

Я Д Е Р Н А Я ЭНЕРГЕТИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается в Университете атомной энергетики с 1993 г.

N4 ОБНИНСК · 2002

СОДЕРЖАНИЕ

БЕЗОПАСНОСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА ЯЭУ
Ю.Б. Воробьев, В.Д. Кузнецов
Возможность совместного использования нейронных сетей и интегральных кодов в системе
поддержки операторов
О.М. Гулина, А.А. Жиганшин, Т.П. Корниец
Многокритериальная задача оптимизации срока службы энергоблока АС
Окунев В.С.
Возможность обеспечения безопасности быстрого реактора при охлаждении активной зоны
сплавом натрий - калий
ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ
И.Я. Газиев, Я.И. Газиев
Приоритеты и некоторые результаты исследований по проблеме "горячих" радиоактивных
частиц в окружающей среде. Общая характеристика возможностей технического применения
"горячих" радиоактивных частиц
ФИЗИКА И ТЕХНИКА РЕАКТОРОВ
В.В. Дулин
К вопросу об определении абсолютной интенсивности протяженных источников
методом совпадений
С.Т. Лескин, В.В. Валуй
Применение метода главных компонент для диагностики насосов высокого и низкого давления
по результатам испытаний в процессе эксплуатации АЭС с ВВЭР
<i>Теплофизика и теплогидравлика</i>
Е.Ф. Авдеев, И.А. Чусов, В.И. Белозеров, В.В. Максимовский, А.Я. Устюжанин, С.П. Пашков, А.В. Шувалов
Верификация гидравлических характеристик стенда "Циркуляционная петля"
Ю.Н. Корниенко
Параметры распределений квазиодномерных моделей двухфазных неравновесных потоков 54
Ю.Н. Корниенко
Параметры распределений квазиодномерных моделей двухфазных неравновесных потоков.
Обобщение для течений с немонотонным профилем параметров
Ю.Н. Корниенко
Параметры распределений квазиодномерных моделей двухфазных неравновесных потоков.
Обобщение для течений в кольцевых каналах и ТВС
Ю.А. Кузина, А.В. Жуков, А.П. Сорокин, А.И. Филин, В.П. Смирнов, В.Н.Леонов, А.Г. Сила-Новицкий
Теплообмен и температурные поля в активной зоне реактора БРЕСТ на быстрых нейтронах со
свинцовым охлаждением
В.И. Мельников, А.В. Дунцев, А.Б. Вьюгин
Исследование акустозондовой системы определения уровня кипящего водяного
теплоносителя 100

CONTENTS

SAFETY, RELIABILITY AND DIAGNOSTICS NPP	
Yu.B.Vorobyov, V.D. Kuznetsov Possibility of Joint Use of Neural Networks and Best-Estimate Codes in System of Operators	
Support	2
O.M. Gulina, A.A. Zhiganshin, T.P. Korniets	, >
The Problem of Multicriteria Optimization for NPP Lifetime	12
V.S. Okunev	,, 12
Possibility of Safety Ensuring of the Fast Reactor Cooled by Na-K Alloy	16
	10
ENVIROMENTAL ASPECTS OF POWER ENGINEERING	
I.Ya. Gaziev, Ya. I. Gaziev	
The Priorities and Some Findings of Research on Environmentally Occurring "Hot" Radioactive	
Particles. The General Characterization of "Hot" Radioactive Particles Applicability	
for Technical Purposes	25
REACTOR PHYSICS AND TECHNOLOGY	
V.V. Doulin	
Determination of Absolute Intensity of Extensive Sources by A Coincidence Method	32
S.T. Leskin, V.V. Valui	
Application of Main Components Method for High and Low Pressure Pumps Diagnostic Based	
on Testing Data Analysis	36
THERMAL PHYSICS AND HEATHYDRAULICS	
E.F. Avdeev, I.A. Chusov, V.I. Belozerov, V.V. Maksimovskiy, A.Ia. Ustujanin, S.P. Pashkov, A.V. Shuvalov	
Verification of Hydraulic Characteristics of Experimental Facility "Circulating Loop"	
Yu. N. Kornienko	40
Distribution Parameters for the Quasi-One-Dimensional Two-Phase Non-Equilibrium	54
Yu. N. Kornienko	,, J
Distribution Parameters for the Quasi-One-Dimensional Two-Phase Non-Equilibrium	
Flow Models. Generalization for Non-Monotone Parameter Profiles	. 66
Yu. N. Kornienko	
Distribution Parameters for the Quasi-One-Dimensional Two-Phase Non-Equilibrium	
Flow Models. Generalization for Annular Channel and Rod Bundle Flows.	79
J.A. Kuzina, A.V. Zhukov, A.P. Sorokin, A.I. Filin, V.P. Smirnov, V.N. Leonov, A.G. Sila-Novitsky	
Heat Transfer and Temperature Fields in the Core of Fast BREST Reactor with Lead Cooling	91
V.I. Melnikov, A.V. Duntsev, A.B. Vjugin	
Investigation of the Acoustic Probe System for Analysis of a Level of Boiling Water Coolant	100

УДК 621.311.25:621.039

ВОЗМОЖНОСТЬ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ КОДОВ В СИСТЕМЕ ПОДДЕРЖКИ ОПЕРАТОРОВ

Ю.Б. Воробьев, В.Д. Кузнецов

Московский энергетический институт (технический университет), г. Москва



Предложена методика для поддержки оператора АЭС с использованием технологий на основе интегральных кодов улучшенной оценки, системы анализа неопределенностей и технологий искусственного интеллекта на основе нейронных сетей с использованием алгоритмов многослойного персептрона. Показано, что возможно с хорошей достоверностью идентифицировать характер возможных аварий на начальном этапе их возникновения. Таким образом, может быть реализована практическая возможность распознавания типа аварий на АЭС и создана система поддержки оператора с использованием предложенного подхода

ВВЕДЕНИЕ

В процессе функционирования АЭС происходит взаимодействие разнообразных компонентов и различных физических процессов, что обуславливает весьма сложное поведение как отдельных элементов АЭС, так и всей системы при нормальной эксплуатации и, особенно, в аварийных режимах. Особенно актуально это в том случае, когда необходимо быстро принять решение. Поток информации, поступающий к оператору, характеризуется многомерностью, взаимовлиянием между компонентами, наложением стохастических погрешностей. Поэтому зачастую встает проблема идентификации текущего состояния объекта и прогнозирования его поведения. В настоящее время анализ, как правило, ограничивается детерминистическими моделями либо ограниченным (марковские процессы, нормальное распределение и т.д.) использованием вероятностных методов в рамках ВАБ (вероятностный анализ безопасности). Имеющиеся системы поддержки оператора зачастую базируются только на идентификации предаварийной ситуации и факте возникновения аварии на основе определения отклонения контролируемых параметров от номинальных значений. Однако для принятия эффективных противоаварийных мероприятий необходима система, позволяющая не только сигнализировать о возникновении аварии, но также определять тип аварийной ситуации и осуществлять поддержку оператора непосредственно в процессе протекания аварии путем предоставления наиболее адекватной информации о протекании аварийного процесса, его прогнозировании, оптимальном vправлении [1].

Осуществление вышесказанного возможно только при использовании современных информационных технологий, например, искусственного интеллекта.

ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ

Принципиальным с точки зрения безопасности [2] является то обстоятельство, что предпринимаемые оперативным составом действия по управлению аварией жестко зависят от правильной идентификации состояния конкретной аварийной ситуации. Однако в процессе начальной стадии развития аварии из-за особенностей высокотехнологичных объектов, к которым относятся АЭС, четкая идентификация аварии затруднена, что может привести к ошибочным (или неадекватным) действиям персонала. Проблема усугубляется тем, что в настоящее время нет однозначности в наборе параметров, полностью характеризующих аварию. Есть данные экспериментальных установок и расчеты по интегральным кодам улучшенной оценки, но нет гарантии, что эти точечные данные будут соответствовать реальным характеристикам аварийной ситуации, и оперативный персонал сможет правильно их идентифицировать и адекватно отреагировать (а неверная реакция может усугубить тяжесть протекания аварии).

Для решения данной проблемы предлагается использовать совместно две ветви самых современных технологий. Это методы анализа динамических процессов на АЭС на основе интегральных кодов улучшенной оценки и методы обработки сложной информации на основе искусственного интеллекта. Соединение этих двух технологий позволит существенно увеличить достоверность идентификации аварийной ситуации на АЭС на самых ранних стадиях и даст возможность управления аварией в ходе ее протекания.

Рассмотрим возможную схему решения задачи. В качестве базового варианта будем рассматривать АЭС с реактором ВВЭР, хотя данный подход применим и для других типов реакторов.

Формализованно задача может быть представлена следующим образом. В процессе функционирования АЭС мы имеем возможность контролировать вектор параметров $Y=\{Y_i,\ i=1,\ldots,k\}$, который зависит от времени $t\colon Y(t)$. Далее у нас имеется множество возможных аварийных ситуаций на АЭС. Качественно назовем его $A=\{A_i,\ i=1,\ldots,n\}$. Пусть аварийная ситуация A_i начинается в момент времени t_0 . С момента времени t_0 и в течение интервала Δt мы имеем m наблюдений вектора Y(t) — множество $Y_{Ai}=\{Y_{ji},\ j=1,\ldots,m\}$. Наша задача заключается в установлении соответствия между реализацией множества Y_A и конкретным элементом множества Y_A , т.е. в отображении $Y_{Ai} \to A_i$. Мы можем установить эту связь на основе анализа динамики АЭС в процессе аварии с помощью интегральных кодов. Обозначим некий интегральный код как Y_A , каждого элемента Y_A множества Y_A мы можем рассчитать Y_A значений вектора наблюдений Y_A для промежутка времени с начала аварии Y_A для промежутка времени с начала аварии Y_A для промежутка времени с начала аварии Y_A от Y_A во время аварии величин Y_A и Y_A (реальных и смоделированных с помощью интегральных кодов) и определении соответствующего элемента Y_A с ответствующего ответствующего ответствующего ответствующего ответствующего ответствующе

Однако возможно усложнение задачи, заключающееся в том, что вышеупомянутые расчетные коды моделируют информацию с некоторой погрешностью $\Delta Y_{Ai} = Y_{Aic} - Y_{Ai}$, которая носит, в общем случае, случайный характер и имеет соответствующую функцию распределения F_{Ai} . Это необходимо учесть в процессе определения соответствующего A_i .

Анализ технологий, существующих на сегодняшний день, которые позволили бы решить сформулированную выше задачу, и учет вышеприведенных условий определяют, что для автоматизации соотнесения величин Y_{Aic} и Y_{Ai} как во время наступления аварии, так и в процессе ее протекания подходят системы на основе искусственного интеллекта. Другой аспект, связанный с погрешностями расчетов по интегральным кодам ΔY_{Ai} и их вероятностными характеристиками F_{Ai} , предлагается учитывать

в рамках методов анализа неопределенностей, основные принципы которых изложены в [2,3].

Таким образом, основной алгоритм решения нашей задачи представляется следующим. Формируется множество аварийных ситуаций, подлежащих обработке системой $A=\{A_i, i=1,...,n\}$. Каждая авария A_i характеризуется вектором входных параметров $X_{i}=\{X_{ii}, j=1,...,v\}$, определяемых как ее спецификой, так и ее моделированием с помощью используемого интегрального кода С. Из анализа неопределенностей находятся типы и параметры распределений компонент вектора X_i : $\forall X_{ii}, \Delta_{ij}, F_{ij}(X_{ij})$, где $F_i(X_{ii})$ - вероятностная функция распределения компоненты; X_{ii} и Δ_{ii} - параметры данной функции. На основе этих данных по выбранному интегральному коду ${\cal C}$ рассчитывается представительное множество реализаций объемом w для каждой аварийной ситуации $A_i \in A$ с соответствующим множеством выходных векторов $Y'_{Aico} = \{ Y'_{Aico}, Y'_{Aico} \}$ $p=1,...,w \mid Y'_{Aicp}=\{Y_{Aicpj}, j=1,...,m\}$ }. В результате мы получим множество Y'_{Ac} , которое будет включать в себя подмножества Y'_{Aic} : $Y'_{Aic} \subset Y'_{Ac}$ для любого i. Далее на основе множеств A и Y'_{Ac} настраивается (тренируется) система искусственного интеллекта до состояния распознавания без ошибки аварийных ситуаций множества А. Настроенная таким образом система искусственного интеллекта может быть установлена на пульт управления блоком АЭС для непосредственной поддержки оператора как для идентификации типа аварии, так и в процессе управления аварией. Графически алгоритм изображен на рис. 1.

