, A.D. YEFANOV, Ye.F. IVANOV, D.Ye. MARTSINIOUK, O.A. KORKHOV, G.P. BOGOSLOVSKAYA, K.S. RYMKEVICH, V.L. MALKOV. The explanation of test section, transmitters and measurement procedure and the experimental data on investigation of liquid metal coolant boiling in a model of fast reactor fuel subassembly under the accident heat removal conditions with small circulation velocities are represented. The physics, performances and stability of various boiling regimes observed in experiments (nucleate, slug, disperse-annular) are analyzed. Experimental pattern map for liquid metal boiling was obtained. The explanation of a mathematical model of liquid metal boiling in the natural circulation circuit and outcomes of test accounts for conditions with a raise of heating and with sharp dumping of pressure are represented.

ВВЕДЕНИЕ

Проблемам, связанным с кипением щелочных металлов, на протяжении последних трех десятилетий уделялось большое внимание [1, 2]. Изучались теплоотдача, режимы течения, гидравлическое сопротивление, кризисы теплоотдачи, начальные перегревы, механизм процесса кипения, вопросы его устойчивости. Результаты этих исследований показывают, что в сравнении с кипением воды процесс кипения жидких металлов имеет существенные особенности, в частности:

— в реальных условиях взаимодействие отдельных факторов оказывается настолько сложным, что начальный перегрев для вскипания жидких металлов трудно точно прогнозировать;

— у щелочных металлов образуются большие пузыри на ограниченном числе центров парообразования, основная часть времени цикла образования пузыря приходится на период ожидания;

— рост парового пузыря щелочного металла носит взрывообразный характер; скорости роста пузыря имеют порядок 10 м/с;

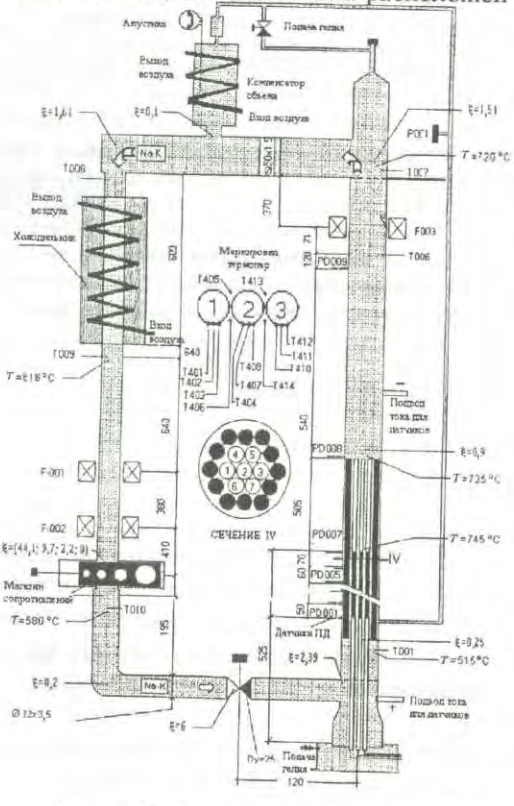
— основные режимы течения двухфазных потоков щелочных металлов те же, что и у обычных теплоносителей, при давлении, близком к атмосферному, преобладает дисперсно-кольцевой режим течения;

— фазовый переход при дисперсно-кольцевом течении щелочных металлов в каналах, как правило, осуществляется испарением с поверхности пристенной пленки жидкого металла без образования пузырьков (кипения) на стенке, эффективные коэффициенты теплоотдачи при этом достигают сотен кВт/м^2.

В исследованиях кипения жидких металлов в тепловыделяющих сборках твэлов быстрых реакторов основной упор сделан на анализе переходных и аварийных режимов, вызванных резким увеличением мощности и различного рода блокадами проходного сечения активной зоны, остановом циркуляционного насоса (при выбеге ротора и без него). Существуют лишь ограниченные данные по кипению в пучках для режимов с малыми скоростями течения теплоносителя (или при естественной конвекции).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

Экспериментальная установка для исследования кипения эвтектического натрий-калиевого сплава (22% Na + 78% K) в условиях естественной конвекции (рис. 1) содержит два вертикальных канала высотой 3 м, соединенных вверху и внизу и образующих соответственно опускную и подъемную ветви контура циркуляции. В нижней части подъемного канала расположен рабочий участок с семистержневой сборкой имитаторов твэлов. Сборка состоит из 7 имитаторов и 12 стержней-вытеснителей, расположенных в треугольной решетке с относительным шагом $s/d = 1{,}185$ и заключенных в трубу из нержавеющей стали 50×1,5 мм длиной 3 м.



Р и с. 1. Схема экспериментальной модели

Имитаторы твэлов представляют собой калиброванные трубки заводского изготовления 8×1 мм из нержавеющей стали Х18Н10, внутри которых установлены спиральные нагреватели из молибденовой проволоки диаметром 1 мм. Диаметр спирали 4 мм, длина 420 мм. Зазор между нагревателями и оболочками имитаторов заполнен порошком из плавленой окиси магния.

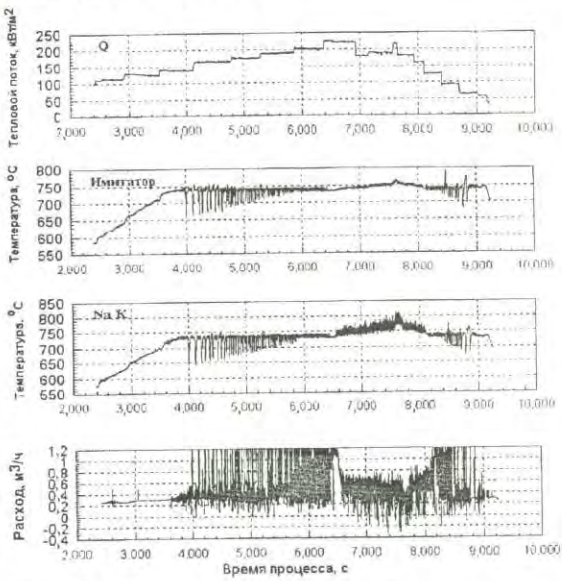
Оснащение модельной сборки ТВС значительным количеством измерительных каналов, содержащих различные первичные преобразователи (датчики), позволило получить обширный экспериментальный материал для исследования процесса кипения жидкометаллического теплоносителя в сборке электрообогреваемых имитаторов твэлов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведена серия экспериментов по исследованию процесса кипения эвтектического натрий-калиевого сплава в модели тепловыделяющей сборки быстрого реактора в режимах естественной конвекции при различных массовых скоростях потока вследствие изменения гидравлического сопротивления контура циркуляции с использованием дроссельного устройства. Методика экспериментов состояла в том, что при неподвижном теплоносителе в контуре увеличивалась тепловая мощность тепловыделяющей сборки и начиналось естественное конвективное движение теплоносителя. По мере роста тепловой мощности сборки повышалась температура теплоносителя, пока не достигалась температура насыщения в зоне обогрева и не начинался процесс кипения (рис. 2). Существовали три самостоятельных режима кипения:

— пузырьковый в начальной стадии процесса. Его особенностью являлось устойчивое значение всех параметров (температура теплоносителя имитаторов, перепад давления на сборке, расходы теплоносителя на входе и выходе из зоны обогрева). Увеличение мощности энерговыделения приводило к переходу пузырькового кипения в снарядное;

— снарядный режим при плотности теплового потока 125— 170 кВт/м^2. Отличительной особенностью этого режима являлся пульсационный характер. Образовывались крупные паровые пузыри (снаряды) с интервалами 40 с и более, которые в момент всплытия вызывали резкое увеличение расхода теплоносителя на входе и, как следствие, значительные колебания всех измеряемых параметров. Таким образом, колебания параметров имели гидродинамическую природу и поэтому определялись не только процессом непосредственно кипения теплоносителя в тепловыделяющей сборке, но и комплексом процессов, происходящих и в сборке, и в циркуляционном контуре. Важно особо подчеркнуть, что температура оболочки имитаторов твэлов не превышала температуры насыщения, что свидетельствовало о наличии жидкометаллической пленки на поверхности имитаторов. Повышение мощности сборки приводило к увеличению частоты образования снарядов и уменьшению амплитуды пульсаций температуры. При плотности теплового потока от 210 до 230 кВт/м^2 наблюдался переход от снарядного к дисперсно-кольцевому режиму;



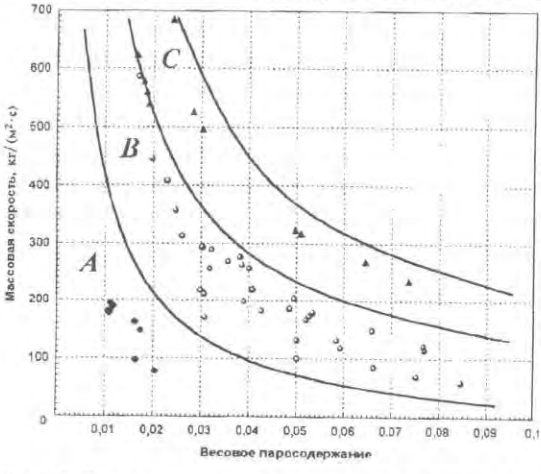
Р и с. 2. Плотность теплового потока, температура имитатора и теплоносителя на выходе из зоны энерговыделения и объемный расход теплоносителя в эксперименте с дроссельной шайбой d = 20 мм

— дисперсно-кольцевой режим кипения характеризовался устойчивым поведением измеряемых параметров. Испарение жидкости и унос капель с поверхности имитаторов приводил осушению поверхности — кризису теплообмена, сопровождавшемуся плавлением оболочки имитаторов, и переходу к тяжелой аварии.

Дисперсно-кольцевой режим является предельным режимом кипения, обеспечивающим охлаждение тепловыделяющей сборки.

Результаты экспериментов показали, что при переходе от пузырькового к дисперсно-кольцевому режиму расход теплоносителя в контуре циркуляции увеличивается примерно в 3 раза. Это объясняется тем, что при малом весовом паросодержании потери на трение двухфазного потока относительно невелики и незаметны на фоне

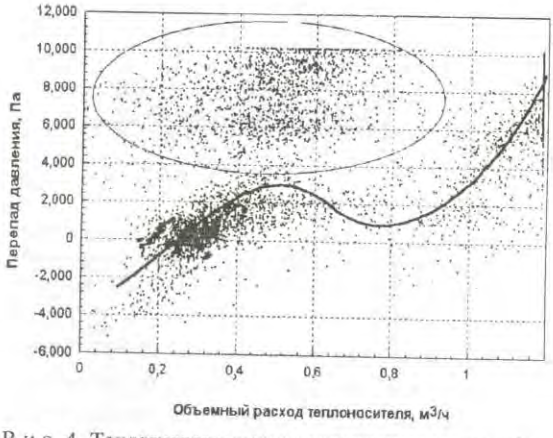
выталкивающей силы, действующей на паровую фазу. При тепловых потоках свыше 250 кВт/м^2, напротив, отмечалось падение расхода теплоносителя в контуре циркуляции и переход от дисперсно-кольцевого к дисперсному режиму кипения (закризисный теплообмен), поскольку истинное объемное паросодержание увеличилось незначительно, а трение двухфазного потока (как и весовое паросодержание) становится существенным.



Р и с. 3. Экспериментальная картограмма режимов кипения

В результате обработки экспериментальных данных была получена зависимость массовой скорости жидкого металла от весового паросодержания (картограмма режимов кипения), представленная на рис. 3: *A* — пузырьковый режим кипения (устойчивый); *B* — снарядный (неустойчивый); *C* — дисперсно-кольцевой (устойчивый). Между указанными областями проведены приближенные аппроксимирующие линии.

КРИВАЯ УСТОЙЧИВОСТИ



Р и с. 4. Теплогидравлическая характеристика контура для эксперимента с дроссельной шайбой $d = 20$ мм



Р и с. 5. Теплогидравлическая характеристика контура для эксперимента с дроссельной шайбой $d = 12$ мм и дополнительным сопротивлением поджатого вентиля

В ходе обработки данных экспериментов важным этапом являлось построение гидравлических характеристик для каждого эксперимента в отдельности. В результате были получены точечные картограммы зависимости перепада давления в рабочем участке контура от объемного расхода (рис. 4 и 5).

Расположение точек на картограммах позволило провести аппроксимирующие линии, схожие с классической гидравлической характеристикой, соответствующей неустойчивому режиму кипения. Наряду с множеством точек, характеризующих пульсационный режим кипения, существует обособленное множество точек, относящихся к режиму устойчивого кипения, которое на представленных рисунках выделено овалом.

Первичные наблюдения показывают, что размер и расположение области устойчивости относительно кривой гидравлической характеристики зависят от суммарного сопротивления контура циркуляции. Во всех случаях эти области выделялись в верхней части картограммы, соответствующей макси-

мальному перепаду давления, и располагались тем ближе к аппроксимирующей линии, чем больше общее сопротивление; соответственно размеры области в этом случае уменьшаются. К примеру, эксперименте с дроссельной шайбой диаметром 20 мм (см. рис. 4) облако устойчивого кипения выделяется особенно ярко, а в эксперименте с малыми расходами (дроссельная шайба $d = 12$ мм и добавочное сопротивление зажатого вентиля, рис. 5) оно относительно невелико и практически теряется во множестве точек неустойчивого режима, выделить его можно лишь при более детальном изучении картограммы. Одновременно отчетливо прослеживается спрямление аппроксимирующей кривой гидравлической характеристики с увеличением суммарного сопротивления контура, т.е. гидравлическая характеристика становится однозначной. Следовательно, при большом гидравлическом сопротивлении вероятность возникновения неустойчивого режима кипения стремится к нулю, а точечное облако, соответствующее гидравлической характеристике, и область устойчивого кипения совпадают.

АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО КИПЕНИЮ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

Теплообмен при кипении жидких металлов. При кипении смесей, представляющих собой идеальные растворы (например, эвтектический сплав натрий—калий), зависимость коэффициента теплообмена α от концентрации низкокипящего компонента C' (в нашем случае это калий, $t_{кип} = 1033$ K) имеет один экстремум — минимум. В этом случае коэффициент теплообмена для смеси может быть меньше его аддитивного значения:

$$\alpha_{NaK} < \alpha_K C'_K + \alpha_{Na}(1 - C'_K), \qquad (1)$$

где α_{Na}, α_K — коэффициенты теплообмена при кипении чистых калия и натрия соответственно при одинаковом давлении.

Экспериментальные данные по кипению калия в большом объеме и в трубах [3] и сплава натрий—калий в пучках стержней, обработанные в виде коэффициентов теплоотдачи и представленные в виде зависимости

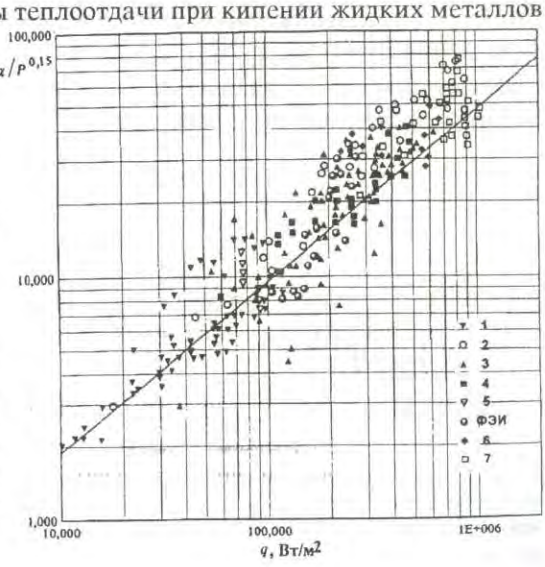
$$\alpha = Aq^m P^n, \qquad (2)$$

согласуются между собой (рис. 6). Коэффициенты в формуле (2), описывающие различные данные, понимают значения $m = 0{,}7$; $n \approx 0{,}1 \div 0{,}15$; $A = 4{,}5 \div 7{,}5$ как для калия, так и для сплава натрий—калий.

В критериальном виде коэффициенты теплоотдачи при кипении жидких металлов обобщаются зависимостью [3, 4]

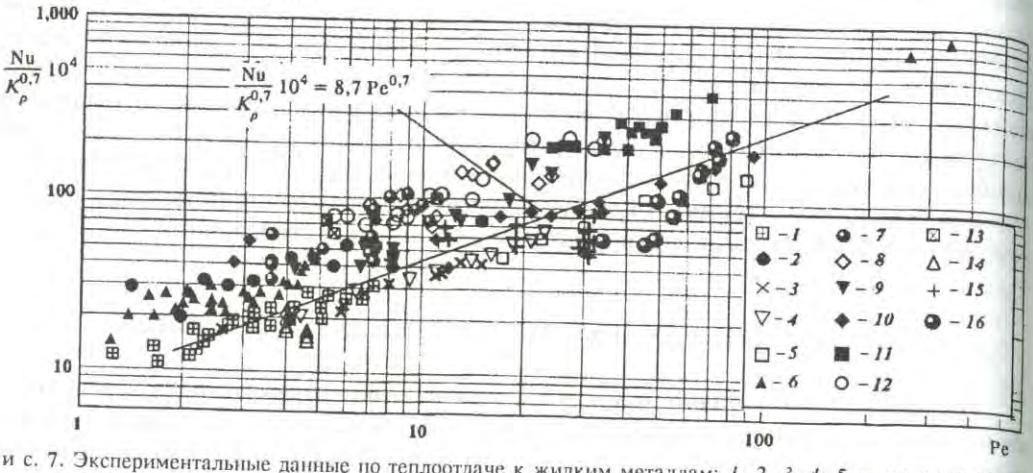
$$\mathrm{Nu} = 8{,}7 \cdot 10^4 \,\mathrm{Pe}^{0,7} K_p^{0,7}, \qquad (3)$$

где $\mathrm{Nu} = \frac{\alpha}{\lambda'}\sqrt{\frac{\sigma}{\rho' - \rho''}}$ — критерий Нуссельта; $\mathrm{Pe} = \frac{q\dot{c}\rho'}{r\rho''\lambda'}\sqrt{\frac{\sigma}{\rho' - \rho''}}$ — критерий Пекле; $K_p = \frac{p}{\sqrt{\sigma g(\rho' - \rho'')}}$.



Р и с. 6. Сравнение экспериментальных данных по теплоотдаче к жидким металлам. Калий: 1 — кипение в большом объеме; 2 — труба $D = 10$ мм (теплообменник); 3, 4, 5, 6, 7 — труба $D = 6$, 10, 22, 8,3 и 4 мм соответственно (электрический нагрев); эвтектика Na—K: ФЭИ — 7-стержневой пучок $D = 35{,}2$ мм (электрический нагрев)

Данные по теплоотдаче при кипении жидких металлов, обобщенные в соответствии с зависимостью (3), представлены на рис. 7. Экспериментальные точки, полученные авторами на сплаве натрий—калий, хорошо согласуются с общей зависимостью, что свидетельствует о возможности перенесения данных, полученных на натрий-калиевом теплоносителе, на натрий.



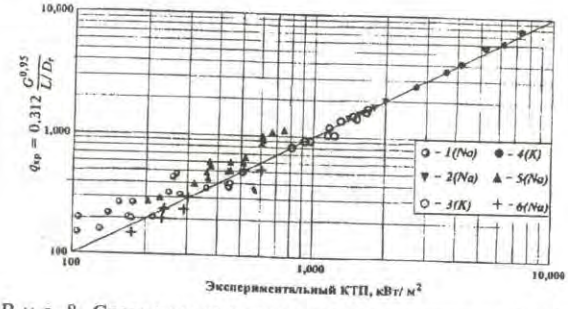
Р и с. 7. Экспериментальные данные по теплоотдаче к жидким металлам: *1, 2, 3, 4, 5* — кипение калия в большом объеме при p = 1,2, 1,1, 0,7, 0,4, 0,04 атм; *6, 7, 8, 9* — кипение натрия в большом объеме при p = 1,0, 0,472, 0,26, 1,0 атм; 10 — кипение натрия в большом объеме; *11, 12, 13* — кипение натрия, щель d = 2, 4, 1 мм; *14, 15* — кипение калия, труба d = 22, 8,3 мм; *16* — 7-стержневой пучок ФЭИ

Кризис теплообмена при кипении жидкого металла. Экспериментальные данные по величине критического теплового потока [5—8], полученные при кипении Na и K в трубах и сборке, были проанализированы в следующем диапазоне изменения параметров: массовая скорость G = 1,69 ÷ 402 кг/(м^2·с); давление P = 0,01 ÷ 3,0 бар; гидравлический диаметр канала $D_г$ = 4 ÷ 9 мм; длина участка энерговыделения L = 200 ÷ 1000 мм. Для этой области параметров величина критического теплового потока (КТП) изменялась в пределах 32,3–7370 кВт/м^2.

В результате обобщения имеющихся данных получено соотношение

$$q_{кр} = 0{,}312\frac{G^{0,95}}{L/D_г}r, \qquad (4)$$

где G — массовая скорость, кг/с; r — удельная теплота парообразования, кДж/кг; L — длина обогрева, м; $D_г$ — гидравлический диаметр канала, м. Из рис. 8 видно, что полученное соотношение достаточно хорошо описывает все данные независимо от условий проведения эксперимента.



Р и с. 8. Сравнение экспериментальных данных по КТП при кипении натрия и калия с КТП, рассчитанным по новому соотношению: *1* — Yamaguchi; *2* , *3* — Chang, Lee; *4, 5* — Kottowski, Savatteri; *6* — Kaiser

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Описанные выше режимы кипения жидкометаллического теплоносителя были смоделированы с помощью кода ТНВ, созданного на основе гомогенной одномерной математической модели со скольжением. Помимо системы дифференциальных уравнений движения и энергии для теплоносителя, модель включает уравнение энергии для имитаторов твэлов.

Код ТНВ моделирует естественную циркуляцию и кипение жидкометаллического теплоносителя в замкнутом контуре с дыхательным баком и системой нагревательных элементов. Расчет динамики производится исходя из начального распределения по длине контура температур имитаторов и теплоносителя, давления и скоростей, из гидравлики контура, выбора теплоносителя и подводимой к нагревательным элементам тепловой мощности. Результаты расчета записываются в файлы по времени для воспроизведения на графиках. Подводимую к имитаторам мощность можно изменять вручную, с клавиатуры, программно, по заданному закону или читать готовое распределение по времени из файла. Для проведения расчетов экспериментов тепловая мощность была взята из файлов, соответствующих реальному изменению плотности тепловыделения во времени в рассчитываемых экспериментах.

