

6213
КЧБ
МИФИ

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

А. А. Кирютин В. С. Харитонов



ФАКУЛЬТЕТ
ТЕХНИЧЕСКОЙ
ФИЗИКИ

**ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ
В ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОЕКТАХ АЭС**

Москва 1994

0113
143

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

А. А. Кирютин В. С. Харитонов

ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ
В ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОЕКТАХ АЭС

Утверждено
редсоветом института
в качестве учебного пособия

Москва 1994

□



УДК 621.039.546.001.63(075.8)

К и р ю т и н А.А., Х а р и т о н о в В.С. Тепловые расчеты в технических проектах АЭС: Учебное пособие. М.: МИФИ, 1994. — 20 с.

Учебное пособие является руководством для выполнения курсовых проектов по тепловому расчету ядерных энергетических установок (ЯЭУ). Оно включает описание примера разработки алгоритма программного комплекса для расчета теплогидравлических процессов в первом контуре ЯЭУ.

Учебное пособие предназначено для студентов факультета "Ф" МИФИ, а также других вузов физико-энергетического профиля.

© Московский государственный инженерно-физический институт (технический университет), 1994 г.

ISBN 5-7262-0157-5

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации ядерных энергетических установок (ЯЭУ) иногда возникают ситуации, называемые отклонением от штатного режима работы. Очевидно, что нештатная работа ЯЭУ, независимо от первопричины, не должна приводить к возникновению аварийных ситуаций. Поэтому в настоящее время установлены специальные требования и критерии, которым должны удовлетворять промышленные установки. С учетом этих требований и проводится разработка технических проектов современных ЯЭУ.

В обязательном порядке в проектах рассматривается спектр возможных нештатных и аварийных режимов, анализируются происходящие при этом физические процессы. Такой анализ надежности базируется на предварительных расчетных и экспериментальных исследованиях, а в особо ответственных случаях — на натуральных экспериментах. Обычно для натуральных экспериментов требуются дорогие установки и стенды. Но главное препятствие заключается в том, что натурные эксперименты сами сопряжены с опасностью возникновения серьезных аварий при неблагоприятном развитии исследуемых режимов. Поэтому все большее значение обретают расчетно-теоретические исследования. В результате таких исследований создается комплекс взаимосвязанных программ для ЭВМ, который представляет собой математическую модель реакторной установки (РУ). Математическая модель позволяет прогнозировать поведение РУ в различных режимах и служит основой для оптимизации конструкторских решений и параметров тепловой схемы.

Существует тесная взаимосвязь между численным моделированием и проектно-конструкторской работой: результаты численных расчетов указывают, в каком направлении следует менять параметры схемы или конкретной конструкции, а вновь выбранные конструктивные параметры проверяются на следующем этапе модельных расчетов. С этой целью вносятся соответствующие изменения в исходные данные, отдельные программы и программные комплексы. Каким образом конструктивные характеристики узлов или параметры схемы воплощаются в систему взаимосвязанных программ? Ответ на этот вопрос удобнее всего пояснить на конкретных примерах.

I. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОУПРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПЕРВОМ КОНТУРЕ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

При описании взаимосвязанных физических процессов конечные результаты расчетов по одной программе служат исходными данными для другой. Рассмотрим это на примере последовательности алгоритмов программ для расчета температуры топлива в поперечном сечении тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ) ядерного реактора, охлаждаемого однофазным теплоносителем (рис. I).

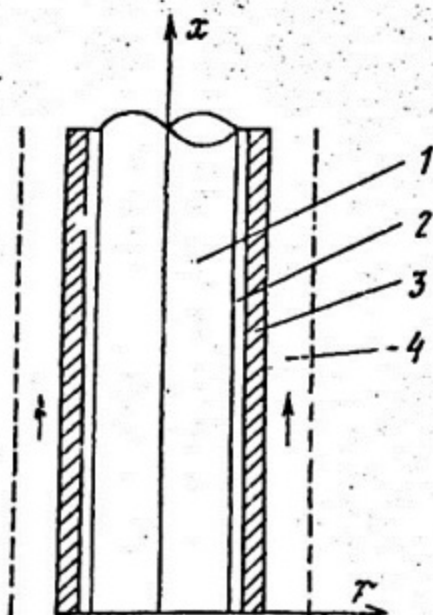


Рис. I. Тепловыделяющий элемент:
1 - топливо; 2 - контактный зазор; 3 - оболочка; 4 - канал охлаждения



Рис. 2. Схема программного модуля ПОДОГРЕВ

Для решения данной задачи необходимо знать изменение температуры теплоносителя T по длине канала, которое определяется уравнением теплового баланса:

$$G c_p(T) dT = \Pi q_F dx. \quad (I.I)$$

Здесь Πq — периметр поверхности твэла, участвующей в теплообмене с теплоносителем; q_F — плотность теплового потока в сечении твэла с координатной x ; dx — бесконечно малый участок длины твэла; G — расход теплоносителя в канале охлаждения; C_p — удельная теплоемкость теплоносителя; dT — подогрев теплоносителя на участке dx .