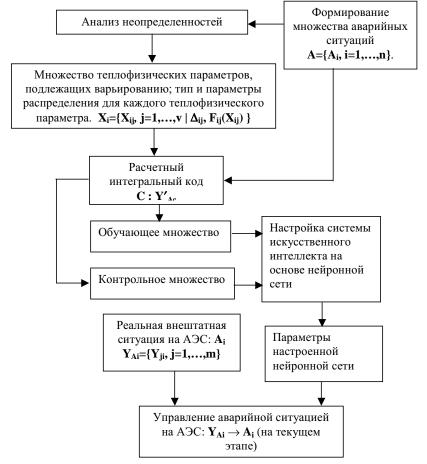


Рис.1. Общая архитектура системы поддержки управления аварийными и переходными процессами с использованием систем искусственного интеллекта

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПУТЬ РЕШЕНИЯ

Важной компонентой предлагаемого подхода является использование технологий систем искусственного интеллекта, которые в настоящее время широко применяются для решения сложных и слабо формализуемых задач в технике. Данные методы базируются на использовании отдельных приложений теории распознавания образов, генетических алгоритмов и теории нечетких множеств. В частности наиболее эффективные результаты получены в рамках использования нейронных сетей. Анализ показал, что для нашего случая оптимальной является нейронная сеть на основе многослойного персептрона с ее обучением методом обратного распространения ошибки [4]. Важным вопросом, которому уделялось особое внимание в настоящих исследованиях, является выбор оптимальных параметров нейронной сети для рассматриваемого класса задач. В частности это касалось выбора числа слоев и числа нейронов в каждом слое.

Другим важным элементом архитектуры предлагаемого подхода являются блоки, связанные с формированием обучающего множества для нейронной сети (см. рис.1). Поскольку на сегодняшний день отсутствуют фактические данные изменения параметров АЭС по полному спектру возможных аварий, то по результатам исследований было предложено образовывать обучающее множество с использованием результатов анализа неопределенностей и моделирования на основе кодов улучшенной оценки. При этом необходимо учитывать возможный случайный разброс данных через соответствующие вероятностные распределения и генерацию набора данных по каждой аварийной ситуации.

В результате был сформулирован алгоритм для решения поставленной задачи, основные этапы которого следующие:

- выбор рассматриваемого сценария аварии;
- анализ возможности корректного моделирования его с помощью выбранного расчетного кода;
 - анализ и выделение основных этапов развития аварии по выбранному сценарию;
- выделение основных физических феноменов на каждом этапе аварийного процесса;
 - выделение наиболее значимых компонентов АЭС для каждого этапа;
- определение физических и технических параметров, соответствующих каждому феномену, их ранжирование;
- определение возможности их моделирования с помощью выбранного расчетного кода;
- определение типов статистических распределений и их параметров для вероятностного моделирования возможного отклонения расчета от реального аварийного процесса.

В данном случае в качестве примера реализации методики была рассмотрена первая фаза аварии с течью теплоносителя - фаза выдувания (blowdown).

Для этой фазы были выделены основные характеристики, влияющие на неточность моделирования, которые представлены в соответствии с моделируемыми компонентами в табл. 1.

Проведенный анализ явлений и их соответствующих моделей позволил выделить параметры, представленные в табл. 2, для потенциального учета при моделировании неопределенностей на этапе формирования обучающего множества.

При отладке методики мы ограничились наиболее существенными факторами с номерами 14, 18, 19, 20, однако даже при этом с учетом нодализации схемы АЭС общее число параметров для моделирования неопределенностей увеличилось до 31 параметра.

Таблица 1

Основные феномены неопределенностей

Компонента	Характеристика				
Течь	Поток теплоносителя в течь				
Реактор	Остаточное тепловыделение				
	Принудительная конвекция				
	Перемешивание потоков в верхней части активной зоны				
	Вскипание				
	Тепло, накопленное в стенках корпуса реактора				
ГЦН (главный циркуляционный насос)	Характеристики ГЦН				
Компенсатор давления	Уровень теплоносителя в компенсаторе давления				
	Тепло, накопленное в стенках корпуса компенсатора давления				

Параметры для учета неопределенностей

Таблица 2

Nº	Параметр		Тип распределения	Границы разброса (±3 стандартное отклонение)	
1	Мощность реактора		Нормальное	6%	
2	Коэффициент неравном радиусу	иерности по	Нормальное	7,5%	
3	Коэффициент неравном высоте	иерности по	Нормальное	2,1%	
4	Радиус таблетки твэла		Равномерное	0,1%	
5	Радиус оболочки твэла		Равномерное	0,1%	
6	Теплопроводность топл	ива	Равномерное	10%	
7	СР (теплоемкость) топл	ива	Равномерное	30,035 кДж/(м ³ К)	
8	Теплопроводность обол	ючки твэла	Нормальное	3,03 Вт/(мК)	
9	С роболочки твэла		Равномерное	64,875 кДж/(м ³ К)	
10	Теплопроводность газо	вого зазора	Равномерное	0,0131 Вт/(мК)	
11	Эффективная толщина	газового зазора	Равномерное	20,98 10 ⁻⁶ м	
12	Эмиссия топливных таб	леток	Равномерное	7%	
13	Эмиссия оболочки твэла		Равномерное	0,1%	
14	Коэффициент конвективного теплообмена в активной зоне во время аварии		Равномерное	от -25% до +75%	
15	Коэффициент напора ГЦН при двухфазном режиме		Равномерное	от -0,2 до +0,8	
16	Коэффициент вращающего момента ГЦН при двухфазном режиме		Равномерное	от -0,3 до +0,8	
17	Коэффициент сопротивления вращению ГЦН		Равномерное	от -0,5 до +2,0	
18	Коэффициент истечения в течь	Однофазное	Нормальное	0,126	
19	Коэффициент истечения в течь	Двухфазное	Нормальное	0,186	
20	Коэффициент теплопередачи в парогенераторе		Равномерное	25%	
21	Температура воды САОЗ (система аварийного охлаждения активной зоны)		Нормальное	от -0,9 до +1,036	

На основе сформулированного алгоритма создан программно-аналитический комплекс BECUN, который в качестве отдельных компонентов включает в себя программу NPOSTACH для моделирования стохастического разброса данных и формирования обучающего множества, программу neuroV для выполнения операций по автоматизированному нахождению оптимальных параметров нейронной сети, обучению нейронной сети и распознаванию аварийной ситуации.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Для проведения расчетов были использованы следующие возможные аварийные ситуации на АЭС с ВВЭР 440(В213). В качестве интегрального кода был выбран RELAP5/mod3.2. Рассматривались течи из петли с компенсатором давления.

- 1. Течи из холодной нитки ГЦТ (главный циркуляционный трубопровод) диаметром 30 и 90 мм.
 - 2. Течи из горячей нитки ГЦТ диаметром 30, 40 и 90 мм.
 - 3. Непреднамеренное открытие клапанов компенсатора давления.
- 4. Течи из холодной нитки ГЦТ диаметром 30 и 90 мм плюс непреднамеренное открытие клапанов компенсатора давления.
- 5. Течи из горячей нитки ГЦТ диаметром 30, 40 и 90 мм плюс непреднамеренное открытие клапанов компенсатора давления.

Таким образом, всего 11 сценариев аварийных ситуаций. Для каждой из аварийной ситуации было сформировано два независимых множества: для обучения нейронной сети и проверки правильности обучения. Рассматривались первые 10 с протекания аварии. Обучение нейронной сети и проверка качества обучения осуществлялось как на различных сочетаниях 11 аварийных ситуаций, так и на всем их множестве.

Важной задачей для успешного функционирования системы является правильный выбор множества параметров для мониторинга состояния АЭС. Опираясь на анализ протекания аварийных процессов, было решено ограничиться следующим множеством:

- давление теплоносителя на входе и выходе АЗ (активной зоны);
- давление теплоносителя второго контура по парогенераторам;
- расход теплоносителя по петлям;
- температура на выходе А3;
- мощность реактора;
- расход БРУ-А (быстродействующей редукционной установки атмосферной);
- уровень в компенсаторе давления;
- уровень в парогенераторах.

При рассмотрении модели конкретного блока мы имеем уже 24 контролируемых параметра для отображения состояния реальной установки.

В данной работе особое внимание уделено двум ключевым моментам, которые, по сути дела, определяют возможность (или невозможность) решения поставленной задачи:

- проблеме обучения нейронных сетей в соответствии с заданным спектром аварий;
 - проблеме распознавания аварий.

В качестве основной цели расчетов было нахождение алгоритма по автоматизированному поиску оптимальной структуры нейронной сети, т.к. существует известная проблема переобученности нейронной сети при слишком большом количестве нейронов и плохое прогнозирование, если количество нейронов будет недостаточным. Для этого проводились расчеты для разных комбинаций распознаваемых сце-

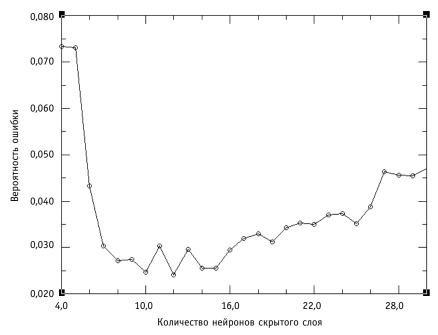


Рис.2. Зависимость вероятности ошибки при контроле в зависимости от количества нейронов в скрытом слое персептрона для четырех сценариев течи диаметром 30 и 90 мм из холодного и горячего ГЦТ

нариев при варьировании параметров нейронной сети. Для примера на рис. 2 представлены расчеты зависимости критерия качества обучения нейронной сети (средней вероятности ошибки на контрольной выборке) от числа нейронов в скрытом слое. Видно, что существует некоторый оптимум в количестве нейронов, после которого дальнейшее их увеличение не приводит к улучшению качества сети, что, очевидно, связано с переобученностью нейронной сети. Исходя из этого был разработан алгоритм, позволяющий программе neuroV в автоматизированном режиме найти оптимальную структуру нейронной сети.

После определения оптимальной структуры нейронной сети необходимо осуществить настройку системы. Для этого был разработан итерационный алгоритм на основе итеративного использования этапов «обучение — проверка», функционирование которого в созданном программном комплексе BECUN обеспечивает успешное обучение нейронной сети распознаванию типа аварии. На основе данного алгоритма была осуществлена настройка системы для полного распознавания 11 аварийных ситуаций, представленных выше.

Расчеты показали, что для рассматриваемого множества 11 аварийных ситуаций адекватна структура нейронной сети с одним скрытым слоем с числом нейронов во входном слое, равным числу анализируемых точек, и числом нейронов в выходном слое, равным числу распознаваемых сценариев аварий. Число нейронов в скрытом слое зависит от количества рассматриваемых аварийных сценариев и определяется на основе поиска оптимума (например, для случая, представленного на рис. 2, это число равно 12).

Далее проводилось исследование по идентификации аварийных ситуаций с параметрами, отличными от первоначально заданных. Для этого анализировалась погрешность распознавания аварии с течью из горячего участка ГЦТ при варьировании диаметра течи от 30 до 40 мм. Нейронная сеть перед этим была обучена на множестве из 11 вышеприведенных сценариев аварий. Было показано, что качественно

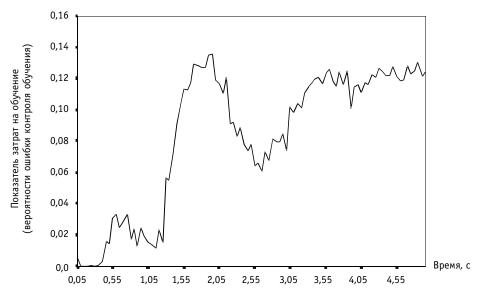


Рис. 3. Зависимость трудности обучения нейронной сети от времени начала аварии

правильно (т.е. новые сценарии аварий будут отнесены к наиболее сходным по типу, на которые ранее была настроена система) будут распознаны течи с диаметром в диапазонах 30 до 35 мм и 37 до 40 мм. В диапазоне от 35 до 37 мм идентификация осуществляется с ошибкой выше допустимой погрешности. Таким образом, видно, что обученную нейронную сеть можно использовать для качественного определения типа аварий, отличных от аварий из множества первоначального обучения.

В заключение проведено исследование вопроса настройки нейронной сети в зависимости от времени с начала аварии. Для этого были осуществлены расчеты пошагового варьирования времени начала аварии, подлежащей распознаванию, начиная с 0,05 до 5 с. На каждом шаге производился автоматический поиск оптимальной структуры нейронной сети. Результаты расчетов в виде зависимости критерия трудности обучения (вероятности ошибки на первом этапе проверки после обучения) от времени, прошедшего с начала аварии, представлены на рис. 3, откуда видно, что система наиболее легко настраивается на распознавание начального этапа аварий.

выводы

Предложена методика для поддержки оператора с использованием технологий на основе интегральных кодов улучшенной оценки, системы анализа неопределенностей и технологий искусственного интеллекта на основе нейронных сетей с использованием алгоритмов многослойного персептрона. На ее основе создан программный комплекс BECUN, который, как показали расчеты, обеспечивает успешное распознавание типа аварии. Показано, что обученную нейронную сеть можно также использовать для качественного определения типа аварий, отличных от рассмотренных. Исследование зависимости настройки нейронной сети от времени с начала аварии показало, что система наиболее легко настраивается на распознавание начального этапа аварий. Все проведенные расчеты показали эффективность заложенных алгоритмов.

Таким образом, показана практическая возможность распознавания типа аварий на АЭС и реальность создания системы поддержки оператора с использованием предложенного подхода.