Полученные в результате расчетов графики изменения температуры имитатора на конце сборки, температуры теплоносителя в том же сечении и объемного расхода теплоносителя в сечении, соответствующем расходомеру на опускном плече реального контура, позволяют судить о схожести расчетного процесса с реальным с точностью до основных теплогидравлических характеристик (расхода, температуры, амплитуды пульсаций, частоты пульсаций). Сравнение расчетов с экспериментальными данными представлено на рис. 9 на примере эксперимента с наибольшим расходом теплоносителя с дроссельной шайбой $\varnothing = 20$ мм. Несмотря на очевидную простоту, модель хорошо отражает все основные феноменологические особенности проведенных экспериментов.

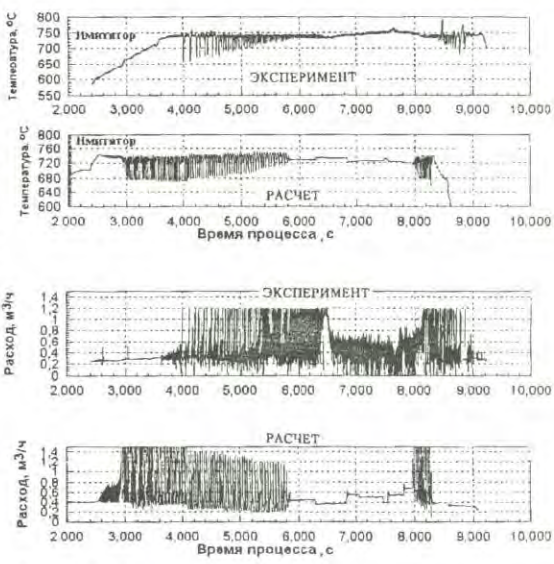
Основными достоинствами кода ТНВ являются:

— получение динамики процесса циркуляции и кипения теплоносителя в реальном времени с совпадением основных числовых характеристик;

— возможность выбора любого жидкометаллического теплоносителя с заранее известными свойствами;

— возможность выбора любой геометрии контура естественной циркуляции, включая контур реального реактора с жидкометаллическим теплоносителем;

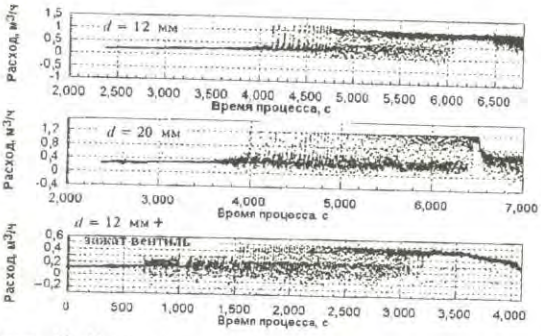
— возможность выбора закона изменения выделяющейся топливными элементами тепловой мощности.



Р и с. 9. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по температуре стенки имитатора и расходу теплоносителя (для условий эксперимента с дроссельной шайбой $d = 20$ мм)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперименты по исследованию процесса кипения жидкометаллического теплоносителя (эвтектический натрий-калиевый сплав) в модели тепловыделяющей сборки быстрого реактора в режимах естественной конвекции проведены в диапазоне массовых скоростей потока от 20 до 700 кг/(м^2·с) и плотностей теплового потока до 260 кВт/м^2. Существовали три самостоятельных режима кипения: пузырьковый, снарядный, дисперсно-кольцевой. Последний является предельным режимом кипения, обеспечивающим охлаждение тепловыделяющей сборки. Показано, что в снарядном режиме расход теплоносителя варьируется между значениями для пузырькового и для дисперсно-кольцевого режима кипения (рис. 10).



Р и с. 10. Изменение расхода теплоносителя в экспериментах

При переходе от пузырькового к дисперсно-кольцевому режиму расход теплоносителя в контуре циркуляции увеличивается примерно в 3 раза. При тепловых потоках свыше 250 кВт/м^2 отмечалось падение расхода теплоносителя в контуре циркуляции и переход от дисперсно-кольцевого к дисперсному режиму кипения (закризисный теплообмен).

Анализ экспериментальных данных по коэффициентам теплообмена и критическим тепловым потокам при кипении, проведенный для натрия, калия и эвтектического натрий-калиевого сплава, показывает, что на современном уровне знания теплофизические характеристики рассматриваемых жидких металлов подобны качественно и количественно. Следовательно, полученные экспериментальные результаты по теплообмену при кипении эвтектического натрий-калиевого сплава могут быть использованы при расчете теплообмена при кипении для натурных реакторных условий с охлаждением натрием.

Полученные результаты расчетов показали соответствие экспериментальным данным не только по характеру процесса, но и по основным теплогидравлическим характеристикам.

Следует отметить, что существуют лишь ограниченные экспериментальные данные исследований режимов кипения жидкометаллического теплоносителя при малых тепловых потоках в контуре с естественной циркуляцией. По существу не исследовано влияние многих факторов на процесс кипения и на границы между различными режимами кипения: давления (комплекс ρ_l/ρ_g), геометрических параметров, например длины участка энерговыделения, соотношения гидравлического сопротивления различных участков контура циркуляции. Не исследована устойчивость кипения жидкого металла в системе параллельных тепловыделяющих сборок. Продолжение экспериментальных и расчетно-теоретических работ позволит получить необходимое обоснование возможности устойчивого охлаждения активной зоны быстрых реакторов в режимах аварийного расхолаживания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зейгарник Ю.А., Литвинов В.Д.** Кипение щелочных металлов в каналах. — М.: Наука 1983, с. 125.
2. **Kutateladze S.S., Borishansky V.M., Novikov I.I., Fedensky O.S.** Heat transfer in liquid metal. — In: Zhidkometallitsheskye Teplonositelli. — Moscow: Atomizdat, 1958.
3. **Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П.** Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). — М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. **Галин Н.М., Кириллов П.Л.** Тепломассообмен (в ядерной энергетике). — М.: Энергоатомиздат, 1987.
5. **Yamaguchi K.** Flow pattern and dryout under sodium boiling conditions at decay power levels. — Nucl. Engng and Design, 1987, vol. 99, № 3, p. 247—263.
6. **Chang S.H., Lee Y.B.** A new critical heat flux model for liquid metals under low heat flux-low flow conditions. — Nucl. Engng and Design, 1994, vol. 118, № 3, p. 487—498.
7. **Kottowski H.M., Savatteri C.** Fundamentals of kiquid metal boiling thermohydraulics. — Nucl. Engng and Design, 1984, vol. 82, № 3, p. 281—304.
8. **Kaiser A., Peppler W.** Type of flow, pressure drop, and critical heat flux of a two-phase sodium flow. — Nucl. Engng and Desing, 1974, vol. 30, № 3, p. 305—315.

Статья поступила в редакцию 28 апреля 1999 г.

Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Физика ядерных реакторов, 1999, вып. 2, с. 119—126.

УДК 621.039.5

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНТЕРАКТИВНАЯ СИСТЕМА СОЗДАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ТРЕНАЖЕРОВ И АНАЛИЗАТОРОВ

К.Г. Яковлев, С.Д. Малкин, И.Д. Ракитин, В.В. Шаля, НА. Егоров, И.А. Иванов, С.В. Жигунов, РНЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Курчатова, 1

Представлен подход к разработке моделирующих систем, а также реализованная на его основе технология АИС-95 для создания моделирующих систем (включая тренажеры ядерных и тепловых энергоблоков).

THE AUTOMATED INTERACTIVE SYSTEM FOR THE CREATION OF SIMULATORS, ANALYZERS AND MATHEMATICAL MODELS. K.G. YAKOVLEV, S.D. MALKIN, I.D. RAKITIN, V.V. SHALIA, N.A. EGOROV, I.A. IVANOV, S.V. ZHIGUNOV. This paper presents the approach to the modeling systems dovelopment as well as the AIS-95 technology intended for creation of simulators, analyzers and mathematical models.

В Российском научном центре «Курчатовский институт» разработана технология АИС-95 для создания широкого класса моделирующих систем, включая тренажеры объектов ядерной энергетики.

Объекты ядерной энергетики, одни из самых экологически чистых при нормальных условиях эксплуатации, крайне опасны при авариях, связанных с выходом радиоактивности. Эти аварии могут быть следствием как отказа оборудования, так и ошибок или умышленных действий персонала. Ошибки оперативного персонала чрезвычайно дороги, поэтому необходимо постоянно поддерживать и закреплять у него навыки безошибочных действий в различных штатных и нештатных ситуациях в реальном времени протекания процессов. Этого можно добиться только с использованием полномасштабных тренажеров со всережимными математическими моделями.

Работы в области математического моделирования начались в РНЦ КИ более 30 лет назад и были ориентированы главным образом на создание полномасштабных тренажеров и моделирующих комплексов для оборонных объектов. В настоящее время превалируют задачи, связанные с гражданской тематикой. В Центре накоплен богатый опыт проектирования, создания и эксплуатации разнообразных моделирующих систем, в частности полномасштабных и аналитических тренажеров, анализаторов безопасности, анализаторов аварийных ситуаций, экспертных и учебно-методических систем.

Особенностью разработки тренажеров ядерных энергетических установок является то, что время, затраченное коллективом разработчиков на создание или модификацию моделирующего комплекса, имеет критическое значение вследствие того, что на самих объектах моделирования постоянно проводятся работы, приводящие к быстрому устареванию разработанных моделей. В этих условиях приобретает важное значение владение инструментарием (технологией разработки), позволяющим организовывать работу коллектива разработчиков, соответствующим образом унифицируя, структурируя и автоматизируя на различных уровнях процесс разработки и обслуживания моделирующего комплекса с целью скорейшего получения качественных моделей, открытых для дальнейшей модификации и развития.

Идея создания собственного тренажеростроительного инструментария появилась у нас давно. Первоначально ставилась задача разработать технологию создания тренажеров для объектов ядерной энергетики. Однако продукт, которым мы располагаем в настоящее время, оказался пригодным для создания широкого класса моделирующих систем.

В 1996 г. по технологии АИС-95 была разработана экспертная система, которая была внедрена в Комплексной тренировочной системе. В начале 1997 г. РНЦ КИ совместно с американской компанией Scientific Application International Corporation выиграл несколько тендеров на разработку и модернизацию тренажеров для тепловых и атомных электростанций США. В настоящее время эти тренажеры разрабатываются по технологии АИС-95 группой наших программистов, работающих в США.

В основе технологии АИС-95 лежит так называемая идеология ELUD (Easy to Learn, Use and Develop). Технология АИС-95 универсальна. Сфера ее применения — от традиционных задач тренажеростроения в ядерной энергетике до создания экспертных и обучающих систем для студентов вузов. Отдельной областью применения АИС-95 является конструирование специальных интерфейсных подсистем вспомогательного плана, выполняющих функции: съема данных с измерительной аппаратуры и с модели, выполненной средствами традиционного САПР; преобразования форматов данных; пред- и постобработки данных; передачи их моделям, реализованным средствами традиционных САПР, и т.д.

Техническая новизна АИС-95 заключается в том, что разработанные на ее основе системы обладают на встроенном уровне качествами, впервые в мировой практике позволяющими персоналу заказчика, даже не имеющему опыта математического моделирования (Easy to Learn), легко изменять характеристики, состав оборудования и систем модели энергоблока (Easy to Use). Особенно важно то, что получив, например, полномасштабный тренажер для одного энергоблока, специалисты заказчика смогут самостоятельно модифицировать или адаптировать его для других энергоблоков (Easy to Develop).

Обычно фирмы, создающие полномасштабные и аналитические тренажеры, не поставляют технологию их разработки в объеме, позволяющем заказчику самому модифицировать тренажеры в случае модернизации энергоблока и тем более адаптировать их к другим, даже весьма похожим энергоблокам. Более того, политика большинства фирм направлена на то, чтобы заказчик не смог развивать используемые в тренажерах математические модели и вынужден был всякий раз обращаться к изготовителю тренажеров.

Использование технологии АИС-95 позволяет обеспечить необычайно выгодные условия для заказчиков: купив один тренажер, он с помощью уникальных возможностей технологии АИС-95 своими силами может создать системы моделирования для других энергоблоков.

Учитывая стоимость современных тренажеров, крупные заказчики могут сэкономить миллионы долларов, применяя АИС-95 для решения проблем тренировки, анализа безопасности и поддержки оперативного персонала при нештатных и аварийных ситуациях. Технология АИС-95 — это качественно новый уровень моделирования, позволяющий создавать тренажеры, анализаторы и моделирующие комплексы для отработки действий персонала при любых авариях, в том числе тяжелых. Технология АИС-95 обеспечивает предельную легкость в изучении, использовании и развитии моделирующих комплексов.

Теперь перейдем к наиболее важным особенностям технологии АИС-95:

1. Пользователи могут не владеть знаниями в области математического моделирования и программирования, не быть специалистами в области программирования, разработки пользовательского интерфейса или численных методов решения дифференциальных уравнений. Иными словами, не требуется приобретения специфических знаний, умений и навыков. Инженер-физик, использующий инструментарий, не дол-

жен заботиться об организации взаимодействия своих модулей ни между собой, ни с модулями, разработанными другими членами команды, ни с системной частью инструментария, а также о решении проблем, связанных с распараллеливанием вычислений, управлением приоритетами, поддержкой многопроцессорных платформ и т.д. Все эти вещи должны происходить естественным образом.

2. Программирование заменяется рисованием математических моделей (рисовать можно не только технологические схемы, но и панели управления с соответствующими приборами); разработка моделей идет со скоростью рисования и задания исходных данных на экране дисплея. Мгновенная автоматическая привязка изображений к математическим моделям. Многие хорошие технологии обладают, к сожалению, серьезным недостатком: графическое представление объекта моделирования стоит в них как бы особняком, его редактирование не отражается непосредственно в математической модели, и наоборот, модификация математической модели не воздействует на представление объекта моделирования в виде схем. В результате адекватность математических моделей графическому представлению объекта моделирования легко нарушается, что усложняет разработку и адаптацию моделирующих систем, так как требует от пользователя отслеживать одни и те же изменения в явном виде как в модели, так и в технологических схемах. Отличительной особенностью новой технологии является неразрывная связь математической модели и графического представления объекта моделирования, выражающаяся в мгновенной автоматической привязке изображений к математическим моделям. Благодаря автоматической мгновенной привязке изображения любого элемента на экране дисплея к его математической модели эта технологическая схема или наглядно-художественное изображение сразу же должны начинать «жить». Ими можно управлять в динамике так же, как реальным объектом: например, воздействовать на поля энерговыделений в ядерном реакторе, включать и отключать клапаны, пускать и останавливать насосы, настраивать аппаратуру управления и защиты и т.д.

3. Режим редактирования NON-STOP, при котором все изменения в технологических системах, подключение новых объектов, приборов и т.д. производятся без приостановки процесса моделирования. Отладка сложных моделей представляет собой трудоемкий процесс, включающий действия, связанные с многократным добавлением/удалением компонентов технологических схем и производимые независимо с различных рабочих станций. Поскольку процесс запуска/останова модели может занимать значительное (вплоть до сотен секунд) время, технология автоматизации математического моделирования позволяет проводить указанные действия в режиме NON-STOP, т.е. без потери загрузки и приостановки процесса моделирования.

4. Один и тот же объект или система рассматривается различными специалистами с разных точек зрения. Например, в системе смазки подшипников турбоагрегата:

— специалист по гидравлике видит прежде всего гидравлическую схему;

— специалист по автоматике — схему регулирования, защит и блокировок;

— электрик — схему электропитания основных агрегатов, узлов и систем автоматики;

— оператор воспринимает эту систему и мысленно строит соответствующую модель ее работы по приборным панелям и органам управления.

Таким образом, реально происходит естественное разделение или расслоение сложных систем на подсистемы. При этом все специалисты должны иметь возможность работать одновременно, используя свои персональные экраны дисплея. Управление видимостью подсистем при их расслоении за счет переменной контрастности и изменения масштабов позволяет любому специалисту из команды аналитиков или экспертов работать самостоятельно, в то же время наблюдать за работой коллег и в любой момент использовать их результаты, не приостанавливая процесс моделирования.

5. Одновременная работа команды аналитиков или экспертов на «общей чертежной доске» позволяет обеспечить автоматическую интеграцию математической модели объ-

екта в целом, включая панель управления, позволяет автоматически учитывать изменения в модели объекта, вносимые с удаленной рабочей станции.

6. Так называемая книжная технология (book-технология) организации схем, заключающаяся в том, что схемы модели в АИС-95 представляют собой листы-экраны, иерархически организованные в разделы и главы, поэтому для схемы в АИС-95 употребляется термин «книга».

7. Генерация и использование объектов высокого уровня (макрообъектов) позволяют упростить изображаемые на экране сложные многосвязные технологические схемы и системы управления. Технология автоматизации математического моделирования предоставляет возможность использовать для построения моделей различные виды сложных компонент: подсхемы, макрообъекты, элементы изображения. Удобство использования макрообъектов сказывается и в тех случаях, когда некий фрагмент схемы требуется представить в виде «черного ящика» с заданными входами/выходами и скрытой внутренней структурой. Применение макрообъектов — «черных ящиков» позволяет легко изменять степень детализации модели, тем самым выполняется требуемое соотношение точности моделирования и скорости вычислений. Легкое изменение степени детализации описания объекта моделирования позволяет использовать однажды разработанную модель для применения в различных моделирующих системах. Так, в исследовательском тренажере для тщательного моделирования всевозможных нюансов физических процессов окажется необходимым детальный вариант модели, а в тренажере реального времени, где предъявляются жесткие требования к скорости вычислений, детальность модели не только может, но и должна быть понижена.

8. Открытость библиотеки как для новых программ и программных комплексов, создаваемых на основе технологии АИС-95, так и для уже существующих, в том числе весьма сложных, таких, как RELAP-5.

Статья поступила в редакцию 28 апреля 1999 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Физика ядерных реакторов, 1999, вып. 2, с. 127—130.

УДК 621.039.5.001.2:658.5-52

СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ РАЗРАБОТКИ И СОПРОВОЖДЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО И СПЕЦИАЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕНАЖЕРОВ И АНАЛИЗАТОРОВ ЯЭУ ТЕРМИТ-Д

Д.В. Лялюев, А.А. Шаленинов,
НИТИ им. А.П. Александрова, 188537, г. Сосновый Бор Ленинградской обл.

Представлена система автоматизации разработки программного обеспечения тренажеров и анализаторов ЯЭУ. Описаны функции ее составных частей.

A SYSTEM FOR AUTOMATION OF DESIGN AND MAINTENANCE OF THE TERMIT-D FUNCTIONAL AND SPECIALIZED SOFTWARE FOR SUMULATORS AND ANALYSERS OF NPP's. D.V. LYALYUYEV, A.A. SHALENINOV. The automation development system of the software for NPP simulators and analyzers is submitted. The functions of its components are described.

ВВЕДЕНИЕ

Мировые лидеры создания тренажеров для объектов атомной промышленности, такие, как GSE Systems (США) Tompson и Corys (Франция), Krupp Atlas Elektronik GmbH (Германия), применяют системы программно-технических средств собственной

разработки, называемые технологиями создания тренажеров. Эти технологии направлены прежде всего на автоматизацию процесса разработки и сопровождения программного обеспечения тренажера. Они позволяют создавать сложные и дорогостоящие технические системы в предельно короткие сроки и с минимальными затратами. Главной особенностью данных технологий является удобный графический интерфейс, сводящий процесс разработки функциональной части программного обеспечения тренажера к прорисовке топологий технологических систем установки с использованием графических изображений элементов оборудования из библиотек элементов, входящих в состав технологий.

Создание технологии является сложным и трудоемким делом, только прямые затраты на ее разработку (без учета стоимости многолетнего опыта работы в данной области) составляют несколько сот человеко-лет.

НИТИ имеет большой опыт создания тренажеров различного уровня (вплоть до полномасштабных) для исследовательских и судовых ЯЭУ [1]. Однако до недавнего времени тренажеры создавались на отечественной вычислительной технике, поэтому для обеспечения работы тренажера в реальном времени приходилось заниматься изощренным программированием на ассемблере или в машинных кодах при необходимости постоянной экономии ресурсов ЭВМ — производительности процессора, оперативной и внешней памяти, часто в ущерб качеству и эффективности тренажера в целом. К тому же и стоимость труда программистов составляла незначительную часть от стоимости вычислительной техники. Все это в совокупности делало проблему автоматизации разработки программного обеспечения тренажеров неактуальной.

В последнее время ситуация изменилась. Западная вычислительная техника стала доступна на отечественном рынке. А бурный рост ее производительности при одновременном снижении цен привел к тому, что основную часть стоимости тренажера составляет стоимость программного обеспечения. Поэтому стало важно иметь средства автоматизации производства программного обеспечения для уменьшения трудоемкости и времени создания тренажеров при одновременном улучшении их качества.

В связи с этим в НИТИ и в некоторых других отечественных организациях, работающих в данной области, разрабатываются собственные средства автоматизации создания программного обеспечения тренажеров и моделирующих комплексов для объектов атомной промышленности. Ориентация на разработку собственных средств автоматизации продиктована следующими факторами:

— расчетные коды, составляющие функциональное наполнение зарубежных технологий, разработаны для тренажеров РУ АЭС (PWR, BWR) и не могут быть приспособлены для расчета динамики таких объектов отечественной атомной промышленности, как установки РБМК, БН, исследовательские реакторы. Даже применительно к установкам водо-водяного типа для АЭС из-за различий в схемных решениях (например, горизонтальное, а не вертикальное исполнение парогенераторов), специфики конструкционных материалов, топливных композиций и т.д. невозможно прямое, без существенных изменений функциональной части, использование зарубежных расчетных кодов;

— проблемы с верификацией и аттестацией зарубежных расчетных кодов в РАН РФ;

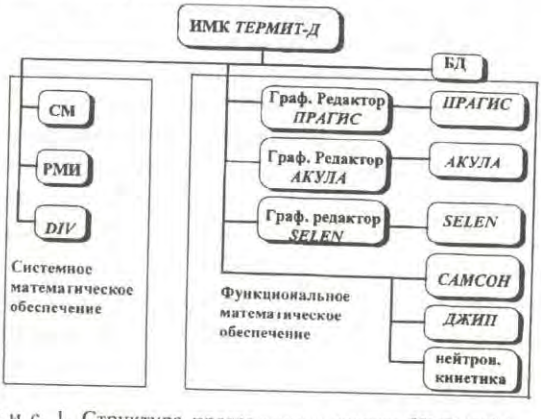
— сложность правовых вопросов при использовании зарубежных технологий;

— высокая стоимость лицензий на использование зарубежных технологий;

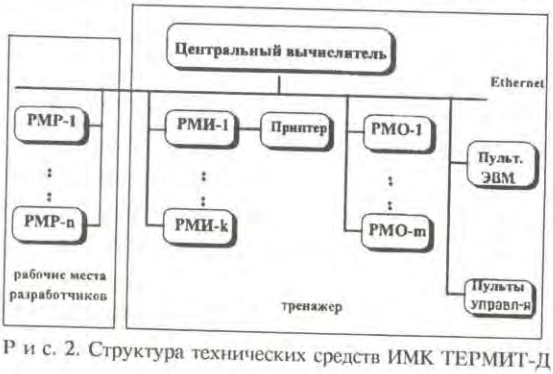
— специфика отечественного рынка, например, ориентация заказчиков на программно-аппаратную платформу Wintel (персональные компьютеры на процессорах фирмы Intel) и операционную систему Windows, культура выполнения проектной документации, сильно отличающаяся от западной;

— следствием применения зарубежных технологий будет деградация отечественных и снижение общей инженерной культуры в отрасли.