Программный модуль, реализующий решение уравнения (I.1), назовем ПОДОГРЕВ и обозначим квадратиком на рис.2. На этом рисунке входящими стрелками обозначим необходимые для решения исходные данные. Заметим, что среди исходных данных должны присутствовать конструктивные характеристики, а именно — диаметр и высота твэла (Наз.). Выходящей стрелкой на схеме показан конечный результат: температура теплоносителя в интересующем нас сечении.

Для численного решения уравнения (I.1) вся высота канала разбивается на отрезки Δx_i . Количество разбиений выбирается таким образом, чтобы в пределах каждого отрезка выполнялись следующие соотношения:

$$\frac{\Delta q_F}{q_F} \ll 1 \quad \text{и} \quad \frac{\Delta T}{T} \ll 1. \quad (I.2)$$

Тогда на длине отрезка разбиения C_p и q_F приблизительно постоянны, и вместо (I.1) можно записать его конечно-разностный аналог:

$$\Delta T_i = \left(\frac{\Pi q}{G} \cdot \frac{q_F}{C_p} \right)_i \cdot \Delta x_i. \quad (I.3)$$

Размер шага разбиения Δx_i может уточняться непосредственно в процессе счета. Так, в программе "Канал-4" — составной части разработанного в ОКБ "Гидропресс" комплекса "Коралл", которая предназначена для анализа температуры в активной зоне (АЗ) при нарушении герметичности первого контура, количество участков разбиения каналов по высоте варьируется от 4 до 20.

Подогрев теплоносителя по длине канала, полученный с помощью программного модуля ПОДОГРЕВ, необходим для расчета радиального поля температуры в твэле, в частности температуры оболочки и температуры топлива. Обе эти величины вычисляются с помощью программного модуля, который назовем ТВЭЛ.

Температура оболочки твэла и температура топлива определяются из совместного решения уравнений теплопроводности, записанных для топлива и оболочки:

$$\begin{aligned} (pc)_T \frac{\partial T_T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_T \frac{\partial T_T}{\partial r} \right) + q_v; \\ (pc)_0 \frac{\partial T_0}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial r} \right). \end{aligned} \quad (I.4)$$

Условие сшивки на границе контакта топлива с оболочкой

$$-\lambda_T \frac{\partial T_T}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = -\lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = \alpha_{кон} (T_T - T_0), \quad (I.5)$$

где T_T — температура топлива; T_0 — температура оболочки; $c_T, c_0, \lambda_T, \lambda_0$ — теплоемкости и коэффициенты теплопроводности топлива и оболочки; $\alpha_{кон}$ — проводимость контакта топливо-оболочка; r_1 — радиус топливного сердечника; q_v — мощность удельного тепловыделения в твэле. Условие сшивки на границе контакта оболочки с теплоносителем

$$-\lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = \alpha (T_0 - T(x)), \quad (I.6)$$

где α — коэффициент теплоотдачи; $T(x)$ — температура теплоносителя; r_2 — внешний радиус твэла.

Численное решение задачи (I.4) может быть получено различными методами [1]. Кратко рассмотрим один из способов решения. Твэл разбивается по радиусу на кольцевые слои. Шаги разбиения выбираются так, чтобы в выделенных кольцевых слоях выполнялись условия

$$\Delta T_{T(0)} / T_{T(0)} \ll 1 \quad \text{и} \quad \Delta q_v / q_v \ll 1. \quad (I.7)$$

Далее в пределах каждого слоя проводится интегрирование соответствующего уравнения теплопроводности (I.4) по пространственной координате. В результате получается система обыкновенных дифференциальных уравнений, которая, в свою очередь, при конечно-разностном представлении производных по времени сводится к системе линейных уравнений.

Для решения системы (I.4) необходимо задать конструктивные характеристики твэла, а также другие условия однозначности: мощность реактора в каждый момент времени, теплофизические свойства топлива и оболочки, значения контактного термического сопротивления, коэффициента теплоотдачи и т.д.