Литература

- 1. Воробьев Ю.Б., Кузнецов В.Д. Использование современных интегральных кодов для управления безопасностью АЭС/ Вестник МЭИ. 2001. N5. С. 31-37.
- 2. Ortiz M.G., Ghan L.S. Uncertainty Analysis of Minimum Vessel Liquid Inventory During a Small-Break LOCA in a B&W Plant An Application of the CSAU Methodology Using the RELAP5/MOD3 Computer Code, NUREG/CR-5818EGG-2665R4, INEL, 1992. P.6-1 6-15.
- 3. D'Auria F., Galassi G.M., Belsito S., Ingegeneri M., Gatta P. UMAE Application: Contribution to the OECD/CSNI UMS, Vol.2. Diportimento di construzioni meccaniche e nucleari, Universita' DI Pisa, DCMN NT 307(97) Rev.1. 1997. 114 p.
- 4. *Горбань А.Н.* Обучение нейронных сетей. М.: СП ПараГраф, 1990. 160 с.

Поступила в редакцию 1.10.2002

УДК 621.039:519.7

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ СРОКА СЛУЖБЫ ЭНЕРГОБЛОКА АС

О.М. Гулина, А.А. Жиганшин, Т.П. Корниец

Обнинский государственный технический университет атомной энергетики, г. Обнинск



Задача оптимизации срока службы ЭБ АС формулируется как многокритериальная. Приведена формула для расчета экономического критерия в условиях старения основного оборудования АС. Предложен способ оценки срока службы при интервальных значениях переменных модели.

Проблема продления срока службы (ПСС) исчерпавших проектный ресурс энергоблоков ТЭС и АЭС стала актуальной для многих стран мира, т.к. число энергоблоков только АЭС со сроком эксплуатации свыше 25 лет превысило 229. Среди причин, определяющих актуальность разработки мероприятий по ПСС, одними из важнейших являются экономические. По данным EPRI внедрение программы ПСС на энергоблоке составляет 125-300 долл/кВт, в то время как строительство нового блока — 1300-1900 долл/кВт. Любой срок службы когда-то заканчивается. Как определить момент прекращения эксплуатации? Когда дальнейшая работа энергоблока становится неэффективной? И если вопросам обеспечения безопасной эксплуатации, техническим решениям, диагностике и системам контроля уделяется большое внимание (например, [1-3]), то экономическая сторона проблемы обсуждается намного реже [4,5].

Расчет экономической эффективности, как правило, базировался на использовании методологии приведенных затрат. Однако важной методологической проблемой теории приведенных затрат является учет разновременности затрат и результатов. В этом смысле введение такого показателя как ЧДД (чистый дисконтированный доход, NPV — net present value — чистая приведенная стоимость) в качестве оптимизационного критерия является вполне логичным и методически обоснованным. Этот интегральный критерий осуществляет соизмерение разновременных показателей путем дисконтирования:

$$NPV_{Bl} = \sum_{t=1}^{l} (R_t - Z_t) \cdot (1 + E_t)^{-t}, \qquad (1)$$

где Z_t — затраты на строительство, эксплуатацию и ремонт энергоблока (ЭБ) АС; R_t — эффект от эксплуатации (стоимость произведенной электроэнергии); E_t — коэффициент дисконтирования; T — расчетный период.

Этот критерий учитывает всю историю эксплуатации блока и отражает истинное соотношение между вложениями в производство электроэнергии (затратами) и сто-имостью произведенной электроэнергии (результатом).

Математическая постановка многокритериальной задачи оценки момента прекра-

щения эксплуатации ЭБ следующая:

- ullet целевая функция безопасности $Q(t) o \max$ (при ограничении $\leq Q_N$);
- интегральный экономический эффект должен быть неотрицательным и чем больше, тем лучше:

$$NPV_{Bl} = \sum_{t=1}^n (R_t - Z_t) \cdot (1 + E_t)^{-t} \to \max$$
 (при ограничении $NPV \ge 0$),

• срок службы 3Б - t – должен быть как можно больше: $t \to \max$.

Здесь Q_N - нормативный уровень безопасности (определяется числом инцидентов на реактор в год – 1/(реактор*год)).

Эта многокритериальная задача (МКЗ) может быть решена с помощью простейшего метода решения МКЗ:

срок службы **ЭБ**
$$t o \max$$
 при ограничениях $Q(t) \le Q_N$ и $NPV \ge 0$.

Для того, чтобы построить алгоритм решения МКЗ, необходимо подробнее представить критерий *NPV*.

Затраты подразделяются на первоначальные (капиталообразующие инвестиции), текущие и ликвидационные, которые осуществляются соответственно на стадиях строительной, функционирования и ликвидационной.

Для стоимостной оценки результатов и затрат могут быть использованы текущие, прогнозные и дефлированные цены, которые могут выражаться в рублях или устойчивой валюте (доллары США, евро и т.п.).

Под текущими понимаются цены, заложенные в проект без учета инфляции. Прогнозными называются цены, ожидаемые (с учетом инфляции) на будущих шагах расчета. Прогнозная цена $\mathcal{C}(t)$ продукции или ресурса в конце t-го шага расчета (например, t-го года) определяется по формуле $\mathcal{C}(t) = \mathcal{C}_{mek} J(t,t_0)$, где \mathcal{C}_{mek} — текущая цена продукции или ресурса; $J(t,t_0)$ — коэффициент (индекс) изменения цен продукции или ресурсов соответствующей группы в конце t-го шага по отношению к начальному моменту расчета (в котором известны цены).

Дефлированными называются прогнозные цены, приведенные к уровню цен фиксированного момента времени путем деления на общий базисный индекс инфляции. Это необходимо, чтобы обеспечить сравнимость результатов, полученных при различных уровнях инфляции.

Система учета полных затрат, разработанная в МАГАТЭ для экономической оценки предложений по строительству АЭС [4], включает в себя базовые затраты: прямые (строительство, стоимость основного оборудования, элементов АЭС) и косвенные (инженерное обслуживание, страхование, тренинг персонала, налоги, процент на капитал и т.д.), стоимость ЯТЦ и стоимость эксплуатации (содержание оперативного и ремонтного персонала, ремонт оборудования, используемые материалы, обращение с радиоактивными отходами).

Экономический критерий. Выделив из NPV капитальные затраты, получим следующий вид критерия:

затраты в критерии (1)

$$Z(n) = K_{Bl} + E_0 \cdot T + \sum_{t=1}^{T} W_{tBl}$$
, или $Z(n) = K_0 + \sum_{t=1}^{T} (E_0 + C_{rep} + C_{rpl})$,

здесь W_{tBl} учитывает затраты, связанные с ненадежностью рассматриваемого в рас-

чете оборудования, т.е. $W_{tBl} = \sum_{k=1}^K W_k$, где W_k – затраты, связанные с ненадежностью

k-го типа оборудования, тогда

$$NPV_{Bl} = \sum_{t=1}^{T} \frac{R_t - Z_t - K_t}{(1 + E_t)^t} - K_0,$$

где $R_t = C_E \cdot W \cdot (8760 - S_T)$ — стоимость произведенной электроэнергии за t-й год; S_T — среднее время отключения блока в течение t-го года, ч; C_E — стоимость произведенной электроэнергии, руб/квт·ч; W - мощность ЭБ.

$$NPV_{Bl} = \sum_{t=1}^{T} \frac{C_E \cdot W \cdot (8760 - S_T) - E_0 - \sum_{k=1}^{K} (C_{rep}^t + C_{rpl}^t)_k \cdot \lambda_k(t)}{(1 + E_t)^t} - K_0,$$
 (2)

где K_0 — начальные капиталовложения; E_0 — ежегодные затраты на обслуживание, включая ППР; C_{rep} — стоимость дополнительных ремонтов в течение года; C_{rpl} — стоимость замен в течение года; $\lambda(t)$ - интенсивность отказов k-го типа оборудования, приводящих к дополнительным ремонтам и заменам.

Интервальное оценивание. Поскольку параметры модели являются в общем случае интервальными величинами, то задача оценки срока службы сводится к задаче оценки интервала для срока службы. Рис.1 комментирует это положение. В осях (-NPV)-t сплошная линия соответствует среднему значению параметра -NPV, $-NPV_{up}$ – значение верхней границы в точке t, $-NPV_{l}$ – нижней.

В критерии (2) интервальными являются такие переменные как S_T , $\lambda(t)$, E_0 , C_{rep} , C_{rpl} . Интервал для *NPV* находится по правилам интервальной арифметики. В случае, когда присутствует нечеткое описание переменных, роль интервалов выполняют α -срезы нечетких множеств.

На рис.1 пунктиром отмечены верхняя и нижняя границы критерия (-NPV). Нижняя граница срока службы по критерию NPV=0 может быть получена из уравнения $NPV_{up}=0$, а верхняя граница — из уравнения $NPV_{t}=0$.

Область I относится к амортизационному сроку эксплуатации, а в области II экономическая эффективность АС перестает зависеть от учетных ставок привлекаемого капитала, и на нее больше влияют темпы научно-технического прогресса и роста спро-

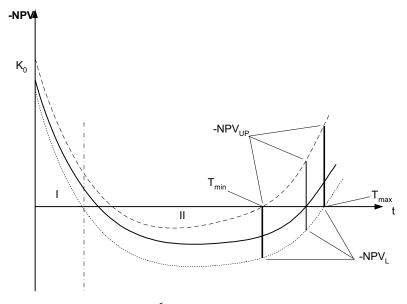


Рис.1. Интервальное оценивание срока службы

са на электроэнергию АС. Именно поэтому сейчас многие АС, амортизированные за время эксплуатации, демонстрируют высокую экономичность и возможность эффективного продления эксплуатации. Представленный в настоящей работе подход демонстрирует метод оценки срока службы ЭБ АС, основанный на решении МКЗ при интервальном задании параметров.

Литература

- 1. Воронин Л.М., Березин Б.Я., Кисиль И.М. Продление срока эксплуатации АЭС России//Теплоэнергетика. 1997. №8. С. 31-34.
- 2. INSAG-13. Management of operational safety in nuclear power plants.
- 3. *Рогнер X., Лангдуж Л.М., Макдональд А*. Ядерная энергетика статус и прогноз//Атомная техника за рубежом. 2002. №7. С. 25-30.
- 4. *Кархов А.Н.* Экономическая оценка предложений по строительству АЭС//Атомная техника за рубежом. 2002. №2. С. 23-26.
- 5. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция). Утверждены Министерством экономики РФ, Министерством финансов РФ, Государственным комитетом РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике № ВК 477 от 21.06.1999 г. М.: Экономика, 2000.

Поступила в редакцию 25.11.2002

УДК 621.039.52

ВОЗМОЖНОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ БЫСТРОГО РЕАКТОРА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ СПЛАВОМ НАТРИЙ-КАЛИЙ

B.C. Окунев

Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, г. Москва



Исследуется потенциал теплоносителя первого контура реактора на быстрых нейтронах на основе сплава Na-K с точки зрения обеспечения безопасности. Представлены результаты оптимизации характеристик безопасности такого реактора с учетом внутренней самозащищенности от наиболее опасных аварийных ситуаций, сопровождающихся отказом аварийной защиты.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка реакторных установок (РУ) нового поколения основывается на существующей нормативно-технической документации (ОПБ-88/97, ПБЯ РУ АС-89, СП-АС-88, НРБ-96 и др.), которой не противоречат основные положения философии естественной безопасности, сформулированные в [1]. В совокупности они отражают новые требования к безопасности, сформировавшиеся к концу ХХ столетия, предполагающие детерминистическое исключение тяжелых аварий на АЭС, в первую очередь, за счет исключения внутренне присущих реактору естественных факторов опасности.

Результаты, представленные в настоящей работе в определенной мере отражают современный взгляд на старую концепцию реактора на быстрых нейтронах (БР) в свете новых требований к безопасности.

Привлекательно ли использование эвтектики Na-K в качестве теплоносителя первого контура БР нового поколения с точки зрения обеспечения безопасности? Есть ли у этого сплава какие-либо достоинства кроме обеспечения внутренней самозащищенности от аварий с захолаживанием теплоносителя (режимы типа OVC), и, вообще, возможна ли «реанимация» старой концепции? Ответить на эти вопросы помогут результаты оптимизации характеристик безопасности БР, охлаждаемого таким сплавом.

ТЕПЛОНОСИТЕЛИ ПЕРВЫХ БР

Для охлаждения первых БР выбирались теплоносители с низкой температурой замерзания, что не требовало дополнительного подогрева контуров при остановке реактора. Такими теплоносителями являются ртуть (температура замерзания 234,3К)

и эвтектический сплав 22%Na-78%K (261,7 K; в процентах указано массовое содержание компонентов). Ртуть тяжелее всех известных жидкостей, химически стойка, имеет низкую температуру замерзания, но и относительно низкую температуру кипения, что затрудняет ее использование в качестве теплоносителя БР из-за высокой вероятности кипения в аварийных режимах с ухудшением условий теплоотвода от активной зоны. Кроме того, ртуть и соединения на ее основе ядовиты. Ртутью охлаждались первый американский БР «Клементина» (физический пуск которого состоялся в 1946 г.) и первый советский БР-1, впоследствии реконструированный в БР-2 (1956 г.); сплавом Na-K - второй американский БР - EBR-I (1951 г.) и первый британский БР «Даунри» (или DFR, 1959 г.) [2]. Однако вскоре отказались и от использования ртути в качестве теплоносителя РУ из-за низкой температуры кипения, но, в основном, из-за высокой плотности и, следовательно, больших затрат мощности на циркуляцию: и от использования сплава Na-K в качестве теплоносителя первого контура энергетических БР. Основная причина отказа от эвтектики Na-K в пользу чистого натрия — необходимость снижения максимальной температуры теплоносителя Na-К по сравнению с чистым натрием и, следовательно, меньшая эффективность паросилового цикла. Кроме того, Na-K имеет меньшие теплопроводность, теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, температуру кипения, больше поглощает нейтроны.