К настоящему времени в НИТИ разработана и находится в опытной эксплуатации первая версия инструментально- моделирующего комплекса (ИМК) ТЕРМИТ-Д. Комплекс предназначен для автоматизации разработки и сопровождения функционального и специального программного обеспечения тренажеров, имитаторов и моделирующих комплексов ядерных и тепловых энергетических установок. ТЕРМИТ-Д позволяет автоматизировать разработку и сопровождение моделей теплоэнергетического оборудования, включающего трубопроводные сети с водяным или газовым теплоносителем (трубопроводная арматура, насосы, баки, теплообменники и т.д.), электрические системы (трансформаторы, шины, приводы, выключатели, генераторы и т.д.), а также разработку и сопровождение моделей систем автоматического управления технологическим оборудованием энергетических установок. Расчетные схемы теплоэнергетического оборудования и функциональные схемы систем управления и регуляторов вводятся в ЭВМ непосредственно в графическом виде. Данные по оборудованию запоминаются в базе данных. Генерация и сборка компьютерной модели производятся комплексом автоматически. Пользователю предоставляется возможность интерактивного моделирования с визуализацией процесса решения — выводом в динамике физических величин и сигналов на расчетных и функциональных схемах, заданием управляющих воздействий, редактированием коэффициентов, параметров и уставок, фотографированием состояний задачи.



Р и с. 1. Структура программных средств ИМК ТЕРМИТ-Д: СМ — среда моделирования; БД — база данных; DIV — система отображения информации; ПРАГИС — пакет программ расчета теплогидравлических сетей; АКУЛА — пакет моделирования систем контроля и управления; САМСОН — пакет автоматической генерации программных модулей; SELEN — пакет программ расчета электрических сетей; ДЖИП — пакет расчета динамики в основных контурах теплообмена; нейтрон. кинетика — пакет программ расчета нейтронной кинетики; РМИ — рабочее место инструктора



Р и с. 2. Структура технических средств ИМК ТЕРМИТ-Д

На рис. 1 представлен состав программных средств ИМК ТЕРМИТ-Д. Программно-аппаратная конфигурация ИМК включает центральную ЭВМ (VAX, Alpha-station, Alpha-server), работающую под управлением ОС VMS или OPEN VMS, и произвольное количество ЭВМ типа IBM PC/AT с процессорами 486, 586, 686 под ОС DOS, Windows или UNIX, объединенных в локальную сеть средствами Ethernet. Для межмашинного обмена могут использоваться два различных сетевых монитора с протоколами DECNET или TCP-IP.

На рис. 2 представлена структура технических средств ИМК ТЕРМИТ-Д. Под аббревиатурами РМР, РМИ и РМО следует понимать ПЭВМ типа IBM PC/AT для рабочих мест разработчика тренажера, инструктора и оператора соответственно. Полное количество ПЭВМ определяется требованиями конкретного проекта. Например, для функционального тренажерно-моделирующего комплекса (ФТМК) реакторной установки (РУ) ПИК, создаваемого в настоящее время средствами ИМК ТЕРМИТ-Д, РМИ состоит из двух ПЭВМ (основной и вспомогательной), а РМО — из четырех. Количество рабочих мест разработчиков тренажера, выполненных на отдельных ПЭВМ, зависит от ко-

личества работающих по проекту разработчиков. Пультовая ЭВМ типа IBM PC/AT-486 под ОС DOS служит для обмена информацией между пультом управления и центральным вычислителем.

В правой части рис. 2 в большом прямоугольнике выделены технические средства, которые составляют собственно тренажер и передаются его заказчику. В левом прямоугольнике объединены рабочие места разработчиков тренажера, предназначенные для разработки и сопровождения функционального математического обеспечения тренажера и передаваемые заказчику по дополнительной договоренности.

На центральный вычислитель (ЦВ) ставятся следующие программные средства:

— программное обеспечение универсальной моделирующей оболочки;

— среда моделирования;

— библиотеки прикладных программ (ПРАГИС, АКУЛА, ДЖИП, SELEN, пакет программ расчета нейтронной кинетики).

На ЦВ проводится расчет комплексной математической модели установки (технологических систем) под управлением универсальной моделирующей оболочки.

На ПЭВМ РМР, работающей под ОС DOS (версии 6.0 и выше) и связанной с ЦВ сетью Ethernet (с сетевыми драйверами Pathworks и DECnet), ставятся следующие программные средства:

— программное обеспечение обмена информацией с задачей на ЦВ;

— программные средства среды подготовки задач, в том числе графические редакторы ввода данных для пакетов ПРАГИС, SELEN, АКУЛА, а также пакет программ автоматической генерации программных модулей САМСОН;

— программные средства среды интерактивного моделирования.

На РМР проводится подготовка задачи для расчета на ЦВ. Основными строительными блоками, из которых составляется задача, являются так называемые компоненты. Компоненты в ИМК ТЕРМИТ-Д первой версии могут быть следующих типов:

— теплогидравлическая сеть (ТГС);

— электрическая сеть (ЭС);

— функциональная схема (ФС);

— программный модуль, разработанный на языке высокого уровня (Fortran, C).

Задача может состоять из набора компонент или содержать другие задачи — подзадачи. Они сами могут как состоять из одних компонент, так и содержать другие подзадачи и т.д. Подготовка компонент ТГС и ФС происходит с помощью графических редакторов ИМК ТЕРМИТ-Д. Описание этих редакторов приводится ниже. Программа компьютерной модели объекта для задачи разработчика создается ИМК ТЕРМИТ-Д автоматически.

На ПЭВМ РМО, работающей под управление ОС UNIX в среде X- Window, ставятся программные средства графической системы DIV для разработки дисплейных форм отображения информации (мнемосхемы, графики и т.д.). На основную ПЭВМ РМИ, работающую под управление ОС UNIX в среде X-Window, ставятся программные средства рабочего места инструктора. Вспомогательные ПЭВМ РМИ предназначены для информационной поддержки инструктора и являются аналогами ПЭВМ РМО.

СРЕДСТВА РАЗРАБОТКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕНАЖЕРОВ

ПАКЕТ ПРОГРАММ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРУБОПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ ПРАГИС

Пакет программ расчета гидравлических сетей ПРАГИС предназначен для моделирования нестационарных процессов в ТГС произвольной топологии. Библиотека функциональных элементов ТГС пакета ПРАГИС включает: трубопровод; местное сопротивление; клапаны различного типа (дистанционного управления, ручной, об-

ратный, невозвратно-запорный, предохранительный, регулирующий, редукционный); редуктор; насос (центробежный, поршневой); эжектор; теплообменник (прямоточный, противоточный, смешанный); фильтр; датчики давления, температуры, расхода, уровня, концентрации и т.д.; бак со свободным уровнем, бак с газовой подушкой; компенсатор объема газовый; газовый баллон; естественные и аварийные течи.

Для всех типов оборудования предусмотрены стандартные аварийные вводные.

Программный комплекс основан на нестационарной модели с квадратичной зависимостью перепадов давлений от расходов и рассчитывает в динамике следующие параметры:

— расход по трубным ветвям;
— давление во внутренних узлах, баках и компенсаторах объема;
— температуру во внутренних узлах, баках и компенсаторах объема;
— концентрацию субстанций во внутренних узлах, баках и компенсаторах объема;
— оборот и напор насосов;
— тепловой поток в теплообменниках;
— коэффициенты местного гидравлического сопротивления трубопроводной арматуры;
— уровень дистиллята в баках и компенсаторах объема.

В математической модели, положенной в основу пакета ПРАГИС, учитываются следующие физические эффекты:

— потери давления на трение и на местных сопротивлениях;
— перепад давления из-за разности уровней;
— ускорение и замедление потоков;
— смена направления течения;
— изменения коэффициента местного гидравлического сопротивления клапанов при манипулировании ими;
— влияние на напоры насосов скорости их вращения, расхода и плотности теплоносителя;
— массовые потери при течах.

Основные ограничения математической модели: теплоноситель однофазный (вода, газ); изменение агрегатного состояния, теплоемкость конструкционных материалов, диссипация энергии и тепловой поток за счет теплопроводности не учитываются; в узлах гидравлической сети происходит мгновенное перемешивание температуры и концентрации; коэффициент сопротивления трения рассчитывается для автомодельной области с квадратичной зависимостью потерь давления от скорости течения.

Пакет позволяет моделировать широкий спектр эксплуатационных условий, включая открытие и закрытие клапанов, запуск и останов насосов, компрессоров, эжекторов и вентиляторов. В любом узле возможно задание источника или стока массы с произвольной температурой и концентрацией.

Для уменьшения эффекта «размазывания» решения задач переноса тепла и концентрации пользователь может разбивать ветки на контрольные объемы, в каждом из которых решается уравнение переноса тепла и концентрации. В тепловых объемах, на которые разбивается сеть, и в баках всех типов возможно задание внешнего теплового потока.

При конечно-разностном решении системы дифференциальных уравнений для определения расходов и давлений в пакете ПРАГИС используется специально разработанный двухшаговый алгоритм типа предиктор-корректор с линеаризацией уравнения движения. Данный алгоритм позволяет свести задачу к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) для поправок давления на временном шаге, коэффициенты которой зависят только от геометрических характеристик трубопроводов, а не от режимных параметров. Этот подход значительно увеличивает эффективность решения, так как позволяет избавиться от необходимости вычисления коэффициентов матрицы и обращения ее на каждом временном слое. СЛАУ один раз разлагается с

помощью метода LU-факторизации с учетом специальных свойств узловой матрицы коэффициентов (разреженность, симметричность и диагональное преобладание), а затем на каждом временном шаге для нахождения неизвестных поправок давления производится экономичное умножение треугольных матриц на вектор правых частей. Благодаря эффективности предложенного алгоритма и использованию методов для разреженных матриц с помощью пакета программ ПРАГИС можно рассчитывать теплогидравлические сети большой размерности (>1000 узлов) в реальном времени. Математическая модель и алгоритм расчета теплогидравлических сетей с однофазным несжимаемым теплоносителем, реализованные в программном комплексе ПРАГИС, представлены и апробированы в [2—4].

Использование пакета ПРАГИС в составе ИМК ТЕРМИТ-Д дает следующие преимущества:

— снижение времени разработки программ;

— отсутствие ошибок в программах;

— автоматическое документирование моделируемой топологии;

— простота внесения изменений в топологию;

— снижение квалификации разработчика, поскольку не требуется знаний в области математического моделирования.

ГРАФИЧЕСКИЙ РЕДАКТОР ДЛЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПАКЕТА ПРАГИС

Ввод данных для пакета программ ПРАГИС осуществляется с помощью объектно-ориентированного графического редактора ТГС.

Редактор ТГС позволяет вводить и редактировать в графическом виде расчетные схемы произвольных ТГС, состоящих из узлов и функциональных элементов (ФЭ), соединенных линиями, интерпретируемыми как трубопроводы. Набор ФЭ в редакторе ТГС определяется библиотекой программных модулей элементов оборудования ТГС, входящей в состав пакета ПРАГИС.

Редактор ТГС обладает возможностями, необходимыми для построения и модификации расчетных схем ТГС (расстановка узлов, проведение соединительных линий, расстановка функциональных элементов и их масштабирование, удаление узлов, линий, элементов, перемещение узлов и элементов с одновременным «подтягиванием» линий, деформация линий, блочные операции — копирование, перемещение, удаление выделенных областей и т.д.). Размер схем может быть произвольным и не ограничивается экраном дисплея (бесконечное поле). Имеются операции сдвига схемы в окне редактирования.

Ввод данных для ТГС осуществляется поэлементно путем указания соответствующих элементов. При этом разработчик вводит или выбирает из списка имена ФЭ оборудования и значения числовых параметров для этих элементов. Некоторые узлы или баки могут быть объявлены «граничными». Для них разработчик дополнительно указывает имена граничных схем, где рассчитываются эти узлы или баки. Кроме этого, возможно использование в качестве граничных тепло- и массообменных аппаратов, которые рассчитываются другими, отличными от модуля ТГС, модулями. Данные, вводимые с помощью графического редактора, поступают в базу данных комплекса.

Редактор ТГС осуществляет контроль правильности ввода схемы и данных согласно заложенным в него экспертным правилам, а также контроль полноты задания данных.

Редактор ТГС обладает средствами навигации и поиска и позволяет проводить следующие операции:

— переход в редактирование ТГС, связанной с данной по граничному баку или теплообменнику;

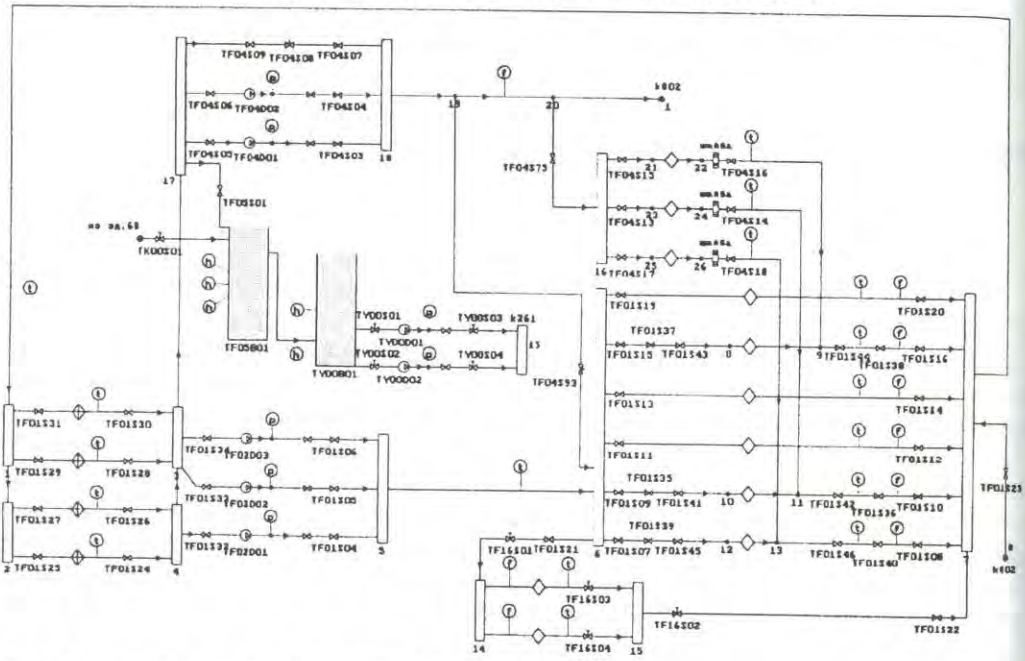
— переход в редактирование ФС, вырабатывающей сигналы на управление заданным клапаном, насосом или использующей сигналы о состоянии заданного клапана, насоса, сигналы показаний с датчиков и т.п.;

— поиск в ТГС элемента с заданным проектным именем и другие.

Результатом работы редактора ТГС является совокупность обновленных или вновь созданных информационных файлов и табличных данных в БД ИМК ТЕРМИТ-Д, необходимых для работы программ пакета ПРАГИС и информационной связи редактируемой ТГС с другими во время счета задачи.

Для каждой компоненты типа ТГС в режиме моделирования средствами ИМК ТЕРМИТ-Д формируется вызов подпрограммы PRAGIS расчета динамики ТГС, входящей в состав пакета ПРАГИС.

На рис. 3 представлен пример расчетной схемы ТГС (промконтур РУ ПИК), разработанной средствами графического редактора для пакета ПРАГИС.



Р и с. 3. Расчетная схема ТГС (промконтур РУ ПИК), разработанная средствами графического редактора для пакета ПРАГИС

ПРОГРАММА РАСЧЕТА ДИНАМИКИ В ОСНОВНЫХ КОНТУРАХ ТЕПЛООБМЕНА ДЖИП

Для расчета переходных и аварийных ситуаций в циркуляционных контурах ядерных реакторов с водяным теплоносителем в НИТИ разработан теплогидравлический код улучшенной оценки ДЖИП. Код также используется в составе комплексных программ тренажеров и анализаторов ЯЭУ для расчетов первых и вторых циркуляционных контуров.

Пакет программ ДЖИП имеет следующие характеристики:

— моделирование теплогидравлических процессов осуществляется на основе полностью неравновесной негомогенной модели в одномерном приближении (шесть уравнений сохранения массы, энергии и количества движения для жидкой и паровой фазы);

— численный алгоритм реализован по полунеявной схеме;

— пакет имеет модульную структуру, позволяющую рассчитывать ЯЭУ с относительно произвольными схемными решениями и составом оборудования;

— область применения пакета ограничивается анализом переходных и аварийных процессов в системах ЯЭУ с водо-водяными реакторами без учета деформации конструкций.

Пакет программ ДЖИП моделирует процессы в активной зоне реактора с чехловыми ТВС произвольной конструкции; в коммуникациях транспорта водяного теплоносителя в контурах теплообмена; в парогенераторах, теплообменниках, конденсаторах с произвольной схемой теплообмена между контурами; в компенсаторах давления (газовый, парогазовый, паровой); циркуляционных насосах (центробежных, струйных); сепараторах; турбинах (многоступенчатых); трубопроводной арматуре.

Пакет программ ДЖИП верифицирован на локальных и интегральных экспериментах. В настоящее время ведется работа по его модернизации для использования в системах реального времени. Увеличена степень неявности в конечно-разностной аппроксимации исходных уравнений сохранения с целью повышения допустимых шагов интегрирования по времени. Ведется работа по упрощению применяемой в пакете карты режимов двухфазного потока и замыкающих соотношений с целью уменьшения требуемых вычислительных ресурсов. Разрабатывается графический редактор для ввода данных по пакету программ ДЖИП для повышения сервисных возможностей ИМК ТЕРМИТ-Д.

КОМПЛЕКС ПРОГРАММ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Для моделирования нейтронно-физических процессов в активной зоне водо-водяных реакторов в НИТИ разработан комплекс программ нейтронно-физического расчета, входящий в состав ИМК ТЕРМИТ-Д. Область применения программного комплекса — расчетные исследования нестационарных процессов в активной зоне для любого момента кампании и моделирование процессов нейтронной кинетики в режиме реального времени для тренажерных комплексов.

Программный комплекс позволяет рассчитывать изменяющиеся во времени энерговыделение и концентрации короткоживущих поглощающих продуктов деления в активной зоне с учетом температуры топлива и конструкционных материалов; плотности замедлителя и отражателя нейтронов; выгорания топлива и выгорающего поглотителя; положения стержней управления и защиты реактора; концентрации борной кислоты в теплоносителе.

Комплекс имеет модульную структуру. В состав комплекса, помимо расчетных кодов, входят:

— библиотека микросечений и блок расчета многогрупповых констант САПФИР;

— блок свертки многогрупповых констант в малогрупповые;

— блок расчета ценности нейтронов и подготовки параметров кинетики;

— блок подготовки аппроксимационных зависимостей для тренажерной модели;

— блок, обеспечивающий интерфейс пользователя и обмен информацией между блоками.

В настоящее время проводится модернизация программ расчета нейтронной кинетики в малогрупповом диффузионном приближении конечно-разностным методом в трехмерной геометрии на гексагональной сетке для применения их в системах реального времени.

ПАКЕТ ПРОГРАММ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ SELEN

Для моделирования электрических систем питания оборудования атомных и тепловых электростанций разработана программа SELEN (simulation of electrical nets). Она предназначена для расчета динамических параметров электрических сетей переменного и постоянного тока с произвольной конфигурацией оборудования. Для расчета некоторых видов электрического оборудования программа SELEN использует внешние подпрограммы — модули; более простые устройства описываются самой программой на логическом или квазистатическом уровне.

На каждом временном шаге с учетом состояния выключателей и запорных устройств, расположенных на электрических линиях, определяются точки с общими параметрами — виртуальные шины, которые могут относиться к одному из трех уровней, отражающих конфигурацию реальных схем электропитания станций.

Уровень 1 может включать синхронные машины, асинхронные двигатели, входы выпрямителей, трансформаторы, а также энергосистемы, имитируемые как синхронные машины большой мощности. На этом уровне динамические параметры переменного тока — напряжение и частота — рассчитываются решением уравнений машин переменного тока, записанных в ортогональных $d-q$-координатах.

Уровень 2 (уровень постоянного тока) может включать выходы выпрямителей, входы инверторных преобразователей по постоянному току, аккумуляторные батареи, запорные устройства (диоды). На уровне 2 определяется среднее напряжение виртуальной шины с учетом напряжений (ЭДС) источников и проводимостей подключенных нагрузок.

На уровне 3 рассчитывается проводимость подключенных выходов инверторных преобразователей по переменному току. Напряжение виртуальной шины пропорционально напряжению на входе в инверторный преобразователь, частота полагается равной номинальной.

Активные статические нагрузки, электроприводы насосов и задвижек могут быть подключены к любому из уровней.

Исходную информацию программа SELEN получает из внешнего текстового файла заданной структуры, что позволяет изменять данные и конфигурацию моделируемой системы в режиме on-line. Язык Фортран, на котором разработана программа SELEN, и текстовой формат файла исходной информации обеспечивают полную переносимость программы на различные программно-аппаратные платформы.