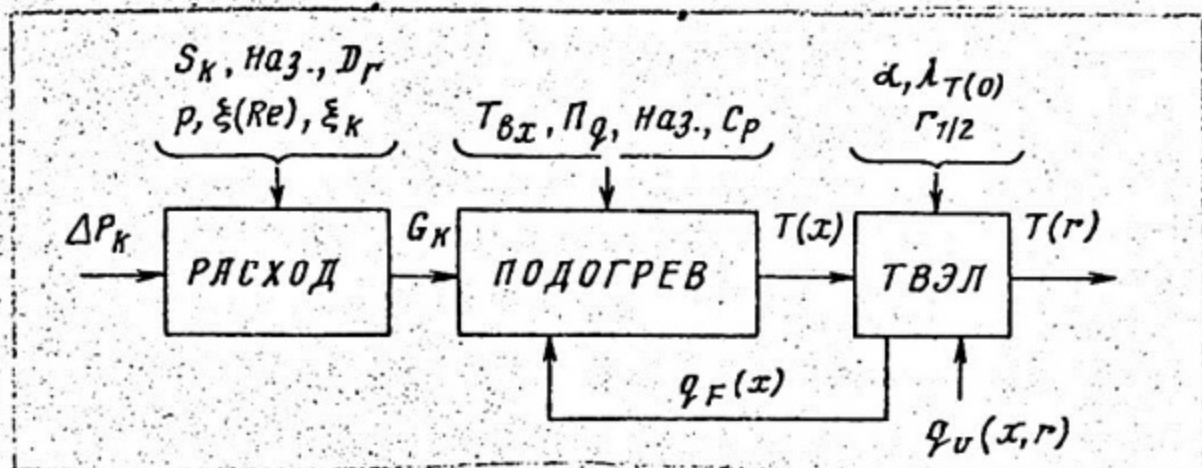


Рис.3. Совместная схема программных модулей РАСХОД, ПОДОГРЕВ и ТВЭЛ

Из схемы, представленной на рис.3, видно, что цепочка программных модулей включает программный модуль РАСХОД, который предназначен для расчета расхода теплоносителя G_k в рассматриваемом канале.

Расход теплоносителя в канале определяется на основе уравнения Дарси:

$$dP = \frac{\rho w^2}{2} \left[\frac{dx}{D_r} \xi(Re) \right]. \quad (I.3)$$

В интегральной форме оно имеет вид

$$\Delta P_k = G_k^2 X. \quad (I.9)$$

Здесь $X \equiv \frac{1}{2\rho S_k^2} \left[\frac{H_{A3}}{D_r} \xi(Re) + \xi_k \right]$ — величина, которую

иногда называют гидравлической характеристикой канала; $\Delta P_k = P_{вх} - P_{вых}$ — разность давлений на входе в k -й канал и выходе из него ($k = 1 \div n$); ρ — плотность теплоносителя в канале; S_k — проходное сечение канала по теплоносителю; H_{A3} — высота канала (активной зоны); $D_r = \frac{S_k}{\pi q} \cdot 4$ — эквивалентный гидравлический диаметр канала; $\xi(Re)$ — коэффициент трения о стенки канала; Re — критерий Рейнольдса; ξ_k — коэффициент местного сопротивления.

Проведем анализ схемы на рис.3 и сформулируем некоторые промежуточные выводы.

1. Часть входных величин, таких, как плотность $\rho(T)$, теплоемкость $C_p(T)$ или коэффициент теплопроводности $\lambda(T)$, характеризуют свойства материалов. Совокупность программ, рассчитывающих свойства материалов, образует так называемое инвариантное обеспечение математической модели. К инвариантному обеспечению относится и группа программ, обеспечивающих ввод исходных данных и вывод расчетных результатов.

2. Программы, описывающие конкретные физические процессы, относятся к группе функциональных программных комплексов.

3. Входная величина $q_v(x,r)$ и связанная с ней q_F не могут быть получены на основе только теплогидравлических расчетов. Поэтому к цепочке программ, изображенных на рис.3, следует подключить программный комплекс нейтронно-физических расчетов для определения q_v .

4. Температуры оболочек и топлива с точки зрения безопасности представляют самостоятельный интерес. Кроме того, они играют роль входных величин для нейтронно-физического программного комплекса, а также для программного комплекса прочностных расчетов (рис.4).



Рис.4. Схема программного комплекса теплогидравлических расчетов активной зоны реактора

Теперь на основании выводов 1-4 можно перейти к анализу входной величины ΔP_K . Для упрощения дальнейших рассуждений примем следующие допущения.