В современных условиях, когда требования безопасности вышли на первый план, а критерий максимизации коэффициента воспроизводства (или минимизации времени удвоения системы реакторов) и, соответственно, увеличения энергонапряженности активной зоны давно перестал быть актуальным, неплохо было бы выяснить, все ли аспекты применимости эвтектического сплава Na-K в качестве теплоносителя первого контура БР изучены до конца. Нет ли перспектив у сплава Na-K в связи с повышением требований к безопасности? Калий тяжелее натрия, следовательно, сплав Na-K меньше замедляет нейтроны, чем чистый натрий. При использовании сплавного теплоносителя можно ожидать снижения пустотного эффекта реактивности (ПЭР) по сравнению с традиционными БР с натриевым охлаждением активной зоны. Кроме того, было бы несправедливо обойти вниманием теплоноситель, использование которого позволяет детерминистически исключить целый класс аварийных ситуаций (усугубляющихся отказом аварийной защиты), вызванных переохлаждением теплоносителя (OVC WS). Тем более, такой сплав заслуживает внимания, т.к. он уже применялся для охлаждения активной зоны и применяется сегодня в качестве теплоносителя второго контура БР, т.е. технология использования эвтектики Na-K хорошо освоена.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Расчетные и оптимизационные исследования проведены с помощью программы DRACON-M [3], позволяющей рассматривать многозонные БР в двумерной цилиндрической геометрии. Распределения нейтронов и ценностей нейтронов определяются с использованием 26-групповой системы констант в диффузионном приближении на основе идей методов итерационного синтеза. Аварийные процессы описываются в приближении точечной нейтронной кинетики с учетом обратной связи по средним температурам топлива и теплоносителя. Оптимизационная задача решается с помощью метода последовательной линеаризации [4].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Сформулируем задачу поиска оптимального управления следующим образом. Найти значения вектора управления u с компонентами $\{u_k\}$, k=1,2,...,K, из области определения U: $u_k^{min} \le u_k \le u_k^{max}$, при которых целевой функционал (критерий оптималь-

ности) $F_0(u_k)$ принимает минимальное значение и выполняются ограничения $F_i(u_k) \leq F_i^{\partial on}$ $(i=1,2,...J,\ J+1,\ J+2,...,I)$ для двух групп функционалов: J функционалов надежности и (I-J) функционалов безопасности. Причем функционалы F_i (i=0,1,2,...,I) также зависят от переменных состояния, определенных на решениях известных уравнений. Предполагается, что значения u_k^{min} , u_k^{max} и $F_i^{\partial on}$ известны.

Основные компоненты вектора управления перечислены в табл. 1.

Рассматриваются два функционала, характеризующих ПЭР: эффект, соответствующий осушению всего реактора - Π ЭР $_p$, и эффект, соответствующий осушению центральной зоны - зоны малого обогащения и торцевого экрана над ней - Π ЭР $_q$. В качестве целевого функционала выбран Π ЭР $_q$. Учитывались ограничения для функционалов надежности, характеризующих режим работы РУ на номинальной мощности (ос-

Таблица 1 Параметры компоновки и некоторые функционалы, характеризующие номинальный режим работы БР тепловой мощностью 3000 МВт, охлаждаемого сплавом Na-K

Состав теплоносителя, % (по массе) 22%Na-78%K (эвтектика) 79%Na-21%K Управления Обогащение топлива, % Диаметр топливной таблетки, мм Относительный шаг решетки твэлов 11,5 / 18,7 12,0/19,0 11,3 / 17,3 10,9 / 19,4 8,4 / 21,1 5,00 5,36 9,94 9,42 5,21 5,00 5,00 1,202/ 1,202/ 1,180/ 1,202/ 1,202/ 1,180/ 1,202/ 1,202/ 1,180/ 1,202/ 1,2	Параметр	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
Упражения Обогащение топлива, % 11,5 / 18,7 12,0/19,0 11,3 / 17,3 10,9 / 19,4 8,4 / 21,1 Диаметр топливной таблетки, мм 5,36 9,94 9,42 5,21 5,00 Относительный шаг решетки твэлов 1,176/ 1,150/ 1,159/ 1,180/ 1,202/ Температура теплоносителя на входе в активную зону, К 439 639 639 Температура теплоносителя на входе в активную зону, К 106,8/37,7/ 123,9/34,4/ 111,0/47,5/ 105,8/38,7/ 100,2/44,3/ Размер зон радиальный (полувысота активной зоны : экран) 106,8/37,7/ 123,9/34,4/ 111,0/47,5/ 105,8/38,7/ 45,0 45,0 45,0 45,0 45,0 45,0 45,0 45,0 45,0 46,0<	, ,	22%N	а-78%К (эвте	ктика)	79%Na-21%K	
Обогащение топлива, % 11,5 / 18,7 12,0/19,0 11,3 / 17,3 10,9 / 19,4 8,4 / 21,1 Диаметр топливной таблетки, мм отворов прадиальный шаг решетки твэлов 1,176/1,176/1,1750/1,159/1,159/1,180/1,180/1,140 1,180/1,140/1,159/1,180/1	' I					
Диаметр топливной таблетки, мм Относительный шаг решетки твалов 1,176/ 1,150/ 1,159/ 1,180/ 1,202/ 1,300 1,430 1,439 1,373 1,416 1,407 1,423 1,439 1,373 1,416 1,407 1,423 1,439 1,373 1,416 1,407 1,423 1,439 1,373 1,416 1,407 1,423 1,439 1,373 1,416 1,407 1,423 1,439 1,373 1,416 1,407 1,423 1,439 1,373 1,416 1,407 1,						
Относительный шаг решетки твэлов	' '		, ,			, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,
ТВЯЛОВ 1,423 1,439 1,373 1,416 1,407 Температура теплоносителя на входе в активную зону, К Размер зон радиальный (полувысота активной зоны : экран) 51,0 : 45,0 47,9 : 0,0 51,0 : 45,0 51,0 : 45,0 51,0 : 45,0 515,6 / 4670,0 4686,2 3735,0 4754,0 4636,6 4670,0 4686,2 3735,0 4754,0 4636,6 4670,0 4686,2 3735,0 4754,0 4636,6 4670,0 4686,2 3735,0 4754,0 4636,6 4670,0 4686,2 3735,0 4754,0 4636,6 4670,0 4686,2 3735,0 4754,0 4636,6 4670,0 4686,2 3735,0 4754,0 4636,6 4670,0 4686,2 3735,0 4754,0 4636,6 4670,0 46		· · · · ·	,	·	· ·	*
Температура теплоносителя на входе в активную зону, К Размер зон радиальный (полувысота активной зоны : экран) 51,0 : 45,0 47,9 : 0,0 51,0 : 45,0 51,0 : 45,0 456,0 4670,0 Массовый расход теплоносителя, кг / (м² с) 4686,2 3735,0 4754,0 4636,6 4670,0 Теплоносителя 748/636 732/613 839/841 843 / 814 818/869 860,000,000,000,000,000,000,000,000,000,		<i>'</i>	,		· '	*
радиальный полувысота активной зоны : экран) 51,0 : 45,0 47,9 : 0,0 51,0 : 45,0 51,0 : 45,0 4636,6 4670,0 51,0 : 47,9 : 0,0 51,0 : 45,0 47,9 : 0,0 4636,6 4670,0 51,0 : 47,9 : 0,0 51,0 : 45,0 47,9 : 0,0 4636,6 4670,0 51,0 : 45,0 47,9 : 0,0 47,9 : 0,0 4636,6 4670,0 51,0 : 45,0 4636,6 4670,0 51,0 *** ***Continue of the proper of the prop			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	1,373		1,407
аксиальный (полувысота активной зоны : экран) 51,0 : 45,0 47,9 : 0,0 6098,9/ 7091,3/ 5481,3/ 5315,6/ 4686,2 3735,0 4754,0 4636,6 4670,0 Функционалы Максимальная температура, К топлива 1106/1103 1795/1618 1614/1910 1160/1343 1101/1520 1160/1043 1795/1618 1614/1910 1160/1343 1101/1520 1160/1043 1795/1618 1614/1910 1160/1343 1101/1520 1160/1043 1795/1618 1614/1910 1160/1343 1101/1520 1160/1043 1795/1618 1614/1910 1160/1343 1101/1520 1160/1043 1795/1618 1614/1910 1160/1343 1101/1520 1160/1043 1795/1618 1614/1910 1160/1343 1101/1520 1160/1043 1795/1618 1614/1910 1160/1343 1101/1520 1160/1043 1100/10520 1160/1043 1100/10520 1160/1043 1100/10520 1160/1043 1100/10520 1160/1043 1100/10520 1160/1043 1100/10520 1160/1043 1100/10520 1160/1043 1100/10520 1160/1043 1100/10520 1160/1043 1100/10520 1160/1043 1100/10520 1160/1043 1160/1043 1100/10520 1160/1043 1160/1043 1100/10520 1160/1043 1160/	Размер зон	1				
активной зоны : экран) Массовый расход теплоносителя, кг / (м² с) Масковый расход теплоносителя, кг / (м² с) Максимальная температура, К топлива Теплоносителя оболочки твэла Средний подогрев теплоносителя, к Максимальная линейная нагрузка на твэлы, Вт/см КВА Доля естественной циркуляции, % Коэффициент реактивности, 10 ⁶ Δk / k /) / K доплеровский — 4,623/ — 3,699/ — 2,308/ — 4,288/ — 2,226/ — 1,398 — 0,673 — 1,034 — 2,047 — 2,844 плотностной 51,0 : 45,0	радиальный		, ,	, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	, ,	, ,
Массовый расход теплоносителя, кг / (м² с) 5530,9/ 4686,2 6098,9/ 3735,0 7091,3/ 4754,0 5481,3/ 4636,6 5315,6/ 4670,0 Функционалы Максимальная температура, К топлива теплоносителя оболочки твэла 1106/1103 1795/1618 1614/1910 1160/1343 1101/1520 Средний подогрев теплоносителя, К 748/636 732/613 839/841 843 / 814 818/869 Оболочки твэла 769/665 799/689 882/899 858 / 842 831/903 Средний подогрев теплоносителя, К 233 223 181 172 173 Максимальная линейная нагрузка на твэлы, Вт/см 255,4 / 975,0 / 684,2 / 916,4 324,5 389,9 КВА 1,06 0,96 Доля естественной циркуляции, % 8,83/11,74/ 1,63 13,51/ 24,59/2,14 9,89/21,55/ 7,33/11,41/ 1,27 7,21/12,81/ 1,27 Коэффициент реактивности, 10 ⁶ Δk / k) / К -4,623/ -3,699/ -2,308/ -4,288/ -2,226/ -2,226/ -2,344 -2,047 -2,844 плотностной 3,570/ 2,149/ 1,647/ 0,529/ 0,119/	аксиальный (полувысота					
КГ / (М ² с) 4686,2 3735,0 4754,0 4636,6 4670,0 ФУНКЦИОНАЛЫ МАКСИМАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА, К ТОПЛИВА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА К МАКСИМАЛЬНАЯ ЛИНЕЙНАЯ НАГРУЗКА НА ТВЭЛЫ, ВТ/СМ ДОЛЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ, % КОЭФФИЦИЕНТ РЕАКТИВНОСТИ, 10 ⁶ Δk / k) / K ДОПЛЕРОВСКИЙ ПЛОТНОСТНОЙ 4686,2 3735,0 4754,0 4636,6 4670,0 ФУНКЦИОНАЛЫ 1106/1103 1795/1618 1614/1910 1160/1343 1101/1520 1748/636 732/613 839/841 843 / 814 818/869 8769/665 799/689 882/899 858 / 842 831/903 223 181 172 173 184,9 / 295,9 884,6 916,4 324,5 389,9 KBA 1,06 0,96 Доля естественной циркуляции, % 8,83/11,74/ 13,51/ 24,59/2,14 2,14 1,27 7,33/11,41/ 1,27 КОЭФФИЦИЕНТ РЕАКТИВНОСТИ, 10 ⁶ Δk / k) / K ДОПЛЕРОВСКИЙ -4,623/ -3,699/ -2,308/ -4,288/ -2,226/ -1,398 -0,673 -1,034 -2,047 -2,844 ПЛОТНОСТНОЙ 3,570/ 2,149/ 1,647/ 0,529/ 0,119/	активной зоны : экран)	51,0 : 45,0	47,9 : 0,0	51,0 : 45,0	51,0 : 45,0	51,0 : 45,0
Функционалы Максимальная температура, К топлива 1106/1103 1795/1618 1614/1910 1160/1343 1101/1520 теплоносителя 748/636 732/613 839/841 843 / 814 818/869 оболочки твэла 769/665 799/689 882/899 858 / 842 831/903 Средний подогрев теплоносителя, К 233 223 181 172 173 Максимальная линейная нагрузка на твэлы, Вт/см 255,4 / 975,0 / 684,2 / 214,3 / 324,5 184,9 / 324,5 389,9 КВА 1,06 916,4 324,5 389,9 КВА 1,06 0,96 Доля естественной циркуляции, % 8,83/11,74/ 1,63 13,51/ 24,59/2,14 9,89/21,55/ 2,14 7,33/11,41/ 1,27 7,21/12,81/ 1,27 Коэффициент реактивности, 10 ⁶ Δk / k) / К -4,623/ -3,699/ -2,308/ -2,308/ -4,288/ -2,226/ -2,226/ -2,047 -2,244 -2,047 -2,844 плотностной 3,570/ 2,149/ 1,647/ 0,529/ 0,119/ 1,647/ 0,529/ 0,119/		5530,9/	6098,9/	7091,3/	5481,3/	5315,6/
Максимальная температура, К топлива 1106/1103 1795/1618 1614/1910 1160/1343 1101/1520 1600 1600 1700 1700 1700 1700 1700 170	Kr / (M c)	4686,2	3735,0	4754,0	4636,6	4670,0
топлива теплоносителя оболочки твэла Средний подогрев теплоносителя, к Максимальная линейная нагрузка на твэлы, Вт/см Доля естественной циркуляции, % Доля естественной трактивности, 10 ⁶ Δk / k) / K доплеровский Плотностной Доля стестной Доля естественной циркуляции, % Доля естественн		Ф ункц	ионалы			
теплоносителя оболочки твэла 748/636 732/613 839/841 843 / 814 818/869 769/665 799/689 882/899 858 / 842 831/903 Средний подогрев теплоносителя, К 233 223 181 172 173 К 255,4 / 295,9 884,6 916,4 324,5 389,9 КВА 1,06 0,96 Доля естественной циркуляции, % 8,83/11,74/ 1,63 24,59/2,14 2,14 7,27 7,21/12,81/ 1,27 Коэффициент реактивности, 106 \(\) \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \	Максимальная температура, К					
оболочки твэла 769/665 799/689 882/899 858 / 842 831/903 Средний подогрев теплоносителя, К Ямаксимальная линейная нагрузка на твэлы, Вт/см 295,9 884,6 916,4 324,5 389,9 КВА 1,06 0,96 Доля естественной циркуляции, % 8,83/11,74/ 1,63 1,63 1,27 2,14 1,27 7,21/12,81/ 1,27 Коэффициент реактивности, $10^6 \Delta k \ / \ k) \ / \ K$ доплеровский -4 ,623/ -3 ,699/ -2 ,308/ -4 ,288/ -2 ,226/ -1 ,398 -0 ,673 -1 ,034 -2 ,047 -2 ,844 плотностной 3,570/ 2,149/ 1,647/ 0,529/ 0,119/	топлива	1106/1103	1795/1618	1614/1910	1160/1343	1101/1520
Средний подогрев теплоносителя, K 233 223 181 172 173 K Максимальная линейная нагрузка на твэлы, K 255,4 / 295,9 884,6 916,4 324,5 389,9 K 324,5 K 389,9	теплоносителя	748/636	732/613	839/841	843 / 814	818/869
К Максимальная линейная нагрузка на твэлы, Вт/см 295,9 884,6 916,4 324,5 389,9 КВА 1,06 0,96 Доля естественной циркуляции, % 8,83/11,74/ 1,63 24,59/2,14 2,14 1,27 7,21/12,81/ 1,27 Коэффициент реактивности, 10 ⁶ Δk / k) / K доплеровский -4,623/ -3,699/ -2,308/ -4,288/ -2,226/ -1,398 -0,673 -1,034 -2,047 -2,844 плотностной 3,570/ 2,149/ 1,647/ 0,529/ 0,119/	оболочки твэла	769/665	799/689	882/899	858 / 842	831/903
на твэлы, Вт/см КВА Доля естественной циркуляции, % 1,06 1,06 1,06 1,06 1,06 1,06 1,06 1,06 1,06 1,06 1,06 1,07 1,27		233	223	181	172	173
КВА $ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		255,4 /	975,0 /	684,2 /		184,9 /
Доля естественной циркуляции, % $8,83/11,74/$ $13,51/$ $24,59/2,14$ $2,14$ $1,27$ 1	на твэлы, Вт/см	295,9	884,6	916,4	324,5	389,9
1,63 $24,59/2,14$ $2,14$ $1,27$	KBA		1,	06		0,96
$10^6 \Delta k \ / \ k) \ / \ K$ доплеровский $-4,623 \ / -3,699 \ / -2,308 \ / -4,288 \ / -2,226 \ / -1,398 \ -0,673 \ -1,034 \ -2,047 \ -2,844$ плотностной $3,570 \ / 2,149 \ / 1,647 \ 0,529 \ 0,119 \ /$	Доля естественной циркуляции, %	, ,	*		, ,	, ,
доплеровский $-4,623/$ $-3,699/$ $-2,308/$ $-4,288/$ $-2,226/$ $-1,398$ $-0,673$ $-1,034$ $-2,047$ $-2,844$ плотностной $3,570/$ $2,149/$ $1,647/$ $0,529/$ $0,119/$	Коэффициент реактивности,					
доплеровский	10 ⁶ Δk / k) / K					
плотностной 3,570/ 2,149/ 1,647/ 0,529/ 0,119/	,	-4,623/	-3,699/	-2,308/	-4,288/	-2,226/
		-1,398	-0,673	-1,034	-2,047	-2,844
0.931 -0.239 -0.04 0.005 0.04	плотностной	3,570/	2,149/	1,647/	0,529/	0,119/
0,001 0,000 0,04		0,931	-0,239	-0,04	0,005	0,04