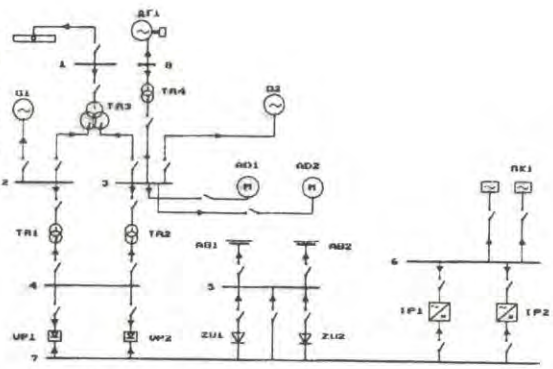
Программа SELEN может использоваться как самостоятельно, так и в составе технологии разработки тренажеров ТЕРМИТ-Д.

ГРАФИЧЕСКИЙ РЕДАКТОР ДЛЯ ПАКЕТА ПРОГРАММ SELEN

Ввод данных для пакета SELEN в ИМК ТЕРМИТ-Д осуществляется с помощью объектно-ориентированного графического редактора ЭС. Он позволяет вводить и редактировать в графическом виде расчетные схемы произвольных ЭС, состоящих из функциональных элементов, соединенных проводящими электрическими линиями. Набор функциональных элементов в редакторе ЭС определяется библиотекой программных модулей элементов оборудования ЭС, входящей в состав пакета SELEN, и состоит из следующих элементов:

— электрическая шина;
— электрическая линия;
— выключатель автоматический;
— выключатель ручной;
— запорное устройство (диод);
— синхронная машина (электрогенератор);
— дизель-генератор;
— асинхронный двигатель;
— привод клапана;
— статическая нагрузка;
— трансформатор с одной понижающей обмоткой;
— трансформатор с двумя понижающими обмотками;
— аккумуляторная батарея;
— инверторный преобразователь;
— выпрямитель;
— энергосистема;
— датчики напряжения, частоты.

Все функции редактора ЭС полностью аналогичны функциям редактора ТГС. На рис. 4 представлен пример расчетной схемы ЭС, разработанной средствами графического редактора для пакета SELEN.



Р и с. 4. Расчетная схема ЭС, разработанная средствами графического редактора для пакета SELEN

ПАКЕТ ПРОГРАММ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ АКУЛА

Пакет моделирования систем контроля и управления АКУЛА (алгоритмы контроля и управления, логика и автоматы) обеспечивает автоматизацию программной реализации алгоритмов дискретной автоматики и автоматических регуляторов, а также их отладки и исследования как в автономном режиме, так и совместно с моделью объекта. Пакет состоит из двух основных частей: библиотеки модулей для моделирования систем контроля и управления; интерпретатора программ контроля и управления.

Библиотека модулей содержит программные модули, реализующие типовые операции и блоки, обычно встречающиеся в алгоритмах дискретной автоматики и непрерывных регуляторах — триггеры, временные выдержки различного типа, модули, имитирующие работу элементов пультовой автоматики (кодонабиратели, синхроноскопы, цифровые табло, устройства контроля и т.п.), модули, реализующие стандартные алгоритмы управления насосами и арматурой, линейные и нелинейные звенья систем автоматического регулирования и другие.

Интерпретатор программ выполняет программы, автоматически сформированные в интегрированной среде на PMP. Он реализует логические и арифметические операции, вызовы модулей, пересылки сигналов и переменных, групповые операции, операции с битовой информацией состояния пульта и другие.

РЕДАКТОР ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Данный редактор предоставляет возможности по вводу и редактированию в графическом виде функциональных схем (ФС) дискретной автоматики и непрерывных автоматических регуляторов.

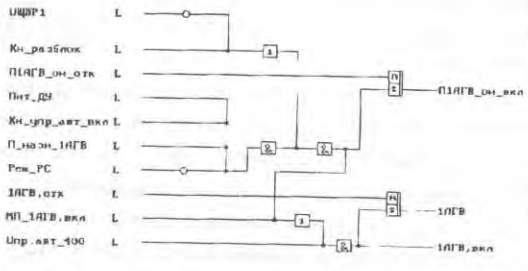
ФС представляет собой набор функциональных карт (ФК) и имеет общий для них заголовок, в котором разработчик указывает имя схемы, развернутое наименование и другие атрибуты схемы. Каждая ФК содержит некоторый отдельный фрагмент ФС, который представляет собой сеть, состоящую из графических элементов обработки информации и «ориентированных» линий передачи информации от выходов к входам элементов. Элементы обработки информации — это стандартные операции «и», «или», «не», «+», «—», «max», «min» и другие; специальные блоки обработки информации, например триггеры, временные выдержки различного типа, блоки управления клапанами, насосами, блоки интегрирования, блоки релейных характеристик, блоки различных звеньев автоматических регуляторов.

Имеются также особые элементы — входные и выходные сигналы. Они используются для информационных связей с другими компонентами типа ТГС, ФС, ЭС, с программными модулями, выполненными на языках программирования высокого уровня, а также для информационных связей между ФК. Все входные и выходные сигналы ФС делятся на сигналы непрерывных моделей; пультовые сигналы; сигналы аварийных вводных; промежуточные сигналы.

Для кодирования имен сигналов принят технологический принцип. Имя сигнала состоит из имени компоненты, имени ФЭ оборудования этой компоненты и кода сигнала из списка кодов сигналов ФЭ (списки, вообще говоря, разные для разных типов ФЭ). Имя компоненты из соображений экономии места на экране не выводится, но редактором запоминается. Имена сигналов могут использоваться не только для входов и выходов, но, как и фактические параметры, для элементов обработки информации.

Таблица имен сигналов строится автоматически. При этом используется БД комплекса и паспорта модулей, в которых содержится информация о типах ФЭ и кодах сигналов для каждого ФЭ. Эта информация заносится при регистрации модулей разработчиком модуля средствами конфигурирования базы данных ИМК ТЕРМИТ-Д.

Очень часто некоторые фрагменты алгоритмов автоматики повторяются, т.е. имеют одинаковый вид, отличаясь наборами имен входных и выходных сигналов. Это связано с повторением однотипных ФЭ в технологических системах, резервированием оборудования и т.п. В редакторе ФС имеется возможность для компактного представления каждого множества однотипных ФК одной, «обобщенной» ФК, которую мы назовем групповой. Групповые ФК имеют также групповые имена сигналов. Групповое имя — это имя списка сигналов.



Р и с. 5. ФС, разработанная средствами графического редактора функциональных схем систем контроля и управления

Для обработки групповых сигналов используются стандартные элементы «all» (все), «any» (хотя бы один из), «max», «min», «sum» (сумма), «prod» (произведение). На рис. 5. представлен пример ФС, разработанной средствами графического редактора функциональных схем систем контроля и управления.

ПАКЕТ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ ПРОГРАММНЫХ МОДУЛЕЙ САМСОН

Данный пакет предназначен для быстрого и качественного создания новых программных модулей невысокой и средней сложности. К таким модулям можно отнести модули расчета процессов, устройств и аппаратов, не требующие сложной численной реализации, модули блоков и звеньев регуляторов, модули пультовой автоматики и другие. Как показывает практика, необходимость в новых модулях неизбежно возникает, поскольку универсальная, пригодная на все случаи жизни библиотека модулей вряд ли может быть создана.

Исходными спецификациями для пакета САМСОН служат математические описания моделируемых объектов в виде обыкновенных дифференциальных, алгебраических, логических уравнений и автоматов, представленные на входном языке МИФ.

САМСОН проверяет математическое описание на корректность и полноту путем анализа топологической структуры графа системы уравнений, проводит при необходимости аналитические выкладки и преобразование системы уравнений к каноническому виду. Результатом работы пакета является текст сгенерированного модуля на языке Фортран-77. Сгенерированные модули отвечают требованию реентерабельности и не нуждаются в отладке.

Полученные модули можно оперативно опробовать и отладить их математическое описание, используя интерактивные графические средства, позволяющие в наглядной форме прослеживать процесс моделирования в виде динамических таблиц, графиков, мнемосхем и т.д., редактировать данные и управлять ходом решения задачи.

СРЕДСТВА РАЗРАБОТКИ СПЕЦИАЛЬНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕНАЖЕРОВ

СРЕДА МОДЕЛИРОВАНИЯ И СОПРОВОЖДЕНИЯ ИМК ТЕРМИТ-Д

Среда моделирования и сопровождения является частью системного наполнения ИМК ТЕРМИТ-Д. В ее состав входят:

— системная оболочка моделирующего комплекса;

— интегрированная среда разработки задач и интерактивного моделирования на РМР;

— среда моделирования на ЦВ;

— средства связи с пультом управления;

— графический редактор подготовки видеокадров и дисплейных пультов управления;

— средства разработки графических элементов функциональных схем;

— средства документирования проекта;

— средства экспорта/импорта моделей.

Системная оболочка моделирующего комплекса. Это комплекс системных программ, выполняющих ряд функций по организации вычислительного процесса в реальном масштабе времени, одновременному обмену абонентов РМР, РМИ, РМО, пультовой ЭВМ с задачей на ЦВ.

Интегрированная среда разработки задач и интерактивного моделирования. Обеспечивает выполнение функций ИМК по автоматизации разработки компьютерных моделей с использованием графического ввода расчетных и функциональных схем, интерактивной отладки моделей с визуализацией процесса решения и возможностью управления моделируемым оборудованием в графическом виде на расчетных схемах, изменения параметров элементов расчетных и функциональных схем.

Программы данного раздела составляют сердцевину системного наполнения ИМК ТЕРМИТ-Д и включают программы работы с базой данных ИМК, графические редакторы пакетов автоматизации моделирования, программы формирования данных и исполняемых файлов, программы взаимодействия с пользователем и обслуживания меню интегрированной среды, программы обмена с центральным вычислителем, программы отображения в динамике расчетных схем, видеокадров, дисплейных пультов управления.

Среда моделирования на ЦВ. Включает диспетчер-монитор связи с РМР и РМИ, загрузчик-сборщик модели, интерпретатор модели, программы доступа к сигналам, программы фотографирования, регистрации, протоколирования.

Диспетчер-монитор связи с РМР, РМИ по поступающим с них командам осуществляет вызов программ, реализующих эти команды. Это команды загрузки модели, пуска в автоматическом и шаговом режиме, останова, рестарта, смены набора имен сигналов для текущего кадра, записи/чтения фотографий, изменения текущего шага, масштаба времени и другие. Он также обновляет буфера значений сигналов для обмена информацией с активными РМР, осуществляет обработку прерываний в исключительных ситуациях (деление на нуль, переполнение и т.п.), выполняет некоторые служебные функции. Во время работы ИМК необходимость в компиляции и линковании программ отсутствует.

Загрузчик-сборщик модели переводит программу модели, сформированную на некотором промежуточном языке программирования, во внутренний формат для интерпретатора, формирует коды команд и адреса сигналов, распределяет память для сигналов, осуществляет перекрестные информационные связи между отдельными компонентами модели, формирует таблицы распределения памяти для сигналов.

Интерпретатор модели осуществляет вызовы головных программ пакетов ПРАГИС, SELEN, АКУЛА, внешних программных модулей с COMMON-блоками для соответствующих компонент модели, обеспечивает обмен информационными сигналами между компонентами модели на шаге счета.

Программы доступа к сигналам осуществляют быстрый поиск адресов сигналов по их именам, запись и чтение значений сигналов в соответствующие программные массивы.

Программы фотографирования проводят запись и считывание фотографий. Информация записывается во внешнюю память вместе с именами сигналов, поэтому при редактировании расчетных схем старые фотографии не пропадают и могут быть использованы. При считывании фотографии в режиме обучения проводится автоматическое сравнение считанного состояния органов управления пульта с текущим состоянием и выдача информации о приведении органов управления в нужные состояния. Программы регистрации записывают во внешнюю память значения сигналов по заданному списку, а программы протоколирования выполняют функции по протоколированию действий обучаемых и инструктора.

Средства связи с пультом управления. Включают программу связи с пультом управления и программу его тестирования. Программа связи с пультом управления периодически с заданным шагом по времени осуществляет обмен информацией с пультом управления и ЦВ. Исходной информацией для программы служит таблица адресов сигналов органов индикации и управления пульта.

Графический редактор подготовки видеокадров и дисплейных пультов управления. Служит для создания дисплейных информационных моделей в целях облегчения и упрощения процесса отладки тренажерной модели. Позволяет размещать на экране статические и динамические элементы и осуществлять привязку к сигналам модели для динамических элементов отображения и управления. Набор динамических элементов редактора включает таблицы, гистограммы, графики, динамические мнемознаки, кнопки, переключатели и т.д. Привязка элементов к сигналам модели осуществляется пользователем путем выбора имен сигналов из списка имен сигналов модели.

Средства разработки графических элементов функциональных схем. Предназначены для того, чтобы пользователь ИМК без помощи разработчиков мог создавать новые элементы функциональных схем и включать их в библиотеку проекта. При создании нового элемента пользователь определяет графическое изображение элемента и его размеры, размещает на изображении элемента входы-выходы, определяет их свойства, задает состав и наименования параметров элемента, имя программного модуля, реализующего данный элемент, указывает соответствие графических входов-выходов и параметров элемента с формальными параметрами программного модуля, определяет способ засветки элемента или его отдельных частей в динамике в зависимости от значений входов-выходов, помещает наименование элемента в соответствующее место меню элементов графического редактора функциональных схем.

Средства документирования проекта. Служат для получения документации по проекту в целом или отдельным его частям. В качестве документов могут быть выданы расчетные и функциональные схемы в графическом виде с сопроводительной стандартной информацией, состав оборудования и значения параметров оборудования в табличном виде, структура модели, списки имен сигналов с указанием свойств (hardware-адреса для пультовых сигналов, привязка к COMMON-блокам для внешних модулей) и другая информация.

Документация по проекту в целом достаточно полно характеризует проект и служит для целей его сопровождения.

Средства экспорта/импорта моделей. Предназначены для переноса различных компонент разрабатываемых моделей с одних РМР на другие (в данной реализации ИМК база данных проекта может быть распределена по нескольким РМР).

ГРАФИЧЕСКАЯ СИСТЕМА DIV

Система DIV предназначена для разработки пользовательских интерфейсов в системах сбора и регистрации данных, тренажерах, моделирующих комплексах и САПР с целью представления в удобном для восприятия виде больших объемов динамически изменяющейся информации. Графическая система обеспечивает возможность интерактивного управления процессом отображения и передачу управляющих воздействий источнику информации.

Контроль состояния объекта осуществляется с помощью набора мнемосхем, элементы которых могут изменять цвет или форму в соответствии с заданной логикой отображения. Кроме того, динамическая информация может быть представлена в виде таблиц числовых значений, графиков, гистограмм или текстовых сообщений.

Для управления процессом отображения и передачи управляющих воздействий источнику информации используются система меню, панели управления или графические изображения пультов управления моделируемых систем. Управление возможно как с клавиатуры, так и с использованием устройства «мышь».

В составе системы DIV имеется полный набор редакторов и графических средств, позволяющих создавать многооконный многофункциональный графический интерфейс пользователя. Для построения элементов изображения разработан специальный векторный графический формат, позволяющий создавать объекты с динамически изменяемыми графическими характеристиками (размер, цвет, форма). Зависимость графических характеристик от динамических данных устанавливается с помощью средств описания логики отображения.

Для получения данных разработан специальный механизм сетевых функций доступа, обеспечивающий подключение системы отображения к источнику информации в режиме клиент—сервер. При необходимости предварительной обработки полученных данных можно подключать пользовательские функциональные программы с помощью механизма динамически подгружаемых библиотек.

Графическая система DIV работает в среде OSF/Motif, X-Window (UNIX) или DECWindow (VAX/VMS).

РАБОЧЕЕ МЕСТО ИНСТРУКТОРА

Для руководства тренажерным обучением в НИТИ разработано стандартное рабочее место инструктора, программные средства которого можно использовать как основу создания РМИ для конкретных тренажерных проектов.

Техническое обеспечение РМИ в зависимости от требований технического задания на тренажерный комплекс и сложности моделируемого объекта может изменяться по количеству и качеству применяемой техники. В минимальном объеме это одна ПЭВМ типа PC/AT или рабочая станция на RISC-процессоре, на которой реализован основной набор функций для работы инструктора обучения. В добавление к основной ЭВМ для расширения возможностей по отображению информации, интерактивному управлению моделированием и осуществлению дополнительных сервисных функций (например, реализация удаленных функций) возможно включение в состав РМИ еще нескольких PC/AT или рабочих станций, связанных по сети с центральным вычислителем тренажера и обменивающихся с ним данными и командами. В состав РМИ могут входить также принтеры и плоттер для выдачи зарегистрированной и запротоколированной информации в текстовом и графическом виде.

РМИ является составной частью тренажерных комплексов. Оно предназначено для обеспечения эффективного выполнения задач инструктора в процессе обучения оперативного персонала на тренажере. Данная цель достигается с помощью развитого сервисного программного обеспечения, реализованного на основе языка Си в графической среде X-Window и располагаемого на технических средствах РМИ.

Используя средства РМИ, инструктор имеет возможность:

— загружать и осуществлять управление тренажером;

— загружать комплексную математическую модель (КММ) установки;

— замораживать, ускорять и замедлять работу КММ;

— вводить неисправности;

— осуществлять управление КММ с помощью управляющих органов, недоступных на установке непосредственно из помещения ПНУ (удаленные функции);

— изменять начальные состояния тренажера;

— наблюдать реакцию модели установки на управляющие действия обучаемого;

— регистрировать действия инструктора и обучаемого;

— регистрировать ход изменения параметров модели установки.

При обучении персонала на тренажере инструктор с помощью средств РМИ может подготовить и провести занятия в соответствии с заданной темой, проанализировать и оценить действия персонала.

При работе в режиме подготовки занятия РМИ может быть не связано с КММ, расположенной на центральном вычислителе тренажера. На этом этапе инструктор имеет возможность разработать:

— сценарии аварийных вводных из имеющегося перечня аварийных вводных;

— наборы регистрируемых параметров;

— шаблоны параметрических графиков;

— перечни и значения уставок для контроля инструктора за важнейшими параметрами модели. По этим уставкам проводится сигнализация или промежуточные остановы КММ во время работы тренажера.

При проведении занятия, когда РМИ работает совместно с КММ, инструктор, кроме всех функций, доступных ему на этапе подготовки занятия, может управлять тренажером. В ходе обучения оперативного персонала на тренажере инструктор посредством введения неисправностей или имитацией управления удаленным от помещения щита оператора оборудованием по голосовым командам оператора может активно влиять на характер имитируемых КММ процессов. При этом инструктор имеет возможность контролировать изменения режимных параметров с помощью развитых графических средств представления информации: мнемосхем, таблиц, гистограмм, графиков.

В режиме разбора занятия инструктор может осуществлять так называемую постобработку зарегистрированной во время занятия информации. Информация, доступная для постобработки, включает:

— совокупность промежуточных состояний модели (фотографий), автоматически записанных через заданные инструктором временные интервалы;

— протокол действий инструктора и оператора в течение занятия;

— значения всей совокупности контролируемых параметров, записанных с временным шагом, равным шагу обмена (0,1—0,2 с), при ограниченном времени регистрации (5—10 мин);

— значения определенного инструктором перечня контролируемых параметров (не более 200) с заданным шагом записи без ограничения времени регистрации.

В режиме постобработки зарегистрированной информации инструктор имеет возможность просмотра состояний модели посредством выбора в произвольной последовательности из списка автоматически записанных фотографий; автоматического повтора проведенного занятия путем последовательного ввода всех инструкций из зарегистрированного протокола в КММ; построения графиков зарегистрированных параметров.

Использование РМИ не ограничивается рамками подготовки персонала. В сочетании с рабочим местом оператора оно служит средством управления мощным исследовательским комплексом, на котором можно апробировать принятые технические решения по компоновке и параметрам оборудования технологических систем, отрабатывать алгоритмы управления установкой и т.п. Для этих целей предусмотрены следующие функции РМИ:

— редактирование величин проектных уставок срабатывания блокировок, предупредительной и аварийной сигнализации;

— проведение расчетов в ускоренном режиме с максимальной загрузкой процессора, что особенно важно при многовариантных расчетах;

— регистрация всех контролируемых параметров для выдачи на графики в любом сочетании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлены программные средства ИМК ТЕРМИТ-Д. Это первый опыт создания интегрированной среды разработчика программных средств для тренажеров в НИТИ. Первая версия ИМК создавалась с учетом его использования при работе над проектом ФТМК РУ ПИК и позволила с высокой степенью автоматизации разработать данный функциональный тренажер.

В настоящее время в НИТИ ведутся работы по расширению возможностей ИМК ТЕРМИТ-Д по следующим направлениям:

— модернизация программного комплекса для трехмерного моделирования нестационарных нейтронно-физических процессов в активной зоне для применения в системах реального времени;

— модернизация пакета программ ДЖИП для использования в системах реального времени;

— разработка графического редактора для повышения сервисных возможностей при вводе данных для пакета программ ДЖИП;

— разработка ряда программных модулей для моделирования работы отдельных элементов оборудования ЯЭУ, связанных с пакетом программ ДЖИП (парогенератор, конденсатор, барботер и т.д.), для повышения эффективности использования программного комплекса ДЖИП системах реального времени;

— перевод объектно-ориентированных графических редакторов для пакетов программ функционального математического обеспечения и среды моделирования из операционной системы DOS в среду X-Window (DEC-Window);

— разработка программных средств для применения в составе ИМК ТЕРМИТ-Д профессиональной СУБД высокого класса (Oracle).

Реализация этих задач позволит получить достаточно полную технологию создания тренажеров для объектов атомной промышленности. Важно подчеркнуть, что все фирмы из числа мировых лидеров в данной области при создании технологий в той или иной степени используют чужие разработки (графические редакторы, пакеты программ моделирования теплогидравлических или нейтронно-физических процессов и т.д.). В нашем случае все разработки собственные, кроме операционных систем, трансляторов с языков высокого уровня и стандартного сетевого программного обеспечения.

В НИТИ выполняются работы, связанные с созданием головного блока реактора АЭС нового поколения ВВЭР-640. Обладание технологией создания тренажеров позволит эффективно и качественно разработать многоцелевой функциональный тренажерно-моделирующий комплекс с полномасштабной математической моделью для энергоблока нового поколения и существенно расширить возможности его исследования по вопросам безопасности эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Колесников А.И. и др.** Опыт НИТИ в создании тренажеров для ЯЭУ: Докл. на семинаре секции динамики (Гатчина, 1990).
2. **Лялюев Д.В., Шаленинов А.А.** Интегрированный программный пакет ПРАГИС для моделирования нестационарных процессов в гидравлических сетях сложной топологии: Докл. на 4-й Ежегодной конф. Российского ядерного общества (Нижний Новгород, 1993).