1. Давление в напорной камере реактора всюду одинаково и равно $P_0 = const$.

2. Перед каждым каналом установлено местное сопротивление гидравлического профилирования ξ_k , понижающее давление на входе в канал до значения $P_{вх}^k$.

3. На выходе всех каналов (т.е. в сливной плоскости) давление всюду одинаково и равно $P_{вых}$.

Соответствующая гидродинамическая картина интерпретируется схемой на рис. 5. Здесь объединены каналы с одинаковыми гидравлическими характеристиками профилирующих устройств

$$\chi_k = \frac{\xi_k}{2\rho S_k^2} \quad (I.10)$$

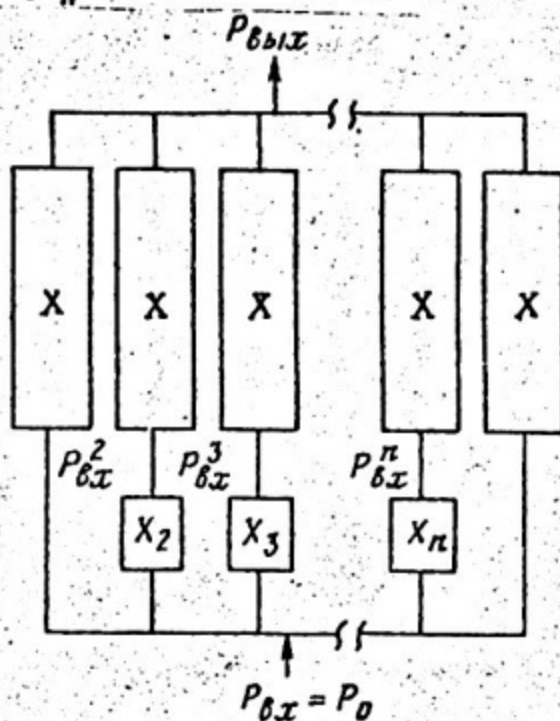


Рис. 5. Гидравлическая схема активной зоны реактора

В наиболее напряженных (например, центральных) каналах, $\xi_1 = 0$ и перепад давления

$$\Delta P_1 = P_0 - P_{вых} = \Delta P_0, \quad (I.11)$$

а расход определяется только гидравлической характеристикой самого канала X по формуле (I.9).

Возможные протечки и заборы теплоносителя на различные нужды, например на охлаждение корпуса, моделируются дополни-

тельными условными каналами с соответствующими характеристиками χ_y .

Следует заметить, что конкретный вид эквивалентной схемы (см. рис. 5) полностью определяется принятой конструкцией гидравлических проходов для теплоносителя в реакторе. Если меняется конструкция, то соответствующие изменения претерпевает и схема. Независимо от схемных вариаций это типичная задача для численного решения на ЭВМ: найти поканальные расходы и перепады при заданных значениях χ , $P_{\text{вых}}$ и P_0 . Присвоим программному модулю, в котором определяются поканальные перепады давления и расходы, имя ПЕРЕПАД (программный модуль РАСХОД является частью программного модуля ПЕРЕПАД). Исходными данными для него служат полный перепад давления $\Delta P_0 = P_0 - P_{\text{вых}}$ и все гидравлические характеристики χ , χ_k , χ_y . Можно ввести обобщенную гидравлическую характеристику активной зоны реактора $\chi_{\text{АЗ}}$, для которой

$$\Delta P_0 = \chi_{\text{АЗ}} \cdot G_{\Sigma}^2, \quad (I.12)$$

где $G_{\Sigma} = \sum_k G_k$ — расход теплоносителя через реактор, равный сумме всех параллельных расходов по отдельным каналам. Поскольку величина $\chi_{\text{АЗ}}$ в каждом конкретном случае выражается через задаваемые χ , χ_k , χ_y , то для программы ПЕРЕПАД можно указать другой набор исходных данных, а именно: конструктивно определяемые гидравлические характеристики χ , χ_k , χ_y , и суммарный расход через реактор G_{Σ} . Последний определяется стационарным уравнением теплового баланса реакторной установки (РУ):

$$Q = G_{\Sigma} C_p \Delta T. \quad (I.13)$$

Здесь ΔT — средний подогрев теплоносителя в реакторе, который выражается через расходы и подогревы в каналах

$$\Delta T = \frac{\sum_k G_k \Delta T_k}{\sum_k G_k}, \quad (I.14)$$

а Q — суммарная мощность тепловыделения в реакторе, определяемая следующим соотношением:

$$Q = \int_{V_{\text{телов}}} q_v dV. \quad (I.15)$$

Если мощность тепловыделения Q не равна тепловой энергии, отводимой теплоносителем от реактора $G_{\Sigma} C_p \Delta T$, то в РУ реализуется нестационарный тепловой режим.