Примечание. Здесь и далее в таблицах через косую черту приведены значения, соответствующие зоне малого, большого обогащения и боковому экрану (последнее значение иногда отсутствует).

Таблица 2

Функционалы, характеризующие аварийные режимы, сопровождающиеся отказом

Функционал	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5		
LOCA WS (потеря теплоносителя)							
ПЭР при осушении, % Δk / k:							
реактора	-0,816	-0,637	0,167	-0,397	0,159		
центральной зоны	1,152	0,359	0,353	1,011	0,320		
LOF WS	(прекращени	е принудите.	пьной циркуля	яции)			
Переходный режим (К):							
T _{тн} ^{max} при t _н =30 с	1016/722	_	_	1082/892	1045/952		
t _H =40 c	992/710	_	_	1063/881	1030/938		
Установившийся режим:							
T _{TH} ^{max} , K	946/682	_	_	1024/852	999/898		
T _τ ^{max} , K				1046/906	1016/969		
относительная мощность	0,150	_	_	0,143	0,149		
ТОР	WS (ввод поло	ожительной	реактивност	u)	•		
Переходный режим:							
T _τ ^{max} , K	1253/1241	1912/1701	1677/1980	1279/1492	1206/1709		
относительная мощность	1,185	1,067	1,047	1,197	1,197		
Установившийся режим:							
T _τ ^{max} , K	1251/1236	1898/1688	1670/1971	1278/1488	1205/1704		
T _{TH} ^{max} , K	789/662	737/684	839/841	873/840	844/902		
относительная мощность	1,172	1,053	1,038	1,185	1,186		
	/C WS (захола						
1) насосов на по		1	ı	ı		
T _r ^{max} , K	1267/1310	1827/1660	1614/ 1910 ⁽¹⁾	1285/1547	1213/1775		
Относительная мощность	1,420	1,097	1,059	1,400	1,405		
	б) подключе	ние резервн	ой петли	-			
T _τ ^{max} , K	1250/1235	1890/1678	1653/1957	1288/1510	1209/1737		
Относительная мощность	1,214	1,071	1,051	1,259	1,257		
•	рекращение п	пеплоотвода	а от первого і	контура)			
T _{th} ^{max} , K	719/696	823/752	959/960	845/842	835/859		
Наложе	Наложение процессов LOF WS, TOP WS и OVC WS (б)						
Локальный максимум Т _{тн} ^{max} (К):							
при t = t _н = 30 с	1095 ⁽²⁾ /759	_	_	1145 ⁽¹⁾ / 927	1104 / 997		
при t = t _н = 40 с	1075 ⁽²⁾ /749	_	_	1129 / 917	1103 / 983		
Установившийся режим:							
T _{TH} max, K	1098 ⁽²⁾ /742	_	_	1227 / 950	1154 ⁽²⁾ / 1004		
T _τ ^{max} , K	1138/ 809	_	_	1264 / 1038	1184 / 1113		
относительная мощность	0,204			0,205	0,228		

Примечание. $T_{\rm rh}^{\rm max}$, $T_{\rm r}^{\rm max}$ - максимальная температура теплоносителя и топлива соответственно, $^{(1)}$ соответствует номинальному режиму, $^{(2)}$ незначительно превышает температуру кипения; прочерк соответствует интенсивному кипению теплоносителя.

новные из них перечислены в табл. 1), и функционалов безопасности, характеризующих аварийные режимы типа ATWS, т.е. ситуации, сопровождающиеся отказом ава-

рийной защиты (табл. 2). В числе последних также рассматривалось ограничение $\Pi \exists P_p < 0$.

Среди температурных ограничений (которые в зависимости от режима работы РУ рассматриваются в качестве функционалов надежности или безопасности) в оптимизационных задачах, в первую очередь, рассматриваются

- максимальная температура оболочек твэлов $T_{ob}^{max} \le 800 \text{ K}$ (в номинальном режиме), что позволит обеспечить длительную работу РУ на номинальной мощности;
- максимальная температура теплоносителя $T_{mh}^{max} \le 1057 \text{ K}$ (в номинальном и аварийных режимах), что исключает кипение теплоносителя во всех режимах работы реактора;
- максимальная температура топлива $T_m^{max} \le 1800 \text{ K}$ (в номинальном режиме), $T_m^{max} \le 2273 \text{ K}$ (в аварийных переходных режимах, соответствует консервативной оценке температуры начала разложения нитрида), $T_m^{max} \le 2000 \text{ K}$ (в новом квазистационарном состоянии, установившемся в результате действия обратных реактивностных связей, значительно более длительный режим по сравнению с переходным).

Расчеты проводились для традиционной компоновки БР (активная зона содержит две подзоны с топливом разного обогащения, окруженные боковым и торцевыми экранами) со смешанным нитридным топливом и теплоносителем Na-K. Компоновка совместима с РУ БН-800 по размерам и тепловой мощности.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНО-ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ БР, охлаждаемый эвтектикой NA-K

В табл. 1, 2 представлены варианты традиционной компоновки БР (содержащей две активные зоны разного обогащения, окруженные экранами) типа БН-800 с нитридным топливом и теплоносителем Na-K. Варианты 1-3 соответствуют БР, охлаждаемому эвтектикой 22%Na-78%K. Для вариантов 1 и 2 выполнены ограничения для функционалов, характеризующих надежность РУ. Температура теплоносителя на входе в активную зону ниже, чем в БН-800 и составляет 439 К (связано с меньшей температурой кипения сплава Na-K по сравнению с натрием приблизительно на 100 К). Первый вариант характеризуется отрицательным ПЭР при осушении реактора и положительным, превышающим β , - при осушении центральной зоны, значением коэффициента воспроизводства активной зоны КВА \approx 1 и внутренней самозащищенностью от четырех наиболее опасных для БР аварийных переходных режимов (см. табл. 2).

Среди температурных ограничений, в первую очередь, рассматриваются

- для максимальной температуры оболочек твэлов $T_{o6}^{max} \le 800 \text{ K}$ (в номинальном режиме);
- для максимальной температуры теплоносителя $T_{mh}^{max} \le 1057 \; \mathrm{K}$ (в номинальном и аварийных режимах);
- для максимальной температуры топлива $T_m^{max} \le 1800 \text{ K}$ (в номинальном режиме), $T_m^{max} \le 2273 \text{ K}$ (в аварийных переходных режимах, соответствует консервативной оценке температуры начала разложения нитрида), $T_m^{max} \le 2000 \text{ K}$ (в новом квазистационарном состоянии, установившемся в результате действия обратных реактивностных связей).

Для обоих вариантов эти и другие ограничения выполнены для номинального режима работы РУ, причем с большим запасом по температуре топлива и теплоносителя.

Наиболее опасная комбинация аварийных процессов - неодновременное наложение LOF WS, TOP WS и OVC WS (аббревиатуры расшифрованы в табл. 2) приводит к нарушению ограничения для максимальной температуры теплоносителя (незначительному для варианта 1 и весьма существенному для варианта 2), т.е. кипению тепло-

носителя (расчетные значение, приведенные в табл. 2, получены в приближении однофазности теплоносителя). Основной вклад в повышение температуры теплоносителя вносит режим LOF WS. Исключить кипение за счет увеличения времени выбега главных циркуляционных насосов, не изменяя параметров компоновки (входящих в вектор управления), не удается. Повышению самозащищенности от такой аварии может способствовать увеличение высоты контура естественной циркуляции.