3. Лялюев Д.В. Опыт разработки функционального математического обеспечения полномасштабного тренажера на основе гидравлического пакета ПРАГИС: Докл. на семинаре секции динамики (Сосновый Бор, 1994).
4. Лялюев Д.В. и др. Расчетно-моделирующий комплекс реакторной установки ПИК. — В кн.: Аннотации докл. семинара секции динамики (Гатчина, 1995).

Статья поступила в редакцию 22 января 1999 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Физика ядерных реакторов, 1999, вып. 2, с. 130—146.

УДК 621.039

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС CLASS СОЗДАНИЯ СИСТЕМ ПРЕДТРЕНАЖЕРНОЙ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛА ЭНЕРГОБЛОКОВ

А.В. Фокин, Д.В. Гаврилов, А.О. Масанов, А.Д. Зенков, М.Ю. Липов, С.Д. Малкин, И.Д. Ракитин, Д.И. Янушевич,
РНЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Курчатова, 1

Рассмотрен разработанный в РНЦ «Курчатовский институт» на базе технологии АИС-95 (автоматизированная интерактивная система) программный комплекс CLASS, предназначенный для создания систем теоретической предтренажерной подготовки оперативного персонала атомных и тепловых энергоблоков.

SOFTWARE CLASS TO DEVELOPE SYSTEMS FOR PRE-SIMULATOR TRAINING OF POWER PLANT'S OPERATIVE PERSONNEL. A. FOKIN, D. GAVRILOV, A. MASANOV, A. ZENKOV, M. LIPOV, S. MALKIN, I. RAKITIN, D. YANUSHEVICH. Software CLASS that was developed under AIS-95 (Automatic Interactive System) technology in RCC «Kurchatov Institute» is proposed. Software CLASS may be used to create pre-simulator training systems for operative personnel of nuclear and fossil power plants.

Учитывая плотный график и высокую загруженность учебно-тренировочных центров (УТЦ) и входящих в их состав тренажерных комплексов атомных и тепловых энергоблоков, необходимо предъявлять повышенные требования к уровню предварительной теоретической подготовки оперативного персонала, проходящего обучение в этих центрах.

Разработанный в РНЦ «Курчатовский институт» на базе технологи АИС-95* программный продукт CLASS предназначен для создания компьютерных классов, именуемых в дальнейшем CLASS_ROOM, самостоятельного предтренажерного обучения и тестирования оперативного персонала энергоблоков.

Назначение и структура программного продукта. Программные средства CLASS являются полностью интегрированным программным продуктом в среде Windows NT, который поддерживает разработку, сопровождение и тестирование полной системы обучения CLASS_ROOM. Эта система представляет собой компьютерный класс с современной архитектурой аппаратных средств клиент—сервер.

На компьютере-сервере установлено программное обеспечение рабочего места инструктора класса, который определяет режимы обучения и объем информации для каждого обучаемого (клиента). Инструктор со своего рабочего места может непосредственно наблюдать за действиями любого обучаемого.

Система CLASS_ROOM поддерживает до 20 рабочих мест обучаемых (клиентских станций) и обеспечивает следующие режимы обучения:

*Яковлев К.Г., Малкин С.Д и др. Автоматизированная интерактивная система создания математических моделей для тренажеров и анализаторов. — В кн.: Тез. лекций и докладов школы-семинара секции динамики «Интегрированные математические модели и программные комплексы в ядерной энергетике». — М.: МИФИ, 1998, с. 327—330.

— самостоятельное обучение и тестирование в отсутствие инструктора с использованием сценариев тренировочных занятий в однокомпьютерной моде функционирования системы;

— комплексные тренировки группы обучаемых в присутствии инструктора при работе системы в многокомпьютерном варианте с инструкторской станцией.

В обоих случаях при организации занятий в рамках единой платформы допускается параллельно и одновременно использовать следующие формы представления информации и взаимодействия с обучаемым:

— текстовую — при вопросах системы к обучаемому с выдачей подсказок, пояснений и т.п.;

— форму статических, графических кадров (чертежей, схем, технологических диаграмм, фотографий) для иллюстрации преподаваемого материала;

— форму анимационного отображения состояния оборудования, представленного на технологических диаграммах;

— видеосопровождения занятий.

При этом весь представленный в обучающей системе объем информации, как текстовой, так и графической (чертежи, рисунки, фотографии), хранится в одном файле базы данных формата Microsoft Access.

CLASS представляет собой среду моделирования (СМ) АИС-95, дополненную инструментарием (Tools) для создания пакетов CLASS_ROOM обучения. При этом среда моделирования АИС-95 отвечает за представление данных пакетов и реализацию функций инструктора, а инструментарий позволяет быстро и эффективно составлять сами пакеты обучения. Составными частями таких пакетов могут быть модели технологических систем, экспертная и обучающая системы. Средства среды моделирования АИС-95 обеспечивают связь этих систем в единое целое и взаимодействие между ними.

Поддерживаемые АИС-95 интегрированные графические инструменты разработчика моделей и библиотеки каждого инструмента содержат набор пиктограмм, используемых при создании симуляционных диаграмм. Для построения составных частей пакетов обучения CLASS_ROOM система CLASS включает:

— инструментарий для разработки моделей технологических систем (логических, электрических, теплогидравлических и т.д.);

— инструментарий для разработки экспертных и обучающих систем;

— развитые библиотеки динамических объектов, обеспечивающие графическое представление информации.

В результате пользователь CLASS имеет в распоряжении графические средства, позволяющие создавать модели объектов и систем без необходимости программирования, составлять сценарии обучения и проигрывать их в реальном времени, а также получать текстовую, графическую и другую информацию о текущем состоянии моделей и действиях обучаемого.

Среди основных свойств инструментария необходимо выделить:

— объектно-ориентированный подход;

— отсутствие необходимости навыков в программировании для создания моделей (используется лишь известное свойство продуктов Microsoft «click and drop»); при этом пиктограмма может представлять технологический канал, насос, клапан, бак, выключатель, элемент управления либо элемент для создания сценария обучения;

— возможность использования и взаимной увязки на любой симуляционной диаграмме пиктограмм различных инструментов;

— возможность присваивания пользователем уникального имени пиктограмме при ее установке на диаграмме;

— предоставление каждой пиктограммой пользователю набора своих переменных, значения которых тот может отображать на экране как в цифровой форме, так и в виде таблиц и графиков;

— возможность привязки к пиктограмме анимации в различных формах (плавающие гистограммы, вращение, изменение цвета и др.);

— возможность располагать (для удобства пользователя) одинаковые пиктограммы с одним и тем же именем на различных диаграммах для того, чтобы иметь несколько путей доступа к одному объекту;

— возможность создавать макропиктограммы (при связи между собой пиктограмм) и в дальнейшем использовать их так же, как простые пиктограммы;

— поддержку каждого инструмента исполняемым модулем, работающим в реальном времени и применимым к любой диаграмме, разработанной с помощью данного инструмента.

Требования, предъявляемые к аппаратному и программному обеспечению. Для инсталляции и использования программного продукта CLASS необходим совместимый с IBM типа 80486 и выше компьютер с операционной системой Windows-NT 4.0, имеющий минимум 32 Мбайт оперативной памяти. Для хранения информации необходима установка MS Access 2.0 и выше.

Опыт использования и перспективы развития. Новый программный продукт испытан при подготовке прототипа системы CLASS_ROOM для ТЭЦ с парогазовой установкой ПГУ-325 по заказу АО «ГВЦ энергетики» РАО «ЕЭС России».

В настоящее время CLASS используется для создания системы предтренажерного обучения для УТЦ ЛАЭС.

Статья поступила в редакцию 25 февраля 1999 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Физика ядерных реакторов, 1999, вып. 2, с. 146—148.

СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО АТТЕСТАЦИИ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ОБОСНОВАНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

О.М. Ковалевич, И.Р. Уголева, А.И. Попыкин, В.С. Рубцов,
НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России,
С.М. Зарицкий, РНЦ «Курчатовский институт»,
123182, Москва, пл. Курчатова, 1

ВВЕДЕНИЕ

Обоснование безопасности объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) в настоящее время немыслимо без применения широкого спектра программных средств (ПС). От результатов, полученных с помощью как отечественных, так и зарубежных ПС, в значительной степени зависит принятие решений Госатомнадзором России. Естественно, возникает вопрос, насколько можно доверять этим результатам. Для повышения обоснованности данных, представляемых в Госатомнадзор России, с 1991 г. введена аттестация ПС, реализация которой возложена на Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности (НТЦ ЯРБ).

Российский опыт аттестации ПС в лицензионном процессе уникален. Аналогичная процедура существует лишь в Чехии, где уже проведена экспертиза ряда чешских ПС. В странах же Западной Европы и США имеются только требования к верификации кодов, например такие, как разработанные МАГАТЭ для PWR матрицы верификации теплогидравлических интегральных (best estimate) кодов RELAP, ATHLET, CATHARE и т.д. (матрицы CSNI).

Специалисты НТЦ ЯРБ неоднократно представляли результаты работы по аттестации ПС на российских и международных конференциях, семинарах и совещаниях. В настоящее время в рамках международного сотрудничества предоставлен в регулирующие органы Финляндии, Болгарии и Украины по их просьбе комплект документов Госатомнадзора России, регламентирующих процедуру аттестации ПС.

Восьмилетний срок работы по аттестации ПС позволил накопить значительный опыт, выявить недостатки и проблемы, которые надо еще решать.

ЗАЧЕМ НУЖНА АТТЕСТАЦИЯ ПС И КАКОВЫ ЕЕ КРИТЕРИИ

Нередко задается вопрос, зачем нужна столь сложная процедура аттестации. Не проще ли оценку корректности обоснования безопасности целиком поручить экспертам, выдающим заключение на предоставленные материалы, где есть ссылки на используемые ПС?

Процедура аттестации обеспечивает наиболее объективную и полную оценку ПС, а также выявляет недостаточность их научных обоснований. Во-первых, процесс обсуждения ПС открытый и широкий, с привлечением всех заинтересованных специалистов, во-вторых, многоступенчатый (рассмотрение ПС независимыми экспертами, секциями Совета и непосредственно Советом по аттестации ПС), что не позволяет или затрудняет организовывать какие-либо односторонние решения в интересах отдельных лиц или организаций. В-третьих, аттестация ПС заканчивается выдачей юридического документа государственного органа, а не решением организации типа НТС.

Сложнее обстоит дело с критериями, необходимыми для признания достаточности верификации и для последующей аттестации ПС. Первоначально ориентация была на три критерия:

— сравнение с возможными аналитическими решениями;

— проверка на экспериментальных стендах (мелко-, средне- и крупномасштабных) и реальных установках;

— сравнение с расчетами по другим апробированным кодам (отечественным и зарубежным).

Однако встречаются ситуации, когда невозможно использовать ни один из этих критериев. И не только потому, например, что необходимые эксперименты нельзя поставить из-за отсутствия средств, времени или других причин. Существуют положения, когда в принципе невозможно проверить экспериментально в достаточно интегральном виде расчет того или иного эффекта, а надо использовать проверку отдельных элементов и прибегнуть к методу экспертной оценки при аттестации всего ПС.

ПРОЦЕДУРА АТТЕСТАЦИИ ПС

Вопрос о необходимости всесторонней экспертизы ПС, используемых при обосновании безопасности ОИАЭ, встал в середине 80-х годов в связи с тенденцией перехода Госатомнадзора от надзора и контроля к регулированию и лицензированию. В Правилах ядерной безопасности реакторных установок атомных станций ПБЯ РУ АС—89 впервые введено требование аттестации ПС, а в 1991 г. разработана и введена в действие ее процедура.

На основании трехлетнего опыта аттестации НТЦ ЯРБ разработал «Положение об аттестации ПС, используемых при обосновании или обеспечении безопасности ядерно- и/или радиационно опасных объектов и производств» (РД-03-17—94), утверж-

денное приказом Госатомнадзора № 82 от 1 июля 1994 г. и регламентирующее процедурные вопросы аттестации.

Во главе системы аттестации стоит Совет по аттестации ПС (далее Совет), состоящий из представителей заинтересованных организаций. Совет возглавляет заместитель директора НТЦ ЯРБ и ученый секретарь Совета. В Совете было организовано девять секций, куда заинтересованные организации направляли своих специалистов:

— № 1 «Нейтронно-физические расчеты»;
— № 2 «Теплогидравлические расчеты»;
— № 3 «Радиационная безопасность»;
— № 4 «Расчет деформаций, механика конструкций, инженерные расчеты конструкций»;
— № 5 «Вероятностный анализ безопасности» (ВАБ);
— № 6 «Экспериментальное обоснование аттестации ПС по всем направлениям»;
— № 7 «Контроль и управление технологическими процессами»;
— № 8 «Материалы. Обработка результатов измерений и расчет физических и механических свойств материалов, моделирование радиационных повреждений»;
— № 9 «Расчеты строительных конструкций, оборудования и трубопроводов на внешние воздействия».

В настоящее время решено сформировать еще одну секцию, по направлению «Моделирование физико-химических процессов на предприятиях ядерного топливного цикла».

Руководителями секций избраны высококвалифицированные эксперты. Для поддержки организационной работы в состав каждой из них введены кураторы — специалисты НТЦ ЯРБ.

Объектами аттестации являются ПС для обоснования проектов, технических решений, параметров, режимов, влияющих на безопасность ОИАЭ. Аттестации подлежат российские и зарубежные ПС, как вновь созданные, так и давно используемые.

Работа происходит по следующей схеме (см. рисунок). Заявитель направляет в НТЦ ЯРБ заявку с необходимым комплектом документов (акт о сдаче ПС на депонирование в Центр по организации экспертизы ПС (ЦЭП), верификационный отчет, проект аттестационного паспорта и др.). После проверки комплектности они передаются в соответствующую секцию. Она подтверждает достаточность материалов и назначает независимых экспертов. После подготовки экспертами заключений ПС рассматривается на секции, иногда неоднократно (как правило, если секция рекомендует заявителю представить дополнительные обосновывающие материалы). В заключении секции обязательно отражаются отрицательные мнения экспертов и членов секции, если таковые имеются. Когда секция принимает решение рекомендовать ПС к аттестации, материалы экспертизы и верификационный отчет направляются в Совет. За месяц до рассмотрения на Совете протокол заседания секции и проект аттестационного паспорта направляются членам Совета. Совет рассматривает ПС и выносит решение: одобрить, внести уточнения в паспорт, назначить дополнительных независимых экспертов, отправить на доработку в секцию и т.п.



Процедура аттестации ПС

Основным документом, представляемым заявителем, является отчет о верификации ПС. Он должен разрабатываться заявителем и содержать основные сведения о верификации программы, анализе математических моделей, результатах тестирования, а также метрологические данные, данные о встроенном диагностическом контроле и т.д., которые определены РД-03-17—94.

Помимо общих каждая секция может ставить собственные требования к отчету о верификации. Утверждены и введены в действие разработанные НТЦ ЯРБ «Требования к составу и содержанию отчета о верификации и обосновании программных средств, используемых для теплогидравлических расчетов» (РД-03-34—95).

Результаты работы по аттестации ПС представляются в ежегодных отчетах НТЦ ЯРБ о работе Совета и его секций.

СОСТОЯНИЕ РАБОТ

В настоящее время в большинстве сформированных секций активно проводится работа по экспертизе ПС (см. таблицу).

Номер секции	Направление	Организация-заявитель	Количество аттестованных ПС
1	Нейтронная физика	РНЦ КИ	20
		ВНИИАЭС	18
		НИТИ	8
		ПО «Маяк»	2
		ГНЦ РФ ФЭИ	1
		ОКБМ	1
2	Теплогидравлика	ОКБМ	7
		НИТИ	2
		ГНЦ РФ ФЭИ	2
		ВНИПИЭТ	1
		НИКТБ ГП МЭП	1
		СПбАЭП	1
		ВТИ	1
		ГНЦ РФ ФЭИ	1
1 и 2 совместно		АЭП	1
		Курская АЭС	1
		ОКБ «Гидропресс»	3
3	Радиационная безопасность	РНЦ КИ	1
4	Прочность оборудования	ДАО СКБ	6
		ОКБМ	5
		РНЦ КИ	6
		ВНИИНМ	3
		ГНЦ РФ ФЭИ	2
		ИМАШ	1
		НИКИЭТ	1
		ИЦАМАЭ	1
		ВНП БПЭ	1
9	Прочность строительных конструкций	НИКИЭТ	2
		НИЦ «Стадио»	1
		АЭП	9
		ВНИИЭФ	1
		ОАО ВНИИГ	1

Первые ПС прошли экспертизу в секции № 1 и были аттестованы в 1991 г. для ЭВМ типа ЕС. С тех пор выдано аттестационных паспортов на 112 ПС, заявителями которых являлись 24 организации отрасли.

Широко применяемые в отечественной практике зарубежные ПС (RELAP, CATHARE, ATHLET и др.), на освоение и адаптацию которых было затрачено много усилий, не имеют заявок на аттестацию, есть только заявления от некоторых организаций о намерении аттестовать эти ПС.

Не все из декларируемых в РД-03-17—94 секций развернули свою работу. Секция № 5 «Вероятностный анализ безопасности» была сформирована еще в 1996 г. Тогда же НТЦ ЯРБ сформулировал требования к верификации ПС, используемых для ВАБ АС. Однако от организаций отрасли пока не поступило ни одной заявки на аттестацию таких ПС. В ОКБ «Гидропресс» ведется работа по подготовке верификационных отчетов для двух ПС, и после ее завершения они будут представлены к аттестации. По итогам экспертизы этих первых ПС будет принято решение о целесообразности разработки документа, содержащего требования к верификационному отчету по этому направлению. Заметим, что вопрос о верификации таких ПС весьма специфичен.

Вопросы по секции № 6 «Требования к экспериментальному обоснованию верификации ПС по всем направлениям» было решено передать на рассмотрение в соответствующие секции по направлениям.

НТЦ ЯРБ разработал проект окончательной редакции руководства по безопасности (РБ), определяющего требования к обязательной сертификации систем управления, важных для безопасности АС. В случае утверждения этого документа Госатомнадзором России предполагаемая аттестация большинства используемых или планируемых к использованию ПС по направлению секции № 7 «Контроль и управление технологическими процессами» будет заменена сертификацией программно-технологических систем в целом. Согласно РБ аттестации подлежат только ПС для расчета показателей надежности сертифицируемых систем, экспертиза которых может проводиться и секцией № 5. Целесообразность сохранения секции № 7 будет определена в процессе работы по сертификации.

Что касается секции № 8 «Материалы. Обработка результатов измерений и расчет физических и механических свойств материалов», то пока нет четкого представления об организации ее работы ввиду отсутствия единого подхода.

В НТЦ ЯРБ сформирован и постоянно пополняется информационный банк прошедших аттестацию ПС, в котором хранятся копии аттестационных паспортов, отчеты о верификации аттестованных ПС, результаты экспертиз, акты о депонировании ПС. Ведется сопровождение базы данных аттестационных паспортов, доступ к которой открыт всем заинтересованным организациям. Эта информация регулярно передается в Координационный совет Министерства Российской Федерации по атомной энергии по проблеме «Разработка технологии верификации и валидации программных продуктов и ядерно-технологических данных, используемых в НИОКР по атомной энергетике». Два раза в год издается информационный бюллетень НТЦ ЯРБ с перечнем аттестованных ПС, который рассылается в территориальные округа Госатомнадзора России, организации отрасли, вузы и т.д.

Как правило, процесс экспертизы не проходит гладко. Отдельные ПС направлялись секциями на доработку, а иногда для получения рекомендации секций к аттестации авторам приходилось предоставлять дополнительные обосновывающие материалы. На каждой стадии рассмотрения во все проекты паспортов ПС, представленных в Совет, вносились значительные изменения, дополнительные ограничения и уточнения области применения данных ПС, корректировалась заявленная точность расчетов.

ПРОБЛЕМЫ

Накопленный опыт позволяет сформулировать наиболее важные проблемы: охват аттестованными ПС всех областей деятельности Госатомнадзора; научная обоснованность используемых в ПС методик; аттестация пользователей; срок действия паспорта на аттестованные ПС; аттестация зарубежных ПС; вопросы финансирования аттестации; роль аттестованных ПС в работе системы Госатомнадзора.

Охват аттестованными ПС всех областей деятельности Госатомнадзора России. Несмотря на большое количество аттестованных ПС, в обосновывающих безопасность ОИАЭ материалах, представляемых на рассмотрение в Госатомнадзор, используются и неаттестованные ПС.

Как показала практика экспертизы АЭС при лицензировании, в ТОБ АС и РУ по аттестованным ПС выполнено не более 50% расчетных обоснований, причем большая часть либо по устаревшим ПС, либо без указания используемого ПС. Отдельные расчеты выполнены по аттестованным ПС, однако за пределами аттестованной области их использования.

Таким образом, до настоящего времени система аттестованных ПС еще далека от охвата всех необходимых вопросов, подпадающих под компетенцию Госатомнадзора России, даже для таких объектов, как атомные станции, с которых началась деятельность по аттестации. Аттестован ряд ПС, используемых для обоснования безопасности судовых реакторных установок и контейнеров для транспортирования отработавшего ядерного топлива, штатных режимов эксплуатации некоторых промышленных реакторов и т. д. Находятся на экспертизе в секциях Совета ПС, используемые в рамках проекта конверсии промышленных реакторов. Для процессов и состояний в других элементах ядерного топливного цикла, где расширяется использование математического моделирования, результаты пока скромные.

Причины такого состояния — недостаточная требовательность Госатомнадзора России к решению этих вопросов, низкий уровень проработки многих научных и технических проблем, ограниченность финансовых средств, выделяемых организациями для оплаты экспертизы.

Научная обоснованность реализованных в ПС методик. Процедура аттестации ПС показала, что в ряде случаев научно-технические основы для принимаемых в обоснование безопасности решений недостаточны. Остановимся на некоторых из них.