Суммарный напор G_{Σ} рассчитывается с помощью программного модуля НАПОР (см. рис. 4). Расчет проводится по эквивалентной схеме первого контура РУ, представленной на рис. 6. Из схемы видно, что для функционирования контура циркуляционный насос (ГЦН) должен создавать напор ΔP_{Σ} , равный сумме всех перепадов давления по контуру:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{РУ} + \Delta P_{ПТ} + \Delta P_{ГЦТ}, \quad (I.16)$$

где $\Delta P_{РУ}$ - перепад давления в РУ, $\Delta P_{ПТ}$ - перепад давления на участке потребления тепла (ПТ), $\Delta P_{ГЦТ}$ - перепад давления на длине главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ).

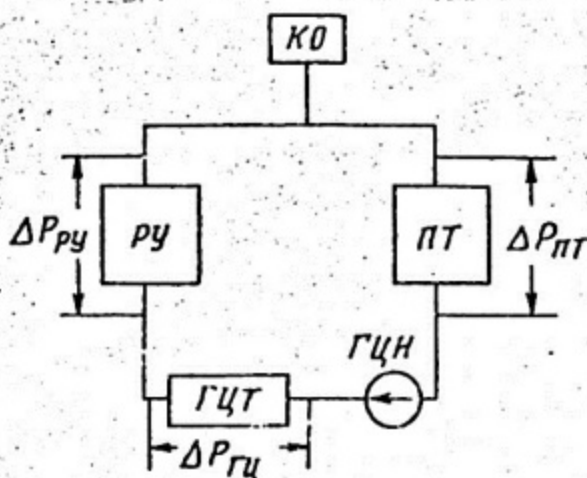


Рис. 6. Гидравлическая схема первого контура реакторной установки

Соотношение (I.16) на начальном этапе должно использоваться для оценок необходимого суммарного напора в первом контуре ΔP_{Σ} , который требуется для установления необходимых характеристик ГЦН. На этой стадии гидравлические характеристики элементов первого контура X_i могут быть заданы следующим образом:

$X_{РУ}$ - на основе эскизного проекта АЗ, в котором должна содержаться оценка G_{Σ} ;

$X_{ПТ}$ - на основе огласования проектных требований к первому контуру РУ и к потребителю тепла;

$\chi_{ГЦТ}$ — на основе компромисса между двумя противоположными тенденциями: с одной стороны, увеличение диаметра ПЦТ приводит к снижению затрат на циркуляцию теплоносителя и, следовательно, снижает затраты по статье ПЦН; с другой стороны, увеличение диаметра ПЦТ потребует утолщения его стенок и, следовательно, повысит затраты по статье ПЦТ. Насколько удачным оказался первоначальный выбор характеристик $\chi_{РУ}$, $\chi_{ПТ}$ и $\chi_{ГЦТ}$, можно оценить в последующих модельных расчетах.

После принятия решения о напоре ПЦН величины ΔP_{Σ} и θ_{Σ} образуют основополагающую зависимость — характеристику ПЦН:

$$\Delta P_{\Sigma} = f(\theta_{\Sigma}), \quad (I.17)$$

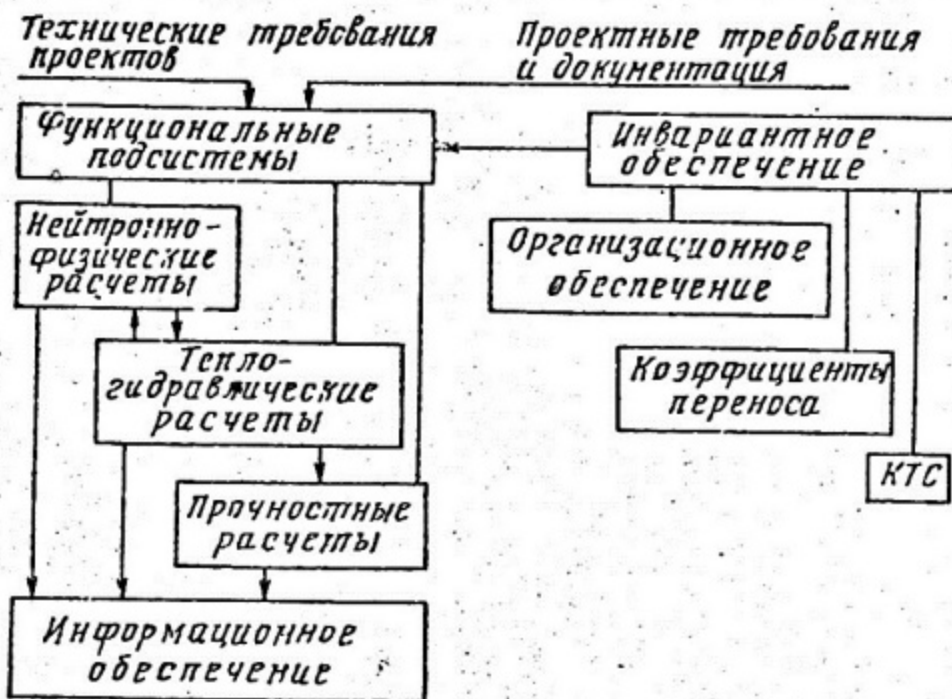
которая используется как в программе НАПОР, так и в других программах, описывающих переходные и аварийные режимы.