Задача минимизации ПЭР при условии выполнения ограничений для функционалов, характеризующих внутреннюю самозащищенность от всех рассмотренных аварийных ситуаций (табл. 2), и П P_{u} < β (где β - эффективная доля запаздывающих нейтронов) не имеет решения. Дальнейшая (по сравнению с вариантом 1) минимизация ПЭР, требует дополнительных степеней свободы, т.е. расширения вектора управления включения за счет включения в него дополнительных параметров: толщины торцевых и бокового экранов (вариант 1 получен при фиксированных значениях толщины экранов). В результате дальнейшей оптимизации $\Pi \ni P_{u}$ потребовалось уменьшение уплощения (отношения радиуса к высоте) активной зоны. При фиксированных радиальных размерах компоновки (суммарный радиус активной зоны и боковых экранов $\Sigma \Delta R_i = 189,5$ см) и ограничении на ее высоту (суммарная высота активной зоны и торцевых экранов $\Sigma \Delta H_J \le 91$ см) это возможно при отказе от торцевых экранов и увеличении радиуса активной зоны за счет уменьшения толщины бокового экрана. Однако и при этом не удалось достичь приемлемого ПЭР и внутренней самозащищенности от аварий LOF WS и TOP WS. Это связано с противоположной ролью доплеровского коэффициента реактивности в режимах с уменьшением расхода и увеличением мощности. Таким образом, одновременное обеспечение самозащищенности от аварий LOF WS и TOP WS проблематично и связано с определенным компромиссом в выборе оптимального управления, т.е. изменением вектора управления в сторону ухудшения критерия оптимальности - ПЭРи. Для варианта 1 разрешение такого компромисса потребовало снижения энергонапряженности активной зоны, что привело, в свою очередь, к снижению температур (и, как следствие, ухудшение экономических характеристик станции в целом).

Для варианта 2 компромисс разрешен выбором в качестве наиболее предпочтительного одного из условий задачи за счет отказа от выполения другого. В данном случае предпочтительность отдается требованию минимизации ПЭР_и до приемлемого значения (П $3P_u < \beta$), а дополнительные степени свободы для обеспечения этой возможности были получены при исключении из условий задачи ограничений для функционалов, характеризующих внутреннюю самозащищенность от аварий LOF WS. Таким способом для варианта 2 удалось добиться минимизации ПЭР до значения, меньшего β . Платой за это стало аварийное завершение ситуаций, инициированных одновременным обесточиванием всех ГЦН, сопровождающимся отказом аварийной защиты и, как следствие, наложения режимов LOF WS + TOP WS + OVC WS, т.е. для варианта 2 оптимальной компоновки БР удалось достичь минимального $\Pi \ni P_{u}$ при условиях $\Pi P_n < 0$, $\Pi P_n < \beta$ и внутренней самозащищенности от аварий типа TOP WS, OVC WS и LOHS WS. Вариант 2 характеризуется незначительным запасом по максимальной температуре топлива (5 К) в номинальном режиме работы РУ, меньшим, по сравнению с вариантом 1, запасом по T_m^{max} в аварийных ситуациях, достаточными запасами по температуре теплоносителя в номинальном и аварийных режимах, высокими тепловыми нагрузками на твэлы по сравнению с РУ типа БН, но все-таки низкой эффективностью паросилового цикла.

Необходимо отметить, что наибольшая температура топлива для варианта 2 достигается в аварийных режимах с вводом положительной реактивности и подключением «холодной» резервной петли. Причем характер ее временного изменения в

процессе OVC WS для зон малого и большого обогащения различен. В зоне малого обогащения T_m^{max} монотонно увеличивается и выходит на новое квазистационарное состояние, в зоне большого обогащения - повышается, достигает локального максимума, затем незначительно уменьшается и вновь монотонно растет до нового квазистационарного уровня.

Таким образом, выполнение условий $\Pi 3P_{\rm u} < \beta$ и самозащищенности от аварий LOF WS для БР, охлаждаемого эвтектическим сплавом Na-K, носит конфликтный характер, который, в свою очередь, определяется еще одним конфликтом — противоположными требованиями к доплеровскому коэффициенту реактивности в режимах LOF WS и TOP WS.

Полученные варианты (1 и 2 табл. 1, 2) обладают свойством внутренней самозащищенности от ряда аварий из числа ATWS. Это достигается за счет снижения рабочей температуры теплоносителя (и температуры на входе в активную зону), что, в свою очередь, негативно отражается на эффективности паросилового цикла и приводит к снижению к.п.д. до 27%. Низкая температура теплоносителя на входе в активную зону способствует осаждению примесей, находящихся в теплоносителе, на стенках входного коллектора и в нижней части активной зоны. Чтобы избежать подобных неприятностей, необходимо увеличить рабочие температуры теплоносителя в реакторе и температуру на входе в активную зону. Вариант 3 (табл. 1, 2) получен из варианта 1 при температурных ограничениях, характерных для БР с натриевым теплоносителем. Значения температуры на входе в активную зону (639 К) и среднего подогрева (181 К) приблизительно соответствуют РУ типа БН. Достичь приемлемого ПЭР (ПЭР (ПЭР) $< \beta$) в результате его минимизации и ПЭР $_{\rm p} < \beta$ при сохранении толщины экранов удалось лишь при исключении ограничений, определяющих внутреннюю самозащищенность от аварии LOF WS. Относительно высокая максимальная температура топлива в номинальном режиме (1910 К) вызывает опасение за самозащищенность реактора в аварийных режимах с неконтролируемым увеличением мощности. Однако, благодаря оптимальному выбору обратных реактивностных связей и хорошим теплофизическим свойствам нитридного топлива, его температура в аварийных режимах меньше предельно допустимого значения, соответствующего началу разложения нитрида.

Вариант 3 характеризуется интенсивным кипением теплоносителя в аварийной ситуации LOF WS (уже на 10-й секунде процесса при времени выбега ГЦН 30 с). Исключить кипение не удается ни повышением времени $t_{\scriptscriptstyle H}$ выбега (даже при $t_{\scriptscriptstyle H} \to \infty$), ни увеличением (в пределах допустимого) высоты тягового участка контура естественной циркуляции, т.е. установившегося режима естественной циркуляции не существует. Такова плата за приемлемые ПЭР и термодинамическую эффективность паросилового цикла.

Теплоноситель на основе сплава NA-K C большим содержанием натрия

Как отмечено в [2], определенный интерес представляет теплоноситель на основе сплава Na-K, температура замерзания которого немного выше комнатной, например, 60°C. Этому условию соответствует сплав 79%Na-21%K.

Варианты 4, 5 табл. 1, 2 получены в результате расчетно-оптимизационных исследований БР, охлаждаемого таким сплавом. Вариант 4 получен из варианта 1 табл. 1 заменой эвтектики Na-K сплавом с 79%-содержанием натрия при условии выполнения основных ограничений задачи. (Повышение доли натрия в сплаве привело к увеличению эффективного коэффициента размножения нейтронов на 13%.) При этом область допустимых значений температуры на входе в активную зону (составляющая вектора управления задачи) сужена по сравнению с исходным вариантом ограниче-

нием $T_{BX} \ge 639$ К. Толщины экранов не включались в число управлений, т.е. не изменялись в процессе решения задачи. В целом полученный вариант характеризуется положительным ПЭР $_{\rm u}$, в несколько раз превышающим β , отрицательным ПЭР $_{\rm p}$, внутренней самозащищенностью от аварий LOF WS, TOP WS, OVC WS и LOHS WS. Неодновременное наложение режимов (LOF+TOP+OVC) WS при $t_{\rm H} \ge 40$ с приводит к локальному максимуму температуры теплоносителя (не превышающего допустимое значение) и кипению при $t >> t_{\rm H}$.

Минимизация ПЭР и снижение максимальной температуры оболочки и теплоносителя в номинальном и аварийных режимах работы БР являются основными конкурирующими процессами при оптимизации характеристик безопасности рассматриваемого реактора. Снижение ПЭР $_{\rm q}$ до значения, меньшего β , при ПЭР $_{\rm p}$ < β и условии внутренней самозащищенности от ряда наиболее опасных аварий из числа ATWS (в том числе LOF WS) оказалось возможным за счет разрешения компромисса в сторону повышения температуры теплоносителя и оболочек твэлов в номинальном режиме, а также при незначительном снижении КВА (вариант 5). За счет снижения по абсолютному значению отрицательного доплеровского коэффициента реактивности (усугубляющего в данном случае аварийный режим LOF WS) удалось добиться улучшения (по сравнению с вариантом 1 табл. 1) самозащищенности от аварии LOF WS и наложения (LOF +TOP + OVC) WS, хотя в последнем случае теплоноситель кипит.

Таким образом один из компромиссных вариантов, характеризующийся внутренней самозащищенностью от наиболее опасных аварийных ситуаций и относительно высокой температурой теплоносителя в номинальном режиме, гарантирующей высокую термодинамическую эффективность паросилового цикла, является БР, охлаждаемый сплавом 79%Na-21%K.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование эвтектики Na-K для охлаждения активной зоны БР позволит не только детерминистически исключить аварии с захолаживанием теплоносителя, но и обеспечить внутреннюю самозащищенность от аварий других типов (из числа ATWS). Это достигается при комплексной оптимизации характеристик безопасности РУ. Таким образом, в свете новых требований к безопасности, сложившихся после Чернобыльской катастрофы, предполагающих исключение тяжелых аварий РУ, возможна «реанимация» старой концепции БР или, по крайней мере, можно утверждать, что с точки зрения возможности обеспечения внутренней самозащищенности концепция использования эвтектического сплава Na-K в качестве теплоносителя первого контура БР имеет право на существование.

С другой стороны, возможность отказа от систем электрообогрева контура является, пожалуй, единственным преимуществом БР, охлаждаемых сплавом на основе натрия и калия по сравнению с реакторами типа БН. С точки зрения возможности обеспечения внутренней самозащищенности от ряда аварий, реакторы, охлаждаемые сплавом Na-K, не имеют преимуществ по сравнению с БР с натриевым теплоносителем. Вследствие меньшей температуры кипения сплава Na-K по сравнению с чистым натрием для БР, охлаждаемых таким сплавом, трудно обеспечить самозащищенность от аварии типа LOF WS (даже при малом содержании калия в сплаве).

Литература

- 1. *Орлов В.В., Аврорин Е.Н., Адамов Е.О. и др.* Нетрадиционные концепции АЭС с естественной безопасностью (новая ядерная технология для крупномасштабной ядерной энергетики следующего этапа) // Атомная энергия. 1992. Т. 72. Вып. 4. С. 317-329.
- 2. Уолтер А., Рейнольдс А. Реакторы-размножители на быстрых нейтронах/Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- 3. *Кузьмин А.М., Окунев В.С.* Использование вариационных методов для решения задач обеспечения и обоснования естественной безопасности реакторов на быстрых нейтронах. М.: МИФИ, 1999.
- 4. Хромов В.В., Кузьмин А.М., Орлов В.В. Метод последовательной линеаризации в задачах оптимизации реакторов на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 1978.
- 5. *Хаммел Г., Окрент Д.* Коэффициенты реактивности в больших энергетических реакторах на быстрых нейтронах/Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1975.

Поступила в редакцию 28.06.2002

УДК 502.3

ПРИОРИТЕТЫ И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРОБЛЕМЕ «ГОРЯЧИХ» РАДИОАКТИВНЫХ ЧАСТИЦ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ «ГОРЯЧИХ» РАДИОАКТИВНЫХ ЧАСТИЦ

И.Я. Газиев*, Я.И. Газиев**

- *Обнинский государственный технический университет атомной энергетики, г. Обнинск
- **НПО "Тайфун" Росгидромета, г. Обнинск



Приведены сводные данные о различных источниках поступления в окружающую среду «горячих» радиоактивных частиц (ГРЧ) (с индивидуальными β-активностями порядка 1 Бк/част. и выше) и масштабах ее загрязнения этими частицами. Определены два приоритетных направления исследований по проблеме загрязнения окружающей среды отмеченными выше радиоактивными частицами. Первое из них относится к получению данных об основных физических характеристиках и условиях переноса в природных средах рассматриваемых ГРЧ в целях определения важнейших особенностей загрязнения окружающей среды этими частицами; второе – к получению данных об их радиационном воздействии на биосферу, включая человека. В работе рассмотрен ряд важных результатов исследований, проведенных в обоих указанных направлениях. Показаны некоторые возможности использования получаемых в лабораторных условиях ГРЧ для решения вопросов, связанных с организацией и проведением радиоэкологического мониторинга в системе "атмосфера - подстилающая поверхность - биота (включая человека)".