Нейтронно-физические ПС. Здесь можно выделить две проблемы:

1) разработка методологии верификации в рамках документа, аналогичного американскому стандарту ANSI/ANS-10.4. Научные проблемы заключаются в том, чтобы для решения нейтронно-физических задач объединить принципы оценки погрешности расчетов, верифицируемых на экспериментальных данных, и расчетов, для которых прямых экспериментальных данных нет. Решить эту задачу можно — есть подробные сведения о нейтронно-физических свойствах веществ — файлы оцененных нейтронных данных, которые связаны с результатами макроэкспериментов через известные физические модели. Имеются также ПС, в которых реализуется решение уравнения переноса нейтронов с погрешностью, определяемой только погрешностью констант, содержащихся в файлах оцененных нейтронных данных (так называемые реперные ПС, или ПС прецизионного класса);

2) разработка тестов и систем тестов для верификации программных средств.

Верификация ПС сводится к сравнению результатов расчетов с тестами, разрабатываемыми на основе экспериментальных данных (в том числе получаемых в экспериментах, поставленных специально для верификации и валидации ПС); представительных измерений на действующих энергоблоках; расчетов с помощью других ПС, в первую очередь реперных.

В настоящее время для аттестации ПС по нейтронно-физической тематике используется достаточно много тестов. Целесообразно их систематизировать и создать соответствующий банк, что значительно сократит затраты на составление верификационных отчетов. Для определенных направлений, например нейтронно-физических блоков динамических программ и программ расчета выгорания топлива, имеет смысл разработать соответствующие или аналогичные тесты, включая выполнение ряда экспериментов.

Теплогидравлические ПС. Основой верификации ПС в области теплогидравлики являются результаты экспериментальных исследований. Отечественные эксперименты

в основном проводились на небольших установках, предназначенных для изучения отдельных процессов на АС или в ее элементах, а также на интегральных стендах — фрагментах оборудования АС (тепловыделяющих сборках, фрагментах теплообменников, моделях контуров циркуляции и т.п.). На этих стендах получено значительное количество экспериментальных данных, используемых для разработки и обоснования ПС.

Тем не менее, как показал опыт, имеющаяся экспериментальная база количественного описания явлений и режимов отечественных РУ недостаточна для верификации целого ряда ПС, а часть ранее полученных экспериментальных данных по разным причинам труднодоступна для разработчиков и пользователей, занимающихся верификацией ПС. Смягчить остроту этой проблемы могло бы создание единого Российского банка экспериментальных данных, используемых для верификации теплогидравлических ПС. Этот давно обсуждаемый вопрос так и не решен ввиду отсутствия финансирования.

До недавнего времени в Российской Федерации не существовало для АС с ВВЭР ни одного крупномасштабного стенда с моделью горизонтального парогенератора для исследования интегральных эффектов в аварийных режимах. НТЦ ЯРБ неоднократно обращал внимание отрасли на необходимость завершения сооружения отечественного полномасштабного стенда безопасности ВВЭР в ЭНИЦ (Электрогорск). Теперь стенд пущен в эксплуатацию, на нем начата первая серия экспериментов.

Для АС с РБМК строительство крупномасштабного интегрального стенда только планируется.

Достаточно полно подобные исследования проведены для транспортных энергетических установок на полномасштабных экспериментальных стендах — прототипах объектов.

«Белые пятна» верификационной базы интегральных ПС, используемых для теплогидравлических расчетов аварийных и переходных режимов АС, наиболее наглядно иллюстрируют матрицы верификации ПС, например, для режимов с большой, средней и малой течами теплоносителя из первого контура РУ, а также матрицы переходных режимов и режимов с нарушением условий эксплуатации отечественных АС с реакторами ВВЭР-1000 и -440. В приложении к матрицам приведены описание теплогидравлических явлений, имеющих место при данных режимах, информация о большинстве экспериментальных стендов, эксперименты на которых могут быть использованы для верификации интегральных теплогидравлических ПС, а также описание ряда экспериментальных тестов для решения конкретных задач верификации. Для АС с реакторами РБМК разработано по крайней мере два варианта аналогичной матрицы, которые сейчас обсуждаются ведущими специалистами отрасли для выработки общего решения.

Прочностные расчеты оборудования. Аттестуются только расчетные алгоритмы и не аттестуются исходные данные к программам, в частности физико-механические свойства материалов, от которых зависит точность расчетов.

Неудовлетворительно обстоят дела при расчетах на прочность элементов активных зон. Некоторые характеристики материалов могут отличаться друг от друга в несколько раз. В области фазовых переходов материалов многие характеристики вообще не определены. В результате нельзя гарантировать достоверность расчетов даже в тех случаях, когда расчетный алгоритм аттестован.

Некоторые компьютерные ПС для прочностных расчетов в качестве исходных данных используют результаты теплогидравлических расчетов. Однако до настоящего времени ряд ПС, предназначенных для анализа аварийных режимов с течью теплоносителя, не аттестован, что ставит под сомнение достоверность результатов теплогидравлических расчетов, используемых в качестве исходных данных для расчетов на прочность (например, температура оболочки твэлов). В этом случае, несмотря на аттестацию ПС для расчетов на прочность, нельзя поручиться за достоверность конечных результатов. Кроме того, ряд параметров, необходимых в качестве исходной информации для выполнения прочностных расчетов, в применяемых в отрасли теплогидравлических ПС не рассчитывается.

Прочностные расчеты строительных сооружений. До настоящего времени в России и за рубежом не завершены разработки теории железобетона с учетом его нелинейной работы при трещинообразованиях, теории работы герметизирующей облицовки с учетом термовыпучивания, механики разрушения металла, теории расчетного определения сейсмичности площадки ОИАЭ и т.п. Имеющиеся экспериментальные данные носят противоречивый характер.

Аттестация пользователей. В процессе дискуссий последних лет на заседаниях Совета и секций возник вопрос о компетентности пользователей (не авторов) аттестованных ПС в организациях-заявителях и других организациях. Хотя в паспорте ПС указывается, каким организациям авторы доверяют использование своего ПС, нет уверенности, что это использование будет правильным. В теплогидравлических, прочностных и других расчетах необходимо введение большого количества корректных исходных данных. Например, при расчетах прочности сложных конструкций методом конечных элементов объем необходимых исходных данных достигает ста тысяч чисел (координаты узловых точек, массив связи, граничные условия и т.д.). Вероятность ошибки велика и в значительной степени зависит от компетентности пользователя. Отмечены случаи, когда по аттестованным программам представлялись результаты расчетов, впоследствии признанные неверными. Выход из данной ситуации — аттестация пользователей по каждому аттестованному ПС. Но организовать это непросто, и, по нашему мнению, НТЦ ЯРБ не под силу, а ставить пользователей в зависимость от авторов в нынешних экономических условиях проблематично. Прорабатываются процедурные вопросы контроля за квалифицированным использованием аттестованных ПС.

Срок действия паспорта на аттестованные ПС. Согласно РД-03-17—94 срок действия паспорта на аттестованные ПС неограничен. Однако опыт показал необходимость корректировки этого РД и введения ограниченного срока действия паспорта. Предложено решение о сроке перерегистрации паспорта (повторной аттестации) принимать секцией и утверждать Советом при выдаче паспорта. При перерегистрации секция рассматривает материалы о развитии верификационной базы ПС с учетом опыта эксплуатации ПС и может вынести решение о перерегистрации или анулировании паспорта, о повторной экспертизе ПС и т.д. Совет согласился с этим предложением и рекомендовал секциям при рассмотрении ПС формулировать предложения о необходимости и сроках перерегистрации.

В приложение к аттестационному паспорту внесена дополнительная графа «Особые условия», где, как правило, указывается срок повторной экспертизы ПС. Необходимость внесения такого дополнения в первую очередь была вызвана отсутствием достаточного набора отечественных экспериментальных данных для верификации ряда ПС на современном международном уровне. Сейчас при аттестации ПС (по результатам его экспертизы) заявителю даются соответствующие рекомендации по проведению дополнительных экспериментальных и расчетных исследований, выполнение которых будет контролироваться при повторной экспертизе.

Аттестация зарубежных ПС. Известно, сколько усилий тратится иностранными государствами и международными организациями на внедрение и адаптацию зарубежных кодов для отечественных АС (RELAP, ATHLET, CATHARE и т.п.). В процесс включены все ведущие научные и конструкторские организации страны. Проделано множество расчетов аварийных и эксплуатационных режимов для различных отечественных блоков. Но как ни странно, ни одно из освоенных в России зарубежных ПС (за исключением аттестованного комплекса программ фирмы Siemens для расчета строительных сооружений) не только не прошло экспертизу, но даже не заявлено к аттестации ни отечественными, ни зарубежными организациями.

НТЦ ЯРБ всецело поддерживает развитие отечественной расчетной базы и считает, что задача разработки, например, отечественного теплогидравлического кода RELAP очень актуальна, хотя и поставлена Минатомом с некоторым опозданием. А

пока ряд расчетов при обосновании безопасности отечественных ОИАЭ организации отрасли вынуждены проводить по зарубежным ПС, и они должны быть аттестованы. Процедура аттестации зарубежных ПС в Госатомнадзоре России формально будет такой же, как для отечественных, хотя не исключены технические трудности. Необходима отечественная организация, которая стала бы заявителем зарубежного ПС и вместе с зарубежными авторами (на что должно быть их согласие) прошла бы процедуру аттестации. Заявителем может быть и зарубежная организация.

Госатомнадзор России в лице НТЦ ЯРБ потратил много усилий на адаптацию зарубежных ПС и использует результаты расчетов по ним в экспертной деятельности, для которой их аттестация не обязательна.

Вопросы финансирования аттестации ПС. Процедура аттестации требует проведения большого комплекса работ и, естественно, определенных финансовых затрат. Разработка, верификация ПС и подготовка верификационных отчетов — дело самого заявителя или организации, заинтересованной в аттестации (например, эксплуатирующей). Процесс аттестации требует от заявителя в основном оплаты услуг экспертов, назначаемых секциями по направлениям (разумеется, с соответствующими начислениями). Но даже такие затраты при нынешней экономической ситуации сдерживают поток подаваемых на аттестацию ПС. Именно эта причина заставила воздержаться от разработки системы аттестации пользователей. Но заинтересованным организациям необходимо помнить, что подготовка эффективных ПС и их соответствующая верификация и аттестация есть важнейший элемент деятельности по обеспечению безопасности ОИАЭ и без соответствующего финансирования надлежащих результатов не добиться.

Роль аттестованных ПС в работе системы Госатомнадзора России. Процедура аттестации ПС может эффективно работать, если все структуры Госатомнадзора, связанные с экспертизой материалов, обосновывающих безопасность ОИАЭ, и выдачей лицензий, будут отслеживать соответствующую информацию об использовании аттестованных или неаттестованных ПС. В настоящее время нельзя сказать, что здесь все благополучно. Необходимо ужесточение контроля и усиление требований заинтересованных подразделений центрального аппарата и территориальных округов Госатомнадзора при выдаче лицензий, при инспекциях и других видах регулирующей деятельности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

31 марта 1999 г. состоялось заседание Научно-технического совета Госатомнадзора России под председательством руководителя Госатомнадзора Ю.Г. Вишневского и при участии заместителя главы Минатома России Б.И. Нигматулина. Приводим решение этого НТС.

1. Принять к сведению сообщение заместителя директора НТЦ ЯРБ О.М. Ковалевича и одобрить работу НТЦ ЯРБ по организации Совета по аттестации ПС при Госатомнадзоре России и проведению аттестации ПС, используемых для обоснования безопасности ОИАЭ.

2. Обратить внимание эксплуатирующих, проектных, конструкторских и научных организаций, занимающихся вопросами обоснования безопасности ОИАЭ с применением ПС, на недостаточную в отдельных случаях научную обоснованность используемых ПС.

3. Рекомендовать НТЦ ЯРБ проработать вопрос о расширении сферы деятельности Совета по аттестации ПС при Госатомнадзоре России с целью охвата всех областей использования атомной энергии на поднадзорных Госатомнадзору России ОИАЭ.

4. Совету по аттестации ПС при Госатомнадзоре России, всем организациям, оказывающим научно-техническую поддержку Госатомнадзору России при аттестации ПС и принимающим непосредственное участие в процессе аттестации ПС, провести анализ и сообщить в НТЦ ЯРБ предложения по дальнейшему совершенствованию требований к обоснованию ПС и организации работы Совета.

5. Рекомендовать подразделениям центрального аппарата Госатомнадзора России и его межрегиональным территориальным округам, осуществляющим анализ материалов на выдачу лицензий на вид деятельности, связанной с использованием атомной энергии, учитывать случаи использования для обоснования безопасности ОИАЭ неаттестованных ПС.

6. Рекомендовать заинтересованным организациям Минатома России и других ведомств, Совету по аттестации ПС при Госатомнадзоре России с целью дальнейшего совершенствования процедуры аттестации ПС уделить внимание решению следующих проблем:

— разработки стандарта по процедуре верификации ПС;

— совершенствования документации, регламентирующей порядок аттестации ПС;

— отражения в документах, представляемых в Совет по аттестации ПС, научной обоснованности используемых в ПС методик;

— проработки вопроса об установлении сроков действия паспортов на аттестованные ПС;

— разработки порядка и методики аттестации пользователей ПС.

Статья поступила в редакцию 13 декабря 1999 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Физика ядерных реакторов, 1999, вып. 2, с. 148—157.

Редакционная коллегия выпуска «Динамика ядерных энергетических установок» с прискорбием сообщает о безвременной кончине 14 мая 1999 года одного из организаторов сборника, в прошлом активного члена редколлегии и комиссии по динамике ЯЭУ Андрея Владимировича Сергиевского. Ушел из жизни талантливый ученый и организатор, один из основателей теории динамики ЯЭУ как научного направления в российской науке.

Научная деятельность А.В. Сергиевского, посвященная математическому моделированию динамики ЯЭУ, началась в 1953 году в Горьковском исследовательском физико-техническом институте (ГИФТИ). О результатах этой деятельности трудно судить тем, кто не знаком с огромным числом научно-технических отчетов, долгое время бывших единственным видом публикаций в этой области. Косвенным свидетельством высокой квалификации и уровня исследований, проводимых в ГИФТИ уже в 50-х годах, может служить благодарность А.В. Сергиевскому и Е.Ф. Сабаеву в аннотации к первому изданию книги А.Я. Крамерова и Я.В. Шевелева «Инженерные расчеты ядерных реакторов».

А.В. Сергиевский был мудрым, трудолюбивым, высокоорганизованным, оптимистичным и надежным человеком, квалифицированным ученым и выдающимся организатором. Около 25 лет он был директором ГИФТИ, а затем Института прикладной математики и кибернетики Нижегородского госуниверситета. Трудно переоценить его вклад в подготовку специалистов, работавших под его руководством: В.Д. Горяченко, Л.В. Смирнова, В.В. Знышева, В.И. Будникова и других.

Редакционная коллегия помещает в настоящем выпуске сборника последнюю работу А.В. Сергиевского, написанную для музея Нижегородского университета. Эта работа посвящена 80-летию Н.А. Железцова и дает представление об истоках процесса становления нашего научного направления. Мы решили опубликовать ее без сокращений. Часть включенного автором в статью материала, на первый взгляд не имеющего отношения к тематике сборника, содержит интересную информацию об истории развития, истоках этой тематики и ее научной базе, к которой следует отнести идеи, методы и результаты основанной академиком А.А. Андроновым школы нелинейной теории колебаний и динамики машин. Выдающимися представителями этой школы были Н.А. Железцов и А.В. Сергиевский, светлая память о которых будет жить в сердцах всех, кто их знал и любил.

ПРОСТО О ХОРОШЕМ ЧЕЛОВЕКЕ



Андрей Владимирович... Совсем недавно мы обсуждали с ним статью в университетский сборник, беседовали «за жизнь»...

Я знал Андрея Владимировича с 1957 года. Он был ассистентом, а я студентом радиофака Горьковского университета. Потом мне довелось в течение 15 лет под его руководством работать в лаборатории ГИФТИ, одним из первых сотрудников и строителей которой он был. Лаборатория, созданная академиком А.А. Андроновым для решения задач динамики в ядерной энергетике, все время ее существования пестовалась академиком А.П. Александровым и всеми директорами ОКБМ.

Годы работы с Андреем Владимировичем позволяют помнить о нем как о вдумчивом и строгом, но добром и терпеливом наставнике, коммуникабельном и простом в общении. Так же характеризуют А.В. Сергиевского многие близко знавшие его люди, в том числе и сотрудники редакции выпуска «Математическое моделирование и оптимальное управление» («Вестник Нижегородского университета»), который он редактировал в последнее время. Без преувеличения можно сказать, что этот сборник держался на его энергии, энтузиазме, доброжелательности и умении общаться с людьми.

Меня он просвещал не только в научной области, но и в рыбной ловле спиннингом и «на кольцо». Бывало, сидя в одной лодке «великовражке», мы в азарте ругали друг друга за рыбину, упущенную из-за нерасторопного обращения с сачком. Помню гирлянду соленых лещей, которых доверчивый Андрей Владимирович вывесил сушиться перед окнами дома в селе Татинец на Волге. Поутру он сделал вывод, что и в деревне на Руси жулики не переводятся. Как и многие его научные теоретические выводы, этот подтвержденный практикой вывод с годами не устарел.

Судьба А.В. Сергиевского сложилась так, что долгие годы ему пришлось сочетать научную деятельность с руководством институтом (он стал директором ГИФТИ в 34 года). Умелый и деятельный администратор, он обладал здоровым чувством юмора. Благосклонно принимал острые шутки в свой адрес на институтских капустниках. С улыбкой слушал, например, такие строки на последнем в его жизни юбилее:

Известно, в молодости Вы
Учились на радиофаке,
Когда водились в Волге раки.
Затем на благо ЯЭУ
Всю жизнь служили в ГГУ
Среди ученых поголовья,
Отдав за это часть здоровья.
Потом директором Вы стали,
Но если тайну приоткрыть,
Вы со студенчества мечтали
Не Волге бакенщиком быть.

И, что теперь для всех типично,
Себя вы можете частично
Студентом-юношей считать,
Поскольку в данную разруху
Вам могут столько же продать,
Как в дни учебы на «степуху».
Носитель званий и наград,
Вам в Вашу лучшую из дат
Желаем после юбилея
Жить дальше, больше не старея,
Еще годков до сорока,
А в сумме до ста лет пока.

Как жаль, что это пожелание не сбылось.

В.В. Знышев

НИКОЛАЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ЖЕЛЕЗЦОВ
(12.09.1919—4.11.1985)

А.В. Сергиевский, НИИ прикладной математики и кибернетики ННГУ, 603605, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 10



Это рассказ о Николае Александровиче Железцове — одном из зачинателей всего того, что связывается у нас с широко развитыми сейчас в Нижегородском университете работами в области построения и исследования математических моделей динамических процессов в сложных нелинейных объектах самой разнообразной природы.

Судьбе было угодно распорядиться так, что прожил он всего 66 лет. Еще меньше было отпущено ему для активного творчества. Однако плоды этой короткой, но яркой жизни пожинают и будут пожинать не только люди возраста его учеников и сотрудников, но и те, кто много моложе.

Николай Александрович Железцов родился 12 сентября 1919 года в Нижнем Новгороде в семье Александра Михайловича Железцова — скромного финансового работника. Мать, Елена Алексеевна, была домохозяйкой, правила домом и много сил отдавала воспитанию горячо любимого сына. Достаток в доме был небольшой. Семья в основном обеспечивалась за счет труда Елены Алексеевны, имевшей умелые руки и старую швейную машинку. Коля был единственным сыном, но на самом деле на попечении мамы детей было двое: была еще дочь подруги Елены Алексеевны Тамара, которая, оставшись без родителей, нашла в семье Железцовых и внимание, и заботу.

В школе Николай был отличником. Его тетради всегда были в образцовом порядке. Он легко, с удовольствием занимался физикой и математикой, много читал, любил и умел мастерить, серьезно интересовался шахматами, неплохо плавал и играл в волейбол. Сверстникам помогал разбираться в задачах, но списывать никогда не давал. Обладая такими качествами, Николай заметно выделялся среди своих одноклассников и знал себе цену. Закадычных друзей-мальчишек у него не было. Дружил он с девочками и пользовался у них немалым авторитетом. Наиболее же яркой чертой характера будущего ученого стала способность спонтанно увлекаться так, чтобы забывать обо всем на свете. Его незаурядные способности и устремленность позволяли быстро достигать желаемого. Добившись своего, он остывал и более к тому мог уже никогда не возвратиться...

Окончив в 1936 году среднюю школу, Н.А. Железцов поступил на первый курс физико-математического факультета Горьковского университета. Здесь он специализировался по теории колебаний и привлек к себе внимание академика Александра Александровича Андронова.

Завершение учебы совпало с началом Великой Отечественной войны, но еще раньше, в декабре 1940 года, Н.А. Железцов начал трудиться в спектроскопической лаборатории оборонного завода. Поэтому от службы в армии он был освобожден и в боях не участвовал, а проработал на этом предприятии всю войну, пройдя путь от техника

до заведующего лабораторией. Там же Н.А. Железцов выполнил свою первую научную работу. Он модернизировал установку и методику анализа сплавов. В результате время обработки одной пробы было сокращено более чем в 2,5 раза, а количество анализов возросло до тысячи в сутки [1].

Еще не кончилась война, но уже можно было продолжить учебу, и в октябре 1944 года Н.А. Железцов поступил в аспирантуру к А.А. Андронову, который помнил его еще студентом. Только вот уволиться с завода удалось лишь после окончания войны — в сентябре 1945 года. Тогда же он был зачислен на работу в университет ассистентом кафедры теории колебаний по совместительству.

Требования А.А. Андронова к аспирантам были очень высокие. Им следовало знать как минимум два иностранных языка, классическую и современную физику, электродинамику, математику и механику, разбираться в радиотехнике и электронике, уметь провести эксперимент, вести интенсивную научную работу и быть в состоянии передать свои знания студентам. О том, как справлялся аспирант с этими требованиями, выяснялось в процессе постоянного общения с руководителем, а также на экзаменах по кандидатскому минимуму, где основным и самым строгим экзаменатором был все тот же научный руководитель. Что же касается умения прочитать лекцию, то и здесь все было ясно: аспирант должен был научиться читать лекцию так, как это умел делать сам профессор.

А.А. Андронов ценил в Н.А.Железцове глубокие и разносторонние знания и почти уникальную способность сочетать в себе талантливого физика, математика и незаурядного инженера. Однако очень уж Н.А. Железцов склонен был отвлекаться, очень уж был непоседлив. Поэтому (как говорили знающие люди) ему, единственному из своих аспирантов, А.А. Андронов установил твердый график пребывания на отведенном рабочем месте.