Возвращаясь к соотношениям (I.12), (I.16) и полагая характеристики $\chi_{РУ}$, $\chi_{ПТ}$, $\chi_{ГЦТ}$ известными, приходим к заключению, что теплогидравлический комплекс расчетных программ математической модели первого контура РУ замкнут по входным и исходным данным. Заметим, что дополнительными входными параметрами программного комплекса могут являться различные по природе возмущения, приводящие к нестационарным режимам (примеры будут рассмотрены в п.3).

В существующих моделях РУ первый контур разбит на значительно большее число элементов по сравнению с представленными на рис.6. Это объясняется тем, что, кроме активной зоны, и другие элементы контура также требуют постоянного температурного контроля. В нестационарных условиях требуется учитывать теплоемкость трубопроводов, корпуса, труб ПТ и других узлов. Чтобы учесть эти факторы, для каждого элемента создается соответствующий ему программный модуль. Цепочка рассуждений и процедура разработки модулей примерно аналогичны тем, что использовались выше по отношению к АЗ.

Таким образом, математическая модель первого контура РУ может быть представлена изображенной на рис.7. упрощенной структурной схемой функциональных и инвариантных модулей.

Конкретным примером математической модели РУ служит программный комплекс "Коралл", разработанный в ОКБ "Тидропресс".



Фиг.7. Структурная схема математической модели первого контура реакторной установки

В завершение описания программного комплекса сделаем замечание по поводу достоверности численных результатов. Можно указать несколько источников возможных ошибок.

1. Как правило, исходные данные известны с некоторой погрешностью. Поэтому конечный результат также характеризуется погрешностью, которая часто бывает больше погрешности входных величин. Заметим, что в математической модели результаты вычислений по одной программе служат исходными данными для другой. В этих условиях нарастание погрешности счета требует отдельного анализа.

2. Для того чтобы сделать приемлемым описание физического процесса, довольно часто приходится прибегать к различным допущениям и упрощениям. Связанные с этим погрешности вносят свой вклад в конечный результат.

3. Поскольку математическая модель призвана анализировать развитие аварийных ситуаций без проведения рискованных экспериментов, то не вызывает никаких сомнений необходимость убедитель-

тельного обоснования достоверности численных результатов. При обосновании теплогидравлических расчетов особое внимание уделяется

- а) обоснованию методических допущений и упрощений;
- б) анализу устойчивости и сходимости численных алгоритмов;
- в) верификации программ путем сопоставления с экспериментальными данными.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПЕРВОМ КОНТУРЕ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Рассмотрим особенности применения методики расчета нестационарных теплогидравлических процессов, которая описана в разделе I, для анализа некоторых аварийных ситуаций в первом контуре РУ.

2.1. Перекрытие проходного сечения одного из каналов охлаждения активной зоны

Рассматривается следующая ситуация: вход в один из каналов охлаждения активной зоны перекрывается посторонним предметом, в результате чего расход теплоносителя через этот канал резко сокращается. (Подобная авария произошла на АЭС "Энрико Ферми".)

Для решения задачи необходимо задать изменение расхода в рассматриваемом канале. Это можно сделать при помощи увеличения значения гидравлической характеристики χ_k этого канала. Задавая различные значения гидравлической характеристики в интервале от χ_k до ∞ , численными расчетами можно получить зависимость характерных температур в канале от степени перекрытия.

2.2. Обесточивание ПЦН

Рассматривается следующая ситуация: обесточивается ПЦН, одновременно происходит отказ в системе управления защитой (СУЗ). (так называемая проектная авария).