ВВЕДЕНИЕ

В радиоактивных техногенных аэрозолях и аэровзвесях, поступавших в окружающую среду, нередко наблюдались, как известно, высокоактивные частицы с индивидуальными бета-активностями порядка 1 Бк/част ($\sim 10^{-11}$ Ки/част) и выше. Такие частицы получили в литературе название "горячих" радиоактивных частиц [1]. В дальнейшем для краткости они обозначаются в тексте как ГРЧ $_{\beta}$. Следует отметить, что понятие "горячие" радиоактивные частицы относится и к альфа-активным частицам (ГРЧ $_{\alpha}$), также нередко присутствующим в техногенных радиоактивных аэрозолях. Это

частицы с активностями $10^{-13}-10^{-12}$ Ки/част. и выше. В будущем при техническом применении "горячих" радиоактивных частиц в различных типах лабораторных и полевых экспериментов возможно использование частиц, активность которых обуславливается чистым γ -излучателем — 99m Tc. Такие частицы будут обозначаться как ГРЧ $_{\gamma}$. Во многих случаях β - и α -активные частицы являются также источниками γ -излучения. Это учитывается при анализах радиационных характеристик ГРЧ $_{\beta}$ и ГРЧ $_{\alpha}$.

ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ОБРАЗОВАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ГРЧ РАЗЛИЧНОЙ ДИСПЕРСНОСТИ, МАСШТАБЫ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ПЕРЕНОСА В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

"Горячие" радиоактивные частицы наблюдаются в окружающей среде и в настоящее время. Исследования этих частиц продолжаются [2]. Сводные данные о различных типах источников поступления ГРЧ в окружающую среду и особенностях ее радиоактивного загрязнения этими частицами представлены в табл. 1.

Таблица 1 Источники поступления ГРЧ в окружающую среду и масштабы их переноса в системах "атмосфера - подстилающая поверхность" и "водосборные территории - водные объекты - донные отложения"

№ п/п	Источники	Масштабы переноса ГРЧ в окружающей среде
1.	Воздушные ядерные взрывы	Локальный, региональный и глобальный
2.	Башенные и наземные ядерные взрывы	Локальный, региональный и полуглобальный
3.	Территории ядерных полигонов и радиоактивных "следов" от ядерных испытаний	Локальный и региональный
4.	Радиационные аварии на ядерных объектах	Локальный, региональный и полуглобальный
5.	Предприятия ядерного энергетического комплекса (включая предприятия по добыче урана), АЭС, радиохимические комбинаты и предприятия, обеспечивающие переработку и утилизацию отработавшего ядерного топлива, а также захоронение радиоактивных отходов (в штатных режимах работы)	Локальный и региональный
6.	Ядерное топливо и продукты нейтронной активации в ядерных реакторах затонувших подводных лодок, а также захороненные в морях и океанах радиоактивные отходы	Локальный и региональный
7.	Опытные образцы аэрозольных генераторов ГРЧ, разрабатываемые в НПО "Тайфун" для трассерных исследований аспирации и осаждения аэрозолей в пробоотборных системах	Локальный при полигонных исследованиях

Примечание. Локальный масштаб переноса ГРЧ в окружающей среде – расстояние до нескольких десятков километров от места расположения источника до зоны максимальной плотности выпадений ГРЧ из атмосферы на подстилающую поверхность или переноса из водных объектов на их дно большей части этих частиц.

Важнейшим приоритетным направлением исследований при изучении особенностей радиоактивного загрязнения окружающей среды ГРЧ является получение данных об их основных физических характеристиках и условиях переноса в природных средах. Большой объем такой информации получен в [1]. В целом установлено, что при воздушных ядерных взрывах образовывались ГРЧ $_{\beta}$, размеры и активности большей части которых лежали в пределах от десятых долей до десятков мкм, а активности – от $\sim 1~$ Бк/част. до $10^4~$ Бк/част. соответственно. Причем на ГРЧ $_{\beta}$ приходились десятые доли суммарной β -активности средне- и труднолетучих радионуклидов, об-

разующихся при этих взрывах. К числу отмеченных радионуклидов относятся, например, 144 Ce+ 144 Pr, 95 Zr+ 95 Nb и 90 Sr+ 90 Y, вносящие существенный вклад в β -активности средне- и долгоживущих ГРЧ $_{\rm B}$.

В продуктах наземных ядерных взрывов дисперсности ГРЧ $_{\beta}$ были на два порядка меньше дисперсности ГРЧ $_{\beta}$ воздушных ядерных взрывов. При этом практически вся β -активность средне- и труднолетучих радионуклидов, образующихся при указанных ядерных взрывах, приходилась на ГРЧ $_{\beta}$. Эти нуклиды содержались, в основном, в радиоактивных частицах грубодисперсных аэрозолей и аэровзвесей. Выпадения их из радиоактивных облаков взрывов на подстилающую поверхность приводили к формированию радиоактивных следов на местности от наземных ядерных взрывов. Протяженность этих следов при мощных взрывах составляла многие десятки километров [3]. При наземных испытательных взрывах плутониевых бомб в окружающую среду также поступали значительные количества ГРЧ $_{\alpha}$, которые в настоящее время наблюдаются, в частности, на территории бывшего Семипалатинского ядерного полигона.

Образование частиц радиоактивных грубодисперсных аэрозолей и аэровзвесей происходило и во время ядерных аварий на $\Pi/0$ "Маяк", Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) и Сибирском химкомбинате. В первом и третьем случаях это были продукты аварийного взрывного распыления радиоактивных отходов, находившихся в хранилищах на территориях ядерных объектов, во втором – частицы ядерного топлива, диспергированного во время взрыва реактора IV энергоблока ЧАЭС. Выпадения $\Gamma P \Psi_{\beta}$ и $\Gamma P \Psi_{\alpha}$ из радиоактивных облаков этих взрывов на подстилающую поверхность также приводили к образованию их радиоактивных следов на местности и к интенсивному ее радиоактивному загрязнению.

Другие источники $\Gamma P H_{\beta}$ и $\Gamma P H_{\infty}$, указанные в таблице, менее значимы в загрязнении окружающей среды, чем те, которые были рассмотрены выше. Тем не менее основные физические характеристики этих частиц и условия загрязнения ими окружающей среды контролируются в рамках требований Норм радиационной безопасности, действующих в Российской Федерации.

ОЦЕНКИ МОЩНОСТЕЙ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ КОЖИ И ХРУСТАЛИКОВ ГЛАЗ ЧЕЛОВЕКА β-ИЗЛУЧЕНИЕМ ГРЧ

К числу важнейших приоритетов изучения загрязнения $\Gamma P H_{\beta}$ и $\Gamma P H_{\alpha}$ окружающей среды относятся исследования по проблеме воздействия на человека и биосферу в целом процессов этого загрязнения. Общая характеристика этой проблемы дана в [4]. Для примера ниже приведены схема и результаты выполненных нами оценок мощностей эквивалентных доз облучения базального слоя кожи человека радионуклидами, наблюдавшимися в $\Gamma P H_{\beta}$ от атмосферных ядерных взрывов и аварии на $\Gamma P H_{\beta}$ от $\Gamma P H_{\beta}$

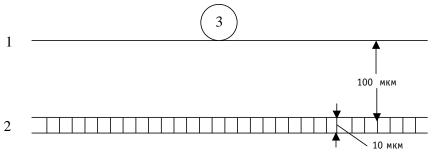


Рис. 1. Схема структуры кожи, использованная для оценок мощностей эквивалентных доз облучения базального слоя кожи ядерными излучениями ГРЧ $_{\beta}$ активностью 100 Бк: 1 — поверхность кожи; 2 — базальный слой; 3 - ГРЧ $_{\beta}$

Для участка кожи площадью 1 см 2 получены следующие оценки: для суммарных бета-активностей нефракционированных смесей продуктов ядерных взрывов и Чернобыльской аварии – 1,5·10- 4 3в/c; для 103 Ru – 7,0·10- 6 3в/c и для 106 Ru + 106 Rh – 3,2·10- 4 3в/c.

Максимальная наблюдавшаяся активность ГРЧ $_{\beta}$ достигала 30 МБк/част. [2], что в 3·10 5 раз превышает бета-активность "горячей" частицы в предыдущих оценках. Основным радионуклидом, содержавшемся в ГРЧ $_{\beta}$ с аномально высокой активностью, был 137 Cs. При попадании такой частицы на кожу человека мощность эквивалентной дозы облучения ее базального слоя, по нашим оценкам, может достигать 5·10 2 3в/с. В итоге намного превышаются допустимые для кожи мощности дозы облучения и допустимые уровни ее радиоактивного загрязнения — 200 β -част./см 2 -мин [6].

В дальнейшем при оценках радиационных последствий облучения кожи лица человека ядерными излучениями осевших на нее $\Gamma P H_{\beta,\gamma}$ может применяться схема ее структуры, аналогичная той, которая приведена на рис. 1, но естественно с учетом глубины расположения базального слоя кожного покрова лица.

Как известно из энциклопедической литературы, глазное яблоко человека имеет не совсем правильную шаровидную форму: переднезадний размер у взрослого человека в среднем равен 24,3 мм, вертикальный – 23,4 мм и горизонтальный – 23,6 мм. Масса глазного яблока составляет 7 – 8 г. Толщина роговицы в ее центральной части равна 0,7 мм, на периферии – около 1,2 мм; горизонтальный – 10 мм. Ниже рассмотрен случай, когда в средней части поверхности роговой оболочки глаза находится ГРЧв. Непосредственно за роговицей располагается передняя камера – пространство, заполненное так называемой камерной влагой, которая по химическому составу близка к спинно-мозговой жидкости. Задней стенкой передней камеры является радужка, в центре которой расположен зрачок – круглое отверстие диаметром около 3,5 мм. За радужкой находится хрусталик, имеющий высокую радиационную чувствительность. Основной дозовый предел его облучения приводится в нормах радиационной безопасности. Хрусталик – одна из основных частей диоптрического аппарата глаза. Он имеет форму двояковыпуклой линзы, диаметр которой составляет 9 – 10 мм, переднезадний размер 3,7 – 5 мм. С учетом рассмотренных выше размерных характеристик глаза и ядерно-физических характеристик ГРЧ₆, меченных ¹⁸⁶Re, ¹⁸⁸Re и ¹⁹⁸Au активностью 100 Бк (для примера), получены оценки мощностей эквивалентных доз облучения хрусталика глаза β-излучениями отмеченных радионуклидов. Результаты этих оценок приведены в табл. 2.

Из оценок мощностей доз облучения базального слоя кожи лица β -излучениями указанных в табл. 2 радионуклидов минимальная оценка также получается для ¹⁹⁸Au в соответствии со средней энергией β -излучения этого радионуклида (~0,31 МэВ). Средние энергии β -излучения ¹⁸⁶Re и ¹⁸⁸Re равны ~0,33 и ~0,752 МэВ соответственно, т.е. для трассерных экспериментов с точки зрения радиационной безопасности ¹⁹⁸Au предпочтительнее ¹⁸⁶Re + ¹⁸⁸Re.

Таблица 2

Оценки мощностей доз облучения β-излучением ¹⁸⁶Re, ¹⁸⁸Re и ¹⁹⁸Au хрусталика глаза человека

Нуклид	Мощность эквивалентной дозы при активности нуклида 100 Бк; Зв/с
¹⁸⁶ Re	3,3·10 ⁻⁸
¹⁸⁸ Re	4,1·10 ⁻⁶
¹⁹⁸ Au	9,3·10 ⁻⁹

НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГРЧ $_{\scriptscriptstyle \beta}$ И ГРЧ $_{\scriptscriptstyle \gamma}$ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ, ПРОВОДИМЫХ В АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБАХ И НА ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ПОЛИГОНАХ

Необходимо отметить, что ГРЧ могут использоваться в аэродинамических трубах и на испытательных полигонах в качестве трассеров в экспериментах по физике осаждения аэрозольных частиц в пробоотборных системах и на фантомах, а также при изучении процессов аэрального загрязнения природных сред аэрозолями вредных веществ. При осуществлении указанных возможностей уже в современных условиях должно начаться формирование нового перспективного направления исследований по проблемам гидродинамики многофазных систем, фундаментальной и прикладной физики аэрозолей с применением генераторов моно- и полидисперсных ГРЧ умеренных активностей, удовлетворяющих требованиям радиационной безопасности и идентификации различных видов ГРЧ при проведении указанных исследований трассерными методами. В частности, некоторые возможные варианты проведения этими методами опытов по рассматриваемым проблемам для случаев ГРЧ $_{\beta}$ (со смешанным β - + γ -излучением) и ГРЧ $_{\gamma}$ иллюстрируются рис. 2- 4.