Много делал А.А. Андронов для того, чтобы Н.А. Железцов стал хорошим лектором. Технология обучения Н.А. Железцова лекторскому искусству подробно описана в воспоминаниях А.М. Гильмана [2]: «Фактически все эти годы А.А. Андронов и Н.А. Железцов работали над лекциями совместно. Интересен прием, примененный Александром Александровичем для лекторской подготовки Н.А. Железцова. Довольно часто он неожиданно передавал лекторскую трибуну Железцову, а сам превращался в слушателя и после лекции делился с Н.А. своими наблюдениями. Иногда А.А. Андронов передавал чтение лекции после окончания раздела, но бывали случаи, когда передача производилась в середине доказательства. Пройдя такую школу, Н.А. Железцов сам стал блестящим лектором...».

Кроме проведения занятий в аудитории Н.А. Железцов активно работает над созданием лабораторного практикума и руководит лабораторными работами студентов. Эту сторону деятельности Н.А. Железцова также освещает в своих воспоминаниях А.М. Гильман: «В 1946—1948 гг. я работал под руководством Н.А. Железцова над созданием лаборатории авторегулирования... К этому времени, кроме... лабораторий радиотехнических устройств и авторегулирования, работавших под руководством Н.А. Железцова, на кафедре была создана еще одна лаборатория следящих систем, которую возглавил Н.П. Власов*».

Здесь необходимо сказать и еще об одной черте Н.А. Железцова — ученого и инженера. Он обладал редкой в наше время способностью с легкостью отказываться от попыток решения проблемы методом «проб и ошибок», заменяя его теоретическим анализом в сочетании с целенаправленным экспериментом. Об этой, как, впрочем, и о способности Н.А. Железцова увлекаться, дает представление еще одна цитата из воспоминаний А.М. Гильмана, где он рассказывает о первой в истории Горьковского госуниверситета хоздоговорной работе, основным исполнителем и техническим руководителем которой был Н.А. Железцов: «С утра собрались все пять исполнителей...

*Большая заслуга в создании всех этих лабораторий, особенно в части оснащения их необходимым оборудованием, принадлежит А.М. Гильману.

Н.А. Железцов пробовал очередной вариант... Он производил расчеты и сам с паяльником в руках их реализовывал... Около пяти часов дня мы уговорили его сходить в столовую. Он нарисовал схему и поручил ее В.И. Королеву... Виктор Иванович обратился к Н.А. Железцову с вопросом: «А какую поставить здесь емкость?» Николай Александрович взял схему, задумался, затем... стал считать. А дальше он продолжил работать с паяльником. Обед был забыт... Поздно вечером... все было готово».

В 1947 году, после окончания аспирантуры и защиты (весьма успешной и в срок) диссертации, Н.А. Железцов направляется на работу в ГИФТИ, где сразу же становится старшим научным сотрудником. Директор ГИФТИ (в то время им была Мария Тихоновна Грехова), представляя Н.А. Железцова к этой должности, писала: «имеет хорошее физико-математическое образование, свободно владеет современной теорией колебаний и теорией электромагнитного поля. Имеет удовлетворительные навыки в радиофизическом и оптическом эксперименте..., значительный опыт в преподавании электромагнитного поля и теории колебаний. Есть все основания предполагать, что из Н.А. Железцова выработается настоящий ученый. Преданный Родине человек» [3].

А.А. Андронова всегда очень интересовала проблема адекватности математических моделей. Ведь именно невозможность объяснить существование устойчивых периодических движений (автоколебаний) в линейных автономных системах была для А.А. Андронова одной из главных составляющих питательной среды, на которой выросла нелинейная теория колебаний, в которой такие «физические понятия, как автоколебания, мягкое и жесткое возбуждение автоколебаний, затягивание и т.д., получили твердую математическую основу в виде предельных циклов, теории бифуркаций, областей устойчивости в большом...» [4].

А.А. Андронов обнаружил, что с помощью основанных на этих аналогиях и уже освоенных методов построения и анализа нелинейных математических моделей невозможно объяснить «разрывные колебания» — динамические процессы, в которых обычные медленные движения чередуются с очень быстрыми, когда система в течение очень малых промежутков времени (в пределе — скачком) переходит из одного состояния в другое. Вот как об этом пишет сам А.А. Андронов: «1929 год. Я уже стою... на той точке зрения, что математический образ, соответствующий автоколебаниям, — это предельный цикл Пуанкаре. Я рассматриваю разные схемы и всюду ищу циклы. Но вот я рассматриваю в обычной идеализации схему мультивибратора Абрагама—Блоха, содержащую только емкости, но способную совершать автоколебания. Я пишу дифференциальные уравнения движения, ищу цикл и не нахожу цикла, но мне удается строго доказать, что исследуемые мною уравнения движения предельного цикла иметь не могут. Вместо цикла я нахожу на фазовой плоскости особую кривую, где фазовая скорость становится бесконечной... Получился парадокс: автоколебания — это циклы, циклов нет, а схема совершает автоколебания. С этим парадоксом я пришел к Л.И. Мандельштаму..., который... резюмировал: "Если строго доказано, что циклов нет, это уже хорошо. Так как мультивибратор на практике колеблется, то либо идеализация не годится, либо вы не знаете, как нужно работать с такой идеализацией"» [4].

Для выхода из этого тупика Л.И. Мандельштам и Н.Д. Папалекси предложили ввести в модель дополнительную, не следующую из уравнений гипотезу, согласно которой в системе могут существовать скачки, такие, что «электрическая энергия, запасенная в конденсаторах, меняется непрерывно».

А.А. Андронов и А.А. Витт эту гипотезу приняли и действительно нашли разрывный предельный цикл, изучили процесс его установления. Парадокс был разрешен. Оставалось, однако, изучить причины, из-за которых надо было вводить дополнительную, никак не следовавшую из уравнений гипотезу. К тому же еще оказалось, что в некоторых случаях (например, в задаче о колебаниях двух связанных мультивибраторов) так сформулированная гипотеза допускала неоднозначность в определении конечной точки скачка.

Исчерпывающее решение проблемы для систем второго порядка выпало на долю Н.А. Железцова. В качестве объекта изучения был взят мультивибратор. Исследование мультивибратора имело кроме теоретического и большое прикладное значение: происходящие в нем процессы типичны для большинства электронных устройств, используемых для формирования и преобразования импульсных сигналов. Результаты исследования предполагалось обобщить в виде соответствующей теории. Усилиями Н.А. Железцова при активном участии Л.В. Родыгина, М.И. Фейгина, И.М. Клибановой и А.С. Алексеева теория была создана.

Было установлено, что обнаруженный эффект обусловлен существенной ролью обычно не учитываемых при составлении уравнений малых паразитных* параметров. Выявлены условия существенного их влияния, исчерпывающе полно и математически строго проведен анализ соответствия свойств полной и вырожденной, составленной без учета паразитных параметров, моделей. Доказана, в частности, фундаментальная теорема о мере близости действительного и разрывного (получаемого при пренебрежении паразитными параметрами) предельных циклов. Гипотеза скачка в прежнем виде перестала существовать, и вместе с тем исчезли неоднозначности. Скачок превратился в предельную форму (идеализацию) реального движения, к которой оно приближается по мере стремления к нулю малых паразитных параметров. Стало возможным оценивать длительность быстрых движений и рассчитывать период разрывного и близкого к нему предельного циклов. Исследован ряд важных с практической точки зрения электронных схем импульсной техники. При этом во всех случаях теоретическое изучение процессов в импульсных схемах сопровождалось экспериментом. В итоге развитая теория сразу же получила хорошее подтверждение своей эффективности.

Созданная теория разрывных колебаний была представлена и изложена на языке, доступном для большинства специалистов. Ее внедрению в практику исследований (особенно это относится к идее раздельного изучения быстрых и медленных движений), пониманию роли и значения малых паразитных параметров в формировании свойств реальных объектов решающим образом способствовало включение теории в преподавание сначала самим Н.А. Железцовым на радиофаке, а затем и на других факультетах университета, публикация в объеме около 25 печатных листов в составе второго (1959 года) дополненного издания классического руководства — книги А.А. Андронова, А.А. Витта, С.Э. Хайкина «Теория колебаний» под редакцией Н.А. Железцова [5].

Конец сороковых — начало пятидесятых. В Советском Союзе решается задача ликвидации монополии США на атомное оружие. Во главе проекта — научный руководитель академик И.В. Курчатов, организация — в цепких руках Л.П. Берии. Разрабатываются и осваиваются невиданные ранее в стране технологии, создается принципиально новая промышленная отрасль со своими НИИ и КБ, заводами, рудниками, новыми закрытыми городами.

Сейчас много пишут о важной роли американских секретов в создании отечественного ядерного потенциала. Конечно, они сыграли положительную, а в отдельных случаях и важную роль. Но все-таки в целом все в стране делалось своим умом, своими руками. Успех определился, в частности, фундаментальным научным заделом и кадровым потенциалом, умением их использовать. А пока научное руководство проекта занималось мобилизацией научных возможностей, организаторы активно и по-своему занимались мобилизацией людей.

Существует легенда о том, что однажды Н.А. Железцов получил «настойчивое приглашение» на работу в один из закрытых городов. Это стало известно А.А. Андронову и послужило поводом к его встрече с И.В. Курчатовым. В результате была начата работа по организации в ГИФТИ новой, специальной и секретной лаборатории. Так это было или нет — я точно не знаю. Однако в декабре 1952 года, когда А.А. Анд-

*Этот инженерный термин благодаря Н.А. Железцову стал в теории математического моделирования динамики систем общепринятым.

ронова уже не было в живых (он умер 31 октября 1952 года) и мы (Е.Ф. Сабаев и я) — два студента-дипломника радиофака ГГУ пришли в ГИФТИ, лаборатория уже существовала. Руководителем, главным и самым активным ее сотрудником был Н.А. Железцов. Кроме него в лаборатории работали Н.Н. Баутин и Н.А. Фуфаев, а также (очень недолго) Л.Н. Белюстина. Деятельность лаборатории была целиком направлена на помощь конструкторам путем разработки и анализа математических моделей для проверки качества принимаемых решений непосредственно в процессе проектирования. Актуальность такой постановки естественно вытекала из особенностей технической проблемы: атомная техника впитывала в себя достижения многих отраслей науки, а привычный способ «доводки» конструкций был в данном случае чрезвычайно затруднен и даже, в том числе и по условиям безопасности, невозможен.

Первой стала задача об устойчивости каскадов машин для разделения изотопов урана. Каскад — это группа машин (ступеней), соединенных в цепочку так, что состояние каждой заметно влияет как на последующую, так и на предыдущую. Надо было научиться выбирать параметры машин так, чтобы заданные стационарные режимы работы каждой из них в отдельности и каскада в целом были не только устойчивы, но и достаточно стабильны.

Н.А. Железцов работал страстно и увлеченно. Он разрабатывал различные варианты математических моделей, часто и подолгу считал на электромеханическом калькуляторе (другой вычислительной техники не было), постоянно встречался с конструкторами и, выходя за пределы задачи моделирования, вникал в суть их проблем, предлагал свои варианты решений. Проблема авторства при этом, как и во всех случаях в дальнейшем, у Н.А. Железцова не возникала. В таком же стиле старались работать и мы.

В решении проблемы устойчивости каскада лаборатория не была одинокой. Эту же задачу несколько раньше и в несколько ином плане решал академик С.Л. Соболев*. Его работы служили нам стартовой позицией и помогли быстро войти в курс дела. И в Москве, и в Горьком понимали, что, какие бы математематические модели ни создавались, без специально поставленного близкого к натурному эксперимента в новом деле не обойтись. При разработке программы и условий эксперимента заметную, а по вопросам устойчивости и первостепенную, роль играло мнение Н.А. Железцова. Последнее основывалось на проведенном у нас в лаборатории моделировании. Эксперимент практически полностью подтвердил теоретические прогнозы. Проблема адекватности математических моделей каскадов была близка к решению. Нам стали верить.

Вторая половина 50-х годов. Одна технология сменяла другую, и возникла задача уменьшения потерь, которые могут быть следствием неожиданных грубых нарушений в работе отдельных разделительных ступеней. Моделированием этой задачи по предложению Н.А. Железцова занялся и успешно решил ее Е.Ф. Сабаев. Он подробно исследовал возникающий при этом переходный процесс и предложил меры по уменьшению числа регуляторов, обеспечивающих устойчивость заданного стационарного режима**. В это же время мне было предложено войти в круг проблем динамики ядерных энергетических установок (ЯЭУ). Так в лаборатории возникла внутренняя структура в виде двух отдельных исследовательских групп.

---

*О том, какое внимание уделял И.В. Курчатов математике вообще и математическому моделированию в частности, свидетельствует тот факт, что математик-теоретик С.Л. Соболев был в то время первым его заместителем.

**Дальнейшее участие лаборатории в совершенствовании отечественной промышленной технологии обогащения было связано с оптимизацией процессов внутри разделительных ступеней. Для этого в лаборатории была образована специальная и практически независимая исследовательская группа под началом доктора технических наук профессора Ю.И. Неймарка. Впоследствии эта группа вошла в состав отдела в организованном в 1964 году при ГГУ НИИ прикладной математики и кибернетики.

Новое, связанное с динамикой ЯЭУ, направление оказалось настолько емким, что его хватило лаборатории, а затем и созданному на ее базе отделу почти на три десятка лет.

Начало было положено задачей математического моделирования динамики переходных процессов в энергетической установке атомного ледокола «Ленин». Актуальность работы следовала хотя бы из того, что изменение мощности в действовавших тогда энергетических установках осуществлялось квазистатически, в то время как условия работы судна во льдах требовали непрерывного и относительно быстрого маневрирования.

Предстояло получить данные о скоростях и величинах изменений температур и давлений при быстром изменении потребляемой мощности от самых малых до самых больших значений. Естественно, что ни о каком прямом эксперименте такого рода не могло быть и речи.

На кафедре (после смерти А.А. Андронова ею стал заведовать Н.А. Железцов), а следовательно, и в лаборатории уже был опыт изучения уравнений цепной реакции деления ядер урана: еще в 1952—1953 годах была построена электронная модель нейтронной кинетики с шестью группами запаздывающих нейтронов. Нам же предстояло исследовать динамику всей установки в целом: кроме нейтронной кинетики надо было смоделировать процессы теплообмена между топливом и водой в реакторе, теплообмен и генерацию вторичного пара в парогенераторе, учесть влияние температуры топлива, воды и конструкций на коэффициент размножения нейтронов, действие органов защиты и управления... Изучение возможности решить эту задачу на основе «ручного» счета не давало повода к оптимизму. Однако к этому времени в стране уже было начато производство аналоговых вычислительных комплексов МН-8, позволявших после некоторой доработки провести моделирование с учетом основных нелинейностей и в реальном масштабе времени. Титаническими усилиями Н.А. Железцова (он осуществлял лоббистскую деятельность во влиятельных научно-технических кругах) и директора ГИФТИ Я.Н. Николаева (он действовал в административной сфере) наряд, деньги и штаты для комплекса были получены. Тогда группа молодых специалистов — выпускников кафедры теории колебаний 1957 года* в июне, через несколько дней после защиты дипломных работ, поехала на завод в Москву, где при их непосредственном участии было завершено изготовление, проведены испытания и приемка комплекса. Они же смонтировали и запустили его в работу в Горьком. В конце 1958 года, за год до окончания строительства судна, динамическая модель была готова.

Управление моделью осуществлялось с помощью потенциометров (аналогов задатчика мощности реактора и маневрового клапана турбины), которые располагались на пульте МН-8. Графики изменения температур и давления (шесть величин) записывались самописцами. Отдельно самописцем дополнительного к МН-8 устройства фиксировалась величина нейтронной мощности реактора, или реактивность (величина превышения над единицей коэффициента размножения нейтронов). Так была создана возможность моделирования процесса общения с установкой как оператора реактора (задатчик мощности), так и вахты (управление количеством потребляемого пара).

Одним из первых воспользовался моделью научный руководитель проекта ЯЭУ ледокола академик Анатолий Петрович Александров. Во время одного из своих приездов в Горький он долго стоял за пультом, менял положения датчиков, внимательно и многократно рассматривал ленты самописцев, мало обращая внимания на уже полуночное время. Одобрив сделанное и поблагодарив присутствующих, он уехал, но увиденное и услышанное не забыл: благодаря ему в ходе испытаний корабля удалось записать кривые изменения температур при перемене мощности и, таким образом, получить прямое экспериментальное доказательство значения метода и пользы от проделанной работы.

*В их числе был и будущий профессор ННГУ, заведующий кафедрой и директор НИИ механики при ННГУ В.Д. Горяченко.

За этот комплекс работ Н.А. Железцов был награжден орденом «Знак почета».

По инициативе А.П. Александрова для быстрейшего внедрения метода и обмена опытом в изучении динамики ЯЭУ Научно-техническое управление Минсредмаша в 1960 году организовало Комиссию по динамике и регулярно действующий семинар, активными организаторами и неизменными участниками которого были (и остаются до сих пор) сотрудники ГИФТИ, а теперь НИИ механики при ННГУ*. Их деятельность во многом определила тематику и научно-технический уровень проводимых мероприятий. Тогда же в ГИФТИ была создана отраслевая научно-исследовательская лаборатория.

Потребность в исследованиях динамических процессов быстро нарастала**. Математическое моделирование динамики стало обязательной частью работ по проектированию ЯЭУ. Количество и спектр решавшихся в лаборатории задач расширились: практически сразу же возникли задачи, связанные с обеспечением безопасности. Для ЯЭУ водо-водяного типа это были в основном задачи моделирования различных нештатных ситуаций (проектных аварий) с целью оценки их последствий и проверки действенности конструктивных и иных мер по уменьшению ущерба.

В это же время (начало 60-х годов) начали интенсивно разрабатываться реакторы новых типов, увеличивались мощности и размеры единичных блоков. Если раньше внимание сосредоточивалось в основном на ЯЭУ с реакторами водо-водяного типа, то теперь добавились ЯЭУ с реакторами с кипящим и жидко-металлическим теплоносителем, с газообразным циркулирующим горючим и т.д. Стремление к более глубокому пониманию сущности физических процессов, более полному отражению их свойств при моделировании динамики, нужды проектной практики вызывали к жизни все более сложные способы исследования. Ситуация осложнялась, в частности, тем, что часто нужные рецепты и методы отсутствовали или же требовали специальной адаптации и проверки [6—8]. В качестве примера можно привести ЯЭУ с большим уран-графитовым канальным реактором и кипящим теплоносителем типа РБМК. Коэффициент размножения нейтронов в таком реакторе в каждой точке активной зоны существенно зависит от множества факторов: плотности нейтронов, концентрации ксенона, выгорания, температур горючего и замедлителя, количества и плотности пара, положения стержней и др. Все эти факторы к тому же меняются во времени, а ряд из них играет роль положительных обратных связей. Базовой в этом случае является трехмерная нелинейная диффузионная модель кинетики, которая и стала основной при исследовании условий пространственно-временной устойчивости стационарных режимов, а также проблем существования и оценок ограниченных, неограниченных и взрывных решений***. Сложные распределенные модели служат также для построения и исследования границ применимости более простых и наглядных моделей, с помощью которых можно не только получать важные для проектантов зависимости, но и приобрести необходимую инженерную интуицию, понять физическую сущность и механизм того или иного явления.

В 50—60-е годы, пока сотрудников было мало, какого-либо формализованного научного семинара в лаборатории не было. Однако обсуждение различных научных проблем при активном участии Н.А. Железцова происходило практически постоянно. Как бы случайно сходились «перекурить» два-три человека, подходил Н.А. Железцов,

*О важности и пользе семинара, его хороших научных и организационных традициях свидетельствует и тот факт, что он, несмотря на все потрясения, действует до сих пор. Несомненная заслуга в этом его первого руководителя Я.В. Шевелева и работников Минсредмаша — сначала Г.В. Поповой, а затем В.В. Пчелина.

**Повышенный интерес к этой проблеме имел место и в других странах. Количество публикаций только по проблеме устойчивости ЯЭУ росло в 50—60-х годах с периодом удвоения 4 года.

***Заметим, что выполненный в 1981 году анализ видов решений для модельного реактора, параметры которого подобны параметрам РБМК, указывал на возможность существования последних [9].

и начиналась дискуссия, часто переходившая в жаркий спор с привлечением дополнительных участников. Тематика обсуждений была очень широкой: от проблем теоретической физики и космогонии до футбола и шахмат. Н.А. Железцов всюду был энциклопедистом. Характерным, однако, было то, что вопросы, непосредственно связанные с решаемыми в данный момент частными задачами, на этих сходках ставились лишь в достаточно общей, без привязки к изучаемому объекту или явлению, форме.

До начала 60-х годов все, что касалось атомной технологии, было тщательно засекречено. Научно-технический отчет был для нас единственной формой представления любых (в том числе и теоретических) результатов работы. Отчеты писали в специальных учтенных тетрадях, а затем печатали на машинке и рассылали весьма ограниченному кругу пользователей. Перед тем как отчет попадал к машинистке, текст просматривал и давал разрешение на печать Н.А. Железцов. Его мнение чаще всего выражалось в виде восклицательных и вопросительных знаков, галок, волн и других фигур. Устных, а тем более письменных пояснений, как правило, не следовало. Что, как и почему надо исправить, автору следовало понять самому, однако во всех случаях требовалось такое же, как у него самого, строгое и ясное изложение мыслей, четкие и недвусмысленные формулировки. Хорошо помню, как однажды изучение и расшифровка поставленных им знаков заставили меня не только переписать отчет целиком, но и дополнить его результатами специально проделанной работы. Остается добавить, что забота Н.А. Железцова о качестве рукописей сотрудников никак не означала необходимости включения его в число авторов. Об этом не могло даже быть и речи.

Заботился Н.А. Железцов и о том, чтобы содержание работы сотрудника и роль, которую он играл в лаборатории, соответствовали его возможностям и особенностям характера. Скажу о себе. Заметив, например, мое стремление к расширению круга общения и некоторое умение быстро находить контакт с разными людьми, он систематически поручал мне решение вопросов «на стороне». В основном это сводилось к изучению особенностей проектируемых объектов, согласованию целей и программ совместных действий, получению исходных данных.