Насосы первого контура в современных РУ снабжаются массивными маховиками, увеличивающими время выбега при потере питания.

Если из каких-то (допустим, стендовых) испытаний известна зависимость изменения оборотов ПЦН от времени, известны характеристики насосов при различных оборотах, то обесточивание ПЦН можно интерпретировать переменным во времени напором $\Delta P_{\Sigma}(\tau)$. Одновременно следует задать зависимость $q_{\nu}(\tau)$, определяемую характером отказа в системе СУЗ.

2.3. Течь теплоносителя из первого контура

Рассматривается следующая ситуация: в силу тех или иных причин происходит разгерметизация первого контура РУ и появляется течь теплоносителя (такая ситуация моделируется практически во всех технических проектах ЯЭУ).

Для решения задачи необходимо задать место течи и расход теплоносителя через нее.

Допустим, что течь образовалась в месте сварки ПЦТ с корпусом на входе теплоносителя в реактор.

В принципе расход через течь G_T следует задать как функцию времени. Пока течь мала, развитие событий целесообразно разделить на несколько этапов. Пусть на первом этапе компенсатор объема (давления) справляется с течью в том смысле, что давление на входе ПЦН остается неизменным. Несмотря на это, в активную зону попадает уже меньшее количество теплоносителя. Чем больше течь, тем меньше расход теплоносителя через АЗ. Если нет неограниченного нарастания расхода через течь, то самая неприятная ситуация будет соответствовать максимальному установившемуся значению течи G_T . Поэтому рассмотрим стационарное состояние с максимальным расходом G_T . В предельно упрощенном виде алгоритм расчета малой течи может быть проиллюстрирован схемой, приведенной на рис. 8. Эта схема отличается от схемы нормального функционирования РУ (см. рис. 6) наличием дополнительных расходов G_T и G_{KO} , а также иными значениями перепадов давления $\Delta P'_{РУ}$, $\Delta P'_{ПТ}$ и $\Delta P'_{ПЦТ}$.

Используя выражения (1.9), (1.16) и (1.17), запишем системы уравнений, определяющие напоры и расходы в нормальном и аварийном режимах:

нормальный режим

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{РУ} + \Delta P_{ПТ} + \Delta P_{ПЦТ} = G_{\Sigma}^2 (X_{РУ} + X_{ПТ} + X_{ПЦТ}); \quad (2.1)$$

$$\Delta P_{\Sigma} = f(G_{\Sigma});$$

аварийный режим

$$\Delta P'_\Sigma = \Delta P'_{PY} + \Delta P'_{PT} + \Delta P'_{ГЦТ} = (\sigma'_\Sigma - \sigma'_T)^2 \chi_{PY} + (\sigma'_\Sigma)^2 (\chi_{PT} + \chi_{ГЦТ}); \quad (2.2)$$