Пополнялся коллектив за счет выпускников радиофака. Это были выпускники кафедры теории колебаний — в основном те, кто обладал нужными качествами. В процессе подбора кандидатов сотрудники лаборатории действовали как разведчики и ходатаи, но подробное изучение кандидатов и окончательное решение было исключительно в компетенции Н.А. Железцова. Он не боялся брать в штат самостоятельных твердых характером людей и редко в них ошибался. Когда молодые успешно «подрастали», то получали право на свою, достаточно автономную, часть тематики.

Вообще отношение Николая Александровича к молодым сотрудникам строилось на принципе максимума их самостоятельности с учетом «самодвижения». Последнее означало приблизительно следующее: не можешь — дело твое, а «списывать» не дам! Что же касается первого поколения молодых сотрудников лаборатории, то с самого начала Н.А. Железцов позаботился о наших прямых контактах с теми, кто определял научную и техническую политику в соответствующей части проекта. В этом он никогда не был промежуточным звеном: нас и нашу работу не понаслышке знали академики И.К. Кикоин, С.Л. Соболев, М.Д. Миллионщиков, А.П. Александров, главные конструкторы И.И. Африкантов, Н.М. Синев, Н.А. Доллежаль. Не раз доводилось мне бывать и брать консультации у академика А.Н. Тихонова. М.Д. Миллионщиков высоко ценил и активно продвигал основанные на исследовании математических моделей предложения Е.Ф. Сабаева, направленные на локализацию возмущений, вызываемых в каскаде сбоем в работе отдельной ступени.

К концу 60-х годов в лаборатории работало уже более 20 человек. Естественным путем определилась специализация существовавших двух исследовательских групп, появилась необходимость в организации новых. Выросли вполне зрелые и квалифицированные руководители, способные самостоятельно ставить и решать сложные теоретические и расчетные задачи.

В августе 1970 года лаборатория была преобразована в отдел в составе четырех практически самостоятельных лабораторий, которые возглавили кандидаты наук В.Д. Горяченко, Е.Ф. Сабаев, А.В. Сергиевский, Л.В. Смирнов (позднее заведовать лабораторией вместо А.В. Сергиевского стал В.В. Знышев).

Теперь и до ухода на пенсию заведующий отделом Н.А. Железцов играл роль центра, наличие которого гарантировало коллектив от всякого рода неприятностей, вызванных как внешними, так и внутренними причинами. Успех в решении этой непростой задачи в большой степени зависел от личных качеств заведующего отделом. О том, каковы эти качества, рассуждает сотрудник лаборатории и отдела С.Л. Горяченко: «На мой взгляд, этого человека отличали своеобразные черты характера, каждая из которых так или иначе сказывалась на руководимом им коллективе. Это был подлинный интеллигент, как говорят, интеллигент старого образца или старой закалки. Высокая культура сочеталась у него с тонким и мягким чувством юмора и деликатностью в обращении. Правда, в последние годы жизни характер Н.А. испортился. Он стал придирчив не по делу, раздражителен. Но человеческий стержень и тогда остался в нем неизменным: это была порядочность. Он был не мелочен, никогда не опускался до пересудов, сплетен, «подсиживания», а тем более подлости. Ничего подобного не было в отделе за все время его существования... Если можно так выразиться, то в целом отдел был высококультурным и порядочным» [10].

С преобразованием лаборатории в отдел ситуация в коллективе существенно изменилась. Теперь с сотрудниками непосредственно и постоянно общались заведующие лабораториями, а каждый из них был непростой личностью и вел лабораторию своим путем. В этих обстоятельствах одним из средств сохранения единства стала хорошо налаженная взаимная информация. Сам собой, без нажима и административного давления возник отдельский учебно-научный семинар. На заседаниях детально изучались появлявшиеся в печати монографии, докладывались новые результаты и направлявшиеся в печать статьи, обсуждались доклады принимавших выполненные работы комиссий и многое, многое другое. Во всех этих мероприятиях неформальное и заинтересованное участие принимал заведующий отделом Н.А. Железцов.

Принцип «самодвижения» и созданная в отделе благоприятная творческая обстановка дали свои плоды: четыре сотрудника отдела — Е.Ф. Сабаев, В.Д. Горяченко, Л.В. Смирнов и А.Я. Моничев стали докторами наук, профессорами. Свыше сорока человек защитили кандидатские диссертации. Ныне работающий в ОКБМ Б.И. Моторов — доктор наук и лауреат Государственной премии. Свой путь в науку начинала в лаборатории Н.А. Железцова доктор наук, профессор и президент Общества женщин-математиков И.С. Емельянова. Заведует отделом, созданным Н.А. Железцовым, учит студентов мехмата профессор Л.В. Смирнов, преподает на биофаке профессор А.Я. Моничев. В этом году вернулся в университет и работает на мехмате бывший сотрудник отдела доктор наук Ю.А. Кузнецов. Весомый вклад в развитие науки и образования в системе ННГУ внес безвременно скончавшийся в 1990 году профессор В.Д. Горяченко, возглавлявший родной отдел, кафедру на мехмате и НИИ механики при ННГУ. В течение 7 лет работал заведующим кафедрой профессор Е.Ф. Сабаев. Успешно вел вперед факультет декан доцент И.С. Постников. Около 25 лет работал директором НИИ при ННГУ старший научный сотрудник А.В. Сергиевский.

В начале 50-х годов основным техническим средством, помогавшим в исследовании динамики конкретных систем, были электронные модели-аналоги. Для того чтобы иметь такой аналог, надо было написать уравнения математической модели и привести их к безразмерному виду. Затем, используя электронные лампы (полупроводников тогда еще не было), конденсаторы, катушки индуктивности и сопротивления (резисторы), собрать и отладить электронное устройство, токи и напряжения в котором соответствовали бы (в некотором масштабе) переменным модели. Курсовые и дипломные работы студентов кафедры теории колебаний посвящались разработке и исследованию математических моделей конкретных систем, обладавших какой-либо особой динами-

кой. Они включали, кроме теоретической части, проверочный эксперимент и электронное моделирование. Поэтому студенты, кроме солидной физико-математической подготовки, должны были знать толк в электронике и хорошо владеть паяльником*. Более того, на них рассчитывали, так как их вклад в научную работу кафедры был очень заметным. Тема дипломной работы выбиралась руководителем с таким расчетом, чтобы в процессе ее выполнения получить новые общенаучные и практически значимые результаты. Так, студент-дипломник Н.А. Фуфаев, впоследствии крупный ученый, профессор и заведующий кафедрой ННГУ, изучая теоретически и с помощью созданной им электронной модели-аналога динамику электромагнитного прерывателя (руководители А.А. Андронов и Н.А. Железцов), дал исчерпывающее описание условий, при которых в системе могут возникать сложные периодические движения — многократные и многооборотные предельные циклы.

Студент М.И. Фейгин (ныне профессор и заведующий кафедрой Академии водного транспорта), действуя под руководством Н.А. Железцова, экспериментально подтвердил адекватность математической модели и выводы теории разрывных колебаний на примере одного из основных элементов ЭВМ — триггера.

По инициативе и при участии Н.А. Железцова студентом А.Ф. Сотниковым была создана уже упомянутая ранее электронная модель кинетики ядерного реактора.

На базе ГИФТИ студент Е.Ф. Сабаев при участии А.В. Сергиевского создавал большую электронную модель каскада разделительных машин.

Однако еще раньше, сразу же, как стало известно о первой в США цифровой ЭВМ, А.А. Андронов поставил вопрос о необходимости развертывания работ в этой области. Говорит А.М. Гильман: «До ухода из жизни Александр Александрович успел дать старт работам на кафедре в области дискретных ЭВМ. В это время (1952 год) по инициативе Н.А. Железцова было создано множительное устройство с «ограниченным» числом разрядов (три)... После смерти А.А. Андронова возник вопрос, как продолжать начатые работы... Из бесед с Н.А. Железцовым возникла идея начать делать собственную ЭВМ. Был разработан вариант машины. А.А. Ляпунов согласился его рецензировать. Н.А. Железцов и я ездили для этого в Москву на целую неделю...» [2].

Ведущую роль в выборе структуры и параметров машины играл Н.А. Железцов. Неформальное участие в этом принимал также С.Л. Соболев. В то время он часто бывал в Горьком и заезжал в ГИФТИ. С.Л. Соболев уже имел опыт в создании и применении ЭВМ. Созданная под его руководством «самодельная» ЭВМ успешно работала в Лаборатории измерительных приборов (так тогда назывался Институт атомной энергии). С.Л. Соболев и Н.А. Железцов подробно и жарко обсуждали предлагавшиеся Н.А. Железцовым варианты архитектуры, показатели производительности и вопросы технической реализации будущей машины.

Наиболее сложной проблемой было создание памяти. В ИАЭ применялись рециркуляционные регистры на ртутных линиях задержки. Н.А. Железцов предлагал использовать линии на магнитострикционном эффекте или регистры с рециркуляцией на магнитном барабане. Он демонстрировал С.Л. Соболеву действующий макет малого высокоскоростного барабана с моторчиком от гироскопа, рассказывал об экспериментах выпускника кафедры А.С. Тарантовича с магнитострикционной линией задержки. Верный своим принципам, Н.А. Железцов сразу же организовал А.С. Тарантовичу прямую связь с разработчиками ИАЭ...

Строительство ЭВМ**, которое велось в основном молодыми выпускниками и студентами при повседневном руководстве доцента А.М. Гильмана, продолжалось около 3 лет и завершилось в 1958 году. К моменту ввода ЭВМ в строй ее характеристики вполне соответствовали уровню машин своего класса.

---

*Носителем культуры в конструировании, монтаже и отладке электронных схем был Н.А. Железцов.

**Она известна под названием «машина ГИФТИ» [11].

Это была первая ЭВМ в городе и одна из немногих в стране. Проработала машина ГИФТИ до конца 1961 года.

Так было выиграно время для подготовки кадров пользователей и программистов не только в университете, но и на многих предприятиях города. Появилась возможность создать в ГИФТИ при ГГУ проблемную лабораторию ЭВМ и получить дополнительные аргументы в пользу организации одного из первых в СССР Вычислительного центра. В результате большой организационной работы (основную и решающую роль в этом вновь играл директор ГИФТИ Я.Н. Николаев) и при поддержке Минвуза и Минсредмаша Постановлением правительства СССР Вычислительный центр в ГИФТИ был создан. Потребности в вычислительных мощностях в ГИФТИ и в университете быстро возрастали. Особенно это относилось к исследованиям по проблеме динамики ЯЭУ. Я.Н. Николаев и Н.А. Железцов вновь применили уже отработанную на МН-8 технологию добывания техники. Их усилия увенчались успехом: в июле 1961 года была приобретена самая большая и наиболее совершенная из числа производимых в стране, тоже единственная в городе ЭВМ М-20. С вводом ее в строй появилась хорошая материальная база для подготовки молодых специалистов по вычислительной технике, прикладной и вычислительной математике и кибернетике, для увеличения объема и дальнейшего развития научных исследований. На кафедре была организована подготовка специалистов в области вычислительной техники, она была преобразована в кафедру теории колебаний, автоматического регулирования и вычислительных машин.

В дальнейшем, однако, активность Н.А. Железцова как руководителя кафедры постепенно снижалась, и вскоре его участие в работе кафедры свелось к чтению основного курса теории колебаний. Функции руководства все больше и больше переходили к другим людям. В 1970 году Н.А. Железцов, проработав перед этим год в должности доцента, с факультета уволился.

В рассказе о жизни Н.А. Железцова нельзя обойти вниманием эпопею со строительством катера. Именно здесь сразу и во всей совокупности проявились его выдающиеся способности к научному и инженерному творчеству, его способность увлекаться и целиком отдавать себя предмету увлечения.

Дело это началось в 1959 году, когда молодые сотрудники лаборатории Н.А. Железцова обнаружили на складе и выпросили у дирекции ГИФТИ для прогулок старенькую шлюпку и древний (еще довоенного производства) подвесной мотор. Мощность мотора была три с половиной лошадиной силы, а скорость лодки с ним около 8 километров в час. Катались, как правило, по будням после работы, и Н.А. Железцов был непременным участником*.

В это время по Волге уже ходил созданный Р.Е. Алексеевым в Горьком теплоход на подводных крыльях «Ракета», развивающий скорость свыше 60 километров в час. Р.Е. Алексеев построил также разъездной катер на подводных крыльях с автомобильным мотором мощностью около 100 лошадиных сил.

Это не могло оставить Н.А. Железцова равнодушным. Он сделал расчет на более доступный ему мотор от старой «полуторки». Из расчета следовало, что катер на подводных крыльях с корпусом из дерева вместимостью до пяти человек можно построить. Он встретился с Р.Е. Алексеевым и рассказал ему о своих планах, но тот выразил сомнение в правильности расчета. Н.А. Железцов, однако, верил себе. Он «загорелся»!

Была мобилизована вся доступная информация — довоенные публикации ЦАГИ, немецкие трофейные отчеты, учебники и монографии по строительству корпусов малого флота и теории винтового движителя... Одновременно решались и организационные вопросы: в результате умело поставленной агитационной работы была создана «судостроительная компания». В нее, кроме Н.А. Железцова, который был проектантом, токарем, фрезеровщиком и слесарем высокой квалификации, вошел брат жены —

*Надо, кстати, отметить, что Н.А. Железцов всегда участвовал во всех «неформальных» лабораторских (отдельских) мероприятиях, будь то капустники или походы в театр, поездки в лес за грибами и т.д.

любитель водных развлечений, отдыха на берегу и рыбной ловли А.А. Рябов. Катер был построен, и начались ходовые испытания. Испытания подтвердили правильность заложенных в проект расчетов. С этим согласился и изначальный оппонент Р.Е. Алексеев.

Для сдачи судна в постоянную эксплуатацию требовалась доводка. Ее-то, однако, и не последовало. Слишком разные цели ставили перед собой «акционеры»: один решал техническую проблему, другому был нужен катер для полноценного отдыха. Компания разваливалась, и Н.А. Железцов «потух». Скоростные суда, как и тихоходные лодки, его больше не интересовали...

Еще одно (последнее) увлечение Н.А. Железцова напрямую связано с микробиологией. В 1971 году Н.А. Железцов начал исследования в области разработки и анализа математических моделей аппаратов для выращивания микроорганизмов. Поводом к этому послужило его знакомство с академиком И.Н. Блохиной, ее стремление существенно повысить эффективность производства бактерийных препаратов в руководимом ею институте. Конечная цель работы состояла в определении и нейтрализации лимитирующих производительность процесса факторов. Постановка задачи и возможность сочетания теоретических изысканий с быстрым и качественным экспериментом увлекли Н.А. Железцова. Особенно он ценил внимание, помощь и прямой интерес, который проявляла к этой работе И.Н. Блохина. Результаты не заставили себя долго ждать: в короткий срок удалось, в частности, глубже понять существо механизмов действия неблагоприятных факторов как на начальной (предэкспоненциальной), так и на конечной стадии, внести необходимые поправки в соответствующие уравнения традиционной модели, высказать предложения по изменению технологического регламента [12].

Интенсивная деятельность длилась, однако, недолго. После успешного старта Н.А. Железцов остыл. Сотрудничество с Институтом микробиологии и И.Н. Блохиной успешно продолжил В.Д. Горяченко. Прошло несколько лет, и отдельные работы в ННГУ по математическому моделированию биологических систем превратились в научное направление.

Любил Н.А. Железцов управлять автомобилем. Ремонтные и сервисные работы выполнял всегда сам. Водил машину он в спортивном стиле, но правила соблюдал. Быстро реагировал на окружающую обстановку — сидеть рядом с ним на переднем сиденье было нестрашно. Всякое бывает в жизни. В один из весенних дней 1973 года сильно мотнуло прицеп приближавшегося автопоезда, он оказался на встречной полосе и... тяжелая черепно-мозговая травма.

Несколько месяцев лежал Николай Александрович в больнице и вышел оттуда совсем другим, незнакомым нам, близко знавшим его, человеком. Он потерял всякую уверенность в себе, стал бояться начальства. Начал энергично руководить отделом, слишком ревностно исполнять указания свыше и т.д. Вот тогда-то он и «стал придирчив не по делу и раздражителен». Он чувствовал, что его руководство во многих своих проявлениях излишне, не достигает цели. Это его раздражало еще больше. Сотрудники относились к нему с пониманием, но постепенно он терял и уважение и авторитет.

Здоровье его ухудшалось. В октябре 1983 года, после перенесенного инсульта, он вышел на пенсию.

Скончался Николай Александрович Железцов 4 ноября 1985 года. Лет 40 тому назад поздно вечером мы с ним шли из ГИФТИ домой. Кругом были сугробы, я шел впереди, он — сзади. Неожиданно я подвергся нападению со стороны слегка выпившего крепкого телосложения господина. Н.А. Железцов действовал умело и очень активно. Нападавший бежал, победа была за нами.

А еще Н.А. Железцов очень любил детей.

Таким был мой учитель и наставник Николай Александрович Железцов — яркая звезда на небосклоне Горьковского университета первых тридцати послевоенных лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Железцов Н.А.** Спектральный анализ некоторых сплавов. — Изв. АН СССР. Сер. физич., 1946, т. IX, № 5, с. 623—627.
2. **Гильман А.М.** Воспоминания. — Фонды музея ННГУ. Н. Новгород.
3. **Личное** дело Н.А. Железцова. НИИ механики при ННГУ.
4. **Андронов А.А.** Собрание трудов. — М., АН СССР, 1956, с. 441—473.
5. **Железцов Н.А.** Разрывные колебания. — В кн.: Теория колебаний. — М.: ГИФМЛ, 1959, с. 727—891.
6. **Сабаев Е.Ф.** Системы сравнения для нелинейных дифференциальных уравнений и их приложения в динамике атомных реакторов. — М.: Атомиздат, 1980.
7. **Горяченко В.Д.** Методы исследования устойчивости ядерных реакторов. — М.: Атомиздат, 1977.
8. **Смирнов Л.В.** Математические модели динамики и устойчивость систем принудительной циркуляции теплоносителя. — М.: Энергоатомиздат, 1992.
9. **Сабаев Е.Ф.** Взрывные, неограниченные и глобально ограниченные решения уравнений кинетики реактора с обратной связью по реактивности. — ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1981, вып. 2, с. 10—19.
10. **Горяченко С.Л.** Личный архив.
11. **Гильман А.М.** Некоторые особенности логической структуры машины ГИФТИ и программирования в ее коде (ч. 1). — Изв. вузов. Радиофизика, 1958, т. 1, № 1, с. 141—149.
12. **Железцов Н.А., Угодчиков Н.А.** Математическая модель динамики роста биомассы. — В кн.: Сравнительная физиология и биология микроорганизмов: Сб. научн. трудов под ред. И.Н. Блохиной. Вып. 2. — Горький: Изд. Горьк. ун-та, 1974, с. 67—75.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

При подготовке статьи в сборник автор должен руководствоваться Государственным стандартом «Оригиналы текстовые, авторские и издательские» (ГОСТ 7.3—77). Согласно этому стандарту к авторским оригиналам, передаваемым для издания, предъявляются следующие требования:

1. Экземпляр статьи должен быть первым, отпечатан на одной стороне писчей бумаги форматом 210×297 мм через 2 интервала (головки в таблицах можно через 1 интервал) с полями с левой стороны не менее 20 мм. Статья должна быть составлена в следующем порядке: индекс УДК; заглавие; инициалы и фамилии авторов; место работы каждого автора с почтовым адресом; аннотация на русском и английском языках (не более 10 строк каждая); текст; список литературы; рисунки; подрисуночные подписи (на отдельном листе); реферат (15—17 строк на отдельном листе).

2. Содержание статьи должно быть кратким и четким. Исключаются общие рассуждения, известные положения. Не допускается дублирование материала в тексте, таблицах, подрисуночных подписях. Необходимо соблюдать единообразие в написании терминов, наименований физических величин и единиц измерения, условных обозначений, сокращений, символов. Наименования и обозначения единиц физических величин необходимо приводить в системе СИ.

3. Таблицы нумеруются, каждая таблица должна иметь заголовок. Сокращения в графах таблицы не допускаются. В тексте необходимы ссылки на все таблицы. Таблицы печатаются в общем тексте после первой ссылки.

4. Формулы и буквенные обозначения величин должны быть размечены и сразу расшифрованы. Формулы нумеруются арабскими цифрами, номер ставится с правой стороны листа в круглых скобках.

5. Наибольший размер рисунка 14×21 см, наименьший 8×21 см. Чем крупнее рисунок, тем крупнее должны быть обозначения на нем (для того чтобы при уменьшении рисунка были читаемы обозначения). На рисунках допускается минимальное число обозначений — краткие цифровые (по порядку номеров слева направо или по часовой стрелке) или буквенные обозначения. Все пояснения выносятся в подрисуночные подписи. На обороте каждого рисунка указываются фамилии авторов, название статьи, номер рисунка, обозначение верха и низа.

6. Ссылки на литературу в тексте даются по порядку арабскими цифрами в квадратных скобках. Список литературы составляется в той последовательности, в которой приводятся ссылки на литературу.

7. Список литературы следует оформлять в соответствии с Государственным стандартом «Библиографическое описание произведений печати» (ГОСТ 7.1—76, раздел 7), в частности, необходимо указывать:

а) для журнальных статей — фамилии и инициалы авторов (не менее трех первых), название статьи, название журнала (без кавычек), год, том, выпуск, номер, страницы;

б) для книг — фамилии и инициалы авторов, полное название книги, место издания, издательство (без кавычек), год издания;

в) для авторефератов диссертаций — фамилию и инициалы автора, название автореферата диссертации, на соискание какой ученой степени написана диссертация, место и год защиты;

г) для препринтов — фамилии и инициалы авторов, название препринта, наименование издающей организации, шифр и номер, место и год издания;

д) для патентов — фамилии и инициалы авторов, название патента, страну, номер и класс патента, дату и год заявления и опубликования патента.

ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ

Серия: Физика ядерных реакторов

Выпуск 2

Ответственный за выпуск С.М. Зарицкий

Редакторы В.Б. Усищева от НИИ механики, О.В. Базанова, Г.Я. Кармадонова
Технический редактор Н.Н. Неганова
Корректор Н.В. Бокша

Подписано в печать 24.12.99. Формат 70×108/16
Печать офсетная. Усл. печ. л. 15,0. Уч.-изд. л. 16,5+0,3 вкл.
Тираж 300. Индекс 3646. 19 статей. Заказ 83

Отпечатано в Российском научном центре «Курчатовский институт»
123182, Москва, пл. Академика Курчатова

ISSN 0205—4671. Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Физика ядерных реакторов, 1999, вып. 2, 1—176

Индекс 3646