$$\Delta P'_\Sigma = f(\sigma'_\Sigma).$$

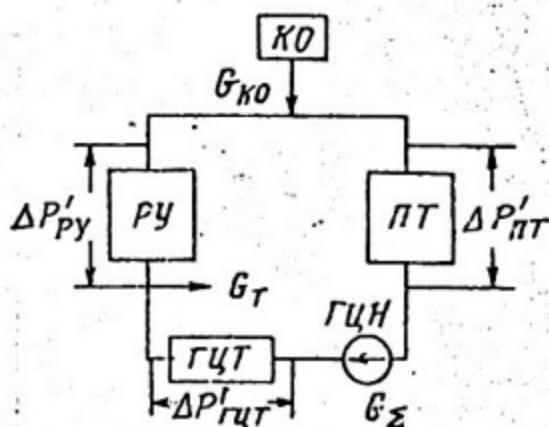


Рис. 8. Гидравлическая схема первого контура РУ с течью

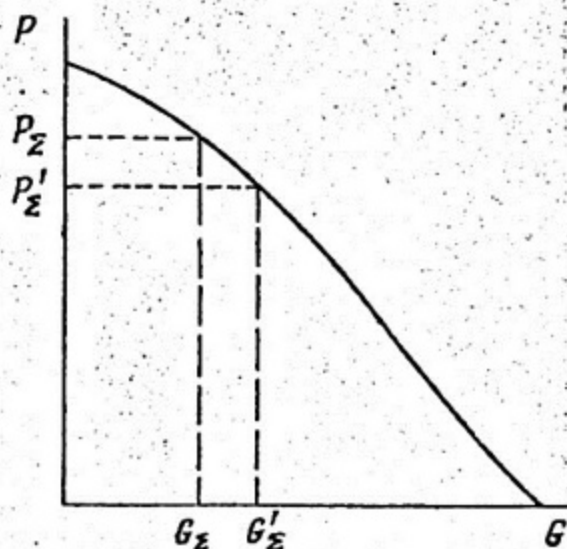


Рис. 9. Напорная характеристика ГЦТ

Обычно характеристика ГЦТ (1.17) (например, в РУ с ВВЭР или БН) имеет вид, подобный изображенному на рис. 9. Предположим, что в области номинальных параметров зависимость, показанная на рис. 9, экстраполируется линейной функцией* :

$$\Delta P = H - BG. \quad (2.3)$$

Допустим далее, что при появлении малой течи для новых значений напора $\Delta P'$ и расхода G'_Σ соотношение (2.3) остается

* Например, ГЦТ РУ БН-600 в диапазоне расходов $10^4 \leq G < 1,5 \cdot 10^4$ имеет напорную характеристику вида $H \approx 140 - 8 \cdot 10^{-3} G$. Здесь G - в м³/ч, H - в м.

справедливым. В этих условиях можно оценить изменение расхода через активную зону $G'_{PY} = G'_\Sigma - G_T$ по отношению к исходному значению G_Σ .

Для этого разрешим уравнения (2.1), (2.2) и (2.3) относительно G'_Σ . Обозначим $\chi_0 = (\chi_{PY} + \chi_{ПТ} + \chi_{ГЦТ})$ и положим для простоты $\chi_{PY} \approx \chi_{ПТ} \approx \chi_{ГЦТ}$. Тогда

$$G'_\Sigma = \frac{G_T}{3} - \frac{B}{2\chi_0} \cdot \sqrt{\left(\frac{G_T}{3} - \frac{B}{2\chi_0}\right)^2 + G_\Sigma^2 + \frac{B}{\chi_0} G_\Sigma - \frac{G_T^2}{3}}, \quad (2.4)$$

откуда

$$\frac{G'_{PY}}{G_\Sigma} = \frac{G'_\Sigma - G_T}{G_\Sigma} = -\frac{2}{3} \left(\frac{G_T}{G_\Sigma}\right) \frac{B}{2\chi_0 G_\Sigma} + \sqrt{\left[\frac{1}{3} \left(\frac{G_T}{G_\Sigma}\right) \frac{B}{2\chi_0 G_\Sigma}\right]^2 + 1 + \frac{B}{\chi_0 G_\Sigma} \frac{1}{3} \left(\frac{G_T}{G_\Sigma}\right)^2}. \quad (2.5)$$

Если положить, что $G_T/G_\Sigma = 0,05$ и $B/(\chi_0 G_\Sigma) = BG_\Sigma/(\chi_0 G_\Sigma^2) = BG_\Sigma/(\chi_0 G_\Sigma^2) = 80/(140-80) = 4/3$, то $G'_{PY}/G_\Sigma = 0,96$.

Тепловые схемы реальных РУ имеют, как правило, несколько петель охлаждения, причем компенсатор давления, например в ВВЭР, подключается сразу к двум петлям. Имеются и другие существенные отличия от схемы, показанной на рис. 8. Поэтому полученная оценка, равно как и весь материал настоящего пособия, носит иллюстративный характер и направлены на то, чтобы дать представление о математической модели, как об эффективном средстве исследования безопасности ядерных энергетических установок.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Андерсон Д., Танехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2-х т. / Пер. с англ. М.: Мир, 1990. - 384 с.



СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Описание программного комплекса для расчета теплогидравлических процессов в первом контуре ядерного реактора	4
2. Исследование нестационарных теплогидравлических процессов в первом контуре ядерного реактора	14
2.1. Перекрытие проходного сечения одного из каналов охлаждения активной зоны	14
2.2. Обесточивание ПЦ	14
2.3. Течь теплоносителя из первого контура	15
Рекомендуемая литература	17

Редактор Е.Н.Кочубей
Техн.редактор И.В.Печенкин
Корректор Е.Г.Станкевич

Тем.план 1994 г. Лицензия ЛР № 020676 от 09.12.92 г.

Подписано в печать 04.11.94г. Формат 60x84 1/16

Печ.л. 1,25 Уч.изд.л. 1,25 Тираж 150 экз.

Изд.№ 034-1 Заказ 640

Московский государственный инженерно-физический институт
(технический университет). Типография МИФИ.
115409, Москва, Каширское шоссе, 31