Как известно, аэрозольные частицы, оседающие на горизонтальных планшетах с

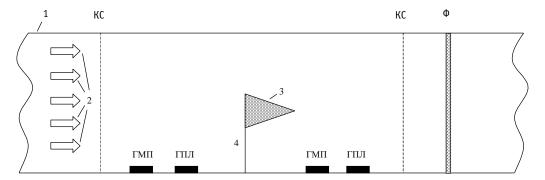
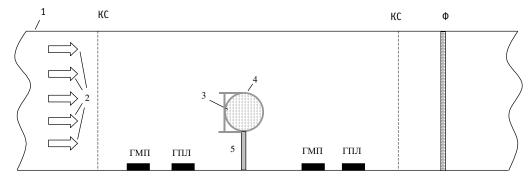


Рис. 2. Один из предлагаемых опытов по изучению особенностей отбора проб радиоактивных частиц пробоотборниками атмосферных аэрозолей и выпадений: 1- рабочая зона аэродинамической трубы; 2- потоки ГРЧ $_{\beta}$ и ГРЧ $_{\gamma}$ с разными γ -спектрами и различной дисперсности; КС - капроновые сетки с нитями диаметрами 50, 100, 200 или 500 мкм; ГМП - горизонтальный марлевый планшет; ГПЛ - горизонтальный планшет с липким покрытием; 3- "марлевый конус"; 4- стойка; $\Phi-$ двухслойный аэрозольный фильтр из фильтрующих материалов типа Φ ПП-15-2



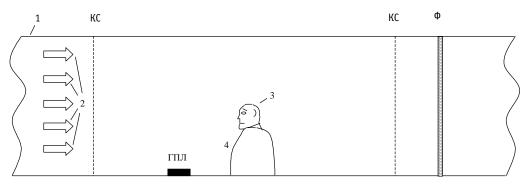


Рис. 4. Схема опытов по изучению осаждения ГРЧ на фантоме человеческой головы: 1 – рабочая зона аэродинамической трубы; 2 – потоки ГРЧ $_{\beta}$ и ГРЧ $_{\gamma}$ с разными γ -спектрами и различной дисперсности; КС – капроновые сетки с нитями диаметрами 50, 100, 200 или 500 мкм; ГПЛ – горизонтальный планшет с липким покрытием; 3 – фантом человеческой головы; 4 – подставка; Φ – двухслойный аэрозольный фильтр из фильтрующих материалов типа Φ ПП-15-2

липким покрытием (ГПЛ на рис. 2-4), улавливаются и удерживаются этими планшетами практически полностью, т.е. с эффективностью $\epsilon_{\Gamma\Pi\Pi} \approx 100$ %. Такие планшеты успешно применялись, например, в [7]. В случае оседания аэрозольных частиц на горизонтальные марлевые планшеты (ГМП на рис. 2-4) при умеренных и сильных ветрах эти частицы улавливаются и удерживаются этими планшетами естественно с эффективностью $\epsilon_{\Gamma M\Pi} < \epsilon_{\Gamma \Pi \Pi}$, причем, чем сильнее ветер, тем меньше $\epsilon_{\Gamma M\Pi}/\epsilon_{\Gamma \Pi \Pi}$ из-за увеличения ветрового сдува частиц с марлевых нитей, не имеющих липкого покрытия. Получение количественных данных об этих отношениях с учетом седиментационного и турбулентно-инерционного осаждения частиц на горизонтальные планшеты обоих рассмотренных типов имеет важное практическое значение, т.к. ГМП широко используются на сети наблюдательных пунктов Росгидромета при мониторинге радиоактивного загрязнения земной поверхности.

Для контроля степени однородности потока ГРЧ по поперечным сечениям рабочей зоны аэродинамической трубы в этой зоне должны устанавливаться капроновые сетки (КС), как это показано на рис. 2-4. Диаметры нитей $d_{\rm H}$ этих сеток равны 50, 100, 200 или 500 мкм. Первую пару таких сеток с $d_{\rm H}$ =50 или 100 мкм предпочтительнее использовать в опытах со среднедисперсными ГРЧ, вторую пару сеток с $d_{\rm H}$ =200 или 500 мкм — в опытах с грубодисперсными ГРЧ. Экспонированные КС должны авторадиографироваться с помощью рентгеновских пленок или фоточувствительной бумаги с соответствующим выбором времени авторадиографирования ГРЧ. Для оперативности необходимо использовать методы микрорадиометрии по β - и γ -излучениям ГРЧ их распределений по поверхностям КС.

Для предотвращения выхода радиоактивности из рабочей зоны аэродинамичес-кой трубы в окружающую среду должен использоваться оконечный аэрозольный фильтр ("Ф" на рис. 2- 4) из высокоэффективных фильтрующих материалов ФПП-15-2. Экспонированные во время опытов фильтры предлагается анализировать методами микро- и стандартной радиометрии, дополняемыми авторадиографическими методами в случаях возможности применения последних.

Центральными объектами, представленными на рис. 2-4, являются марлевый конус (один из недостаточно изученных аэрозольных пробоотборников системы радиационного мониторинга НПО "Тайфун"), "перекати-поле" (растение, которое может использоваться для биомониторинга процессов радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности в районе расположения бывшего Семипалатинского испытательного полигона) и, наконец, фантом человеческой головы, предназначенный, в первую очередь, для исследований осаждения ГРЧ различной дисперсности на лице и

глазах человека при разных скоростях ветра в загрязненной этими частицами атмосфере. Во всех перечисленных выше случаях целесообразно использовать труднолетучие при нагревании радиоактивные трассеры, которыми метятся ГРЧ. Тогда экспонированные во время опытов марлевый конус и "перекати-поле" вначале могут озоляться при температурах порядка 500° С, а затем их зольные остатки могут анализироваться стандартными β - и γ -радиометрическими методами, включающими в себя и γ -спектрометрический анализ.

Для аналогичных целей первичной пробоподготовки и проведения стандартной β - и γ -радиометрии анализируемых проб на типовую основу фантома человеческой головы материалов, подобных по своим свойствам в части осаждения ГРЧ коже лица и роговице глаз человека. После опытов раздельное озоление последних и отмеченных выше лоскутков и полосок также должно производиться при температурах порядка 500° С. Получаемые при этом зольные остатки обоих типов проб должны подвергаться стандартным β - и γ -радиометрическим анализам. В целом результаты всех анализов должны теоретически обобщаться и использоваться для получения физических характеристик исследуемых процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из вышеизложенного ясно, что исследования по проблеме загрязнения окружающей среды ГРЧ $_{\beta}$ и ГРЧ $_{\gamma}$ должны продолжаться по мере накопления данных о фактическом или потенциально возможном их содержании в различных природных объектах. В первую очередь, это относится к особо активным ГРЧ $_{\beta}$, подобным тем, которые наблюдались в районе расположения Красноярского горно-химического комбината авторами работы [2]. Как уже отмечалось ранее, активность одной из таких частиц достигала 30 МБк, которая обусловливалась содержащимся в этой частице 137 Cs.

В дальнейшем также целесообразно рассмотреть приоритеты и важнейшие результаты исследований по проблеме $\Gamma P H_{\alpha}$ в окружающей среде, а также потенциальные возможности их применения в трассерных экспериментах. Следует отметить, что проблема загрязнения окружающей среды $\Gamma P H_{\alpha}$ в данной работе не рассматривались.

Литература

- 1. Радиоактивные частицы в атмосфере/Пер. с нем. *под ред. А.В. Быховского.* М.: Госатомиздат, 1963. 220 с.
- 2. *Болсуновский А.Я., Горяченкова Т.А., Черкезян В.О., Мясоедов Б.Ф.* Горячие частицы в Красноярском крае//Радиохимия. 1998. T. 40. № 3. C. 271-274.
- 3. *Израэль Ю.А.* Радиоактивные выпадения после ядерных взрывов и аварий. С.-Пб.: Прогресс-погода, 1996. 356 с.
- 4. *Крышев И.И., Рязанцев Е.П.* Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. М.: ИздАТ, 2000. 384 с.
- 5. Газиев Я.И., Кабанов Ю.И. Изучение загрязнения приземного слоя атмосферы "горячими" радиоактивными частицами и ингалируемой фракцией аэрозольной составляющей продуктов аварии на ЧАЭС/Радиационные аспекты Чернобыльской аварии//Труды Первой всесоюзной конференции. С.-Пб.: Гидрометеоиздат, 1993. Т.1. С. 104-107.
- 6. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). Гигиенические нормативы. М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России. 1999. 116 с.
- 7. *Бызова Н.Л.* Рассеяние примеси в пограничном слое атмосферы. М.: Гидрометеоиздат, 1974. 192 с
- 8. Большая Советская энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1971. Т.б. С. 1729 1731.

УДК 621.039.51

К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ АБСОЛЮТНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРОТЯЖЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ МЕТОДОМ СОВПАДЕНИЙ

В.В. Дулин

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Определение абсолютной интенсивности точечных источников методом совпадений, используется давно. Но иногда возникает необходимость определить абсолютную интенсивность протяженного источника. В данной работе изложенны результаты измерений и анализа, позволяющие утверждать, что правильное значение абсолютной интенсивности протяженного источника может быть получено с учетом поправочного множителя D_{sq} - пространственного дайвен-фактора. Для вычисления D_{sq} необходимо вычислить распределение плотности потока нейтронов $\phi(x)^q$ и ценности относительно счета детектора $\phi^+(x)$.

Совпадения (во времени) актов регистрации излучения от двух детекторов ядерных излучений давно с успехом используется для определения абсолютной интенсивности источников. Разновидностью метода совпадений является, как известно, корреляционный анализ временных процессов.

При практическом использовании таких методов в случае протяженных в пространстве источников необходимо учитывать некоторые особенности метода.

Рассмотрим несколько примеров.

1. Пусть Q_1 и Q_2 источники, a и b - детекторы с эффективностями регистрации достигшего их излучения ε_a и ε_b . При этом, по существу, предполагается, что размер источника много меньше размера детектора.

Пусть g_{1a} и g_{2a} - вероятности излучению из источников Q_1 и Q_2 достигнуть детектора a, а g_{1b} и g_{2b} - детектора b. Будем называть далее произведение $\varepsilon_k g_{ik}$ ценностью источника Q_i по отношению к скорости счета детектора k.

Тогда скорости счета детекторов \mathcal{C}_a и \mathcal{C}_b и счета совпадений \mathcal{C}_{cosn}

$$\begin{split} C_a &= Q_1 \varepsilon_a g_{1a} + Q_2 \varepsilon_a g_{2a} \,; \\ C_b &= Q_1 \varepsilon_b g_{1b} + Q_2 \varepsilon_b g_{2b} \,; \\ C_{cosn} &= Q_1 \varepsilon_a g_{1a} \varepsilon_b g_{1b} + Q_2 \varepsilon_a g_{2a} \varepsilon_b g_{2b} \,. \end{split}$$

Если один из источников (например, Q_2) удален от детекторов ($g_{2a} = g_{2b} = 0$), то, измеряя скорости счета детекторов C_a и C_b и счета совпадений C, получаем абсолютную интенсивность источника

$$Q = C_a C_b / C_{cosn} = Q_1$$
 (1)

- простое общеизвестное соотношение, позволяющее определить Q_1 .

© В.В. Дулин, 2002

Во всех других случаях для получения сведения об абсолютной интенсивности Q_1+Q_2 необходимо выполнение ряда условий. Рассмотрим некоторые из них.

2. Если вероятности достичь детектора от Q_1 и Q_2 равны для каждого из счетчиков (например, источники расположены одинаково по отношению к каждому счетчику)

$$g_{1a} = g_{2a} = g_a$$
; $g_{1b} = g_{2b} = g_b$,

TO

$$Q = C_a C_b / C_{cosn} = (Q_1 \varepsilon_a + Q_1 \varepsilon_b)^2 / \varepsilon_a \varepsilon_b (Q_1 + Q_2);$$

и только для одинаковых эффективностей счетчиков ($\varepsilon_a = \varepsilon_b$) измеряемая величина Q будет равна сумме их интенсивностей:

$$Q = Q_1 + Q_2$$
.

3. Если же каждый из счетчиков расположен одинаково по отношению к каждому источнику:

$$g_{a1} = g_{b1} = g_1$$
; $g_{a2} = g_{b2} = g_2$, HO $g_1 \neq g_2$,

то

$$Q = C_a C_b / C_{cosn} = (Q_1 \varepsilon_a g_1 + Q_2 \varepsilon_b g_2)^2 / \varepsilon_a \varepsilon_b (Q_1 g_1^2 + Q_2 g_2^2),$$

и даже при $\varepsilon_a = \varepsilon_b$ измеряемая величина Q не будет равна сумме интенсивностей источников. Именно этот случай и реализуется для распределенных в пространстве источников:

$$Q = C_a C_b / C_{cosn} = (Q_1 g_1 + Q_2 g_2)^2 / (Q_1 g_1^2 + Q_2 g_2^2).$$
 (1')

Умножим в (1') числитель и знаменатель на $(Q_1 + Q_2)$:

$$\frac{\mathcal{C}_a \cdot \mathcal{C}_b}{\mathcal{C}_{\text{COBI}}} = \frac{(\mathcal{Q}_1 g_1 + \mathcal{Q}_2 g_2^2)^2}{(\mathcal{Q}_1 g_1^2 + \mathcal{Q}_2 g_2^2) \cdot (\mathcal{Q}_1 + \mathcal{Q}_2)} \cdot (\mathcal{Q}_1 + \mathcal{Q}_2).$$

Хорошо видно, что результаты измерений C_a C_b / C_{cosn} равны Q_2 + Q_1 , если умножить левую и правую части этого выражения на величину D_2 (поправочный коэффициент - пространственный дайвен-фактор):

$$D_2 = \frac{(Q_1 + Q_2)(Q_1g_1^2 + Q_2g_2^2)}{(Q_1g_1 + Q_2g_2)^2}.$$
 (2)

Это обеспечит правильное определение абсолютной величины Q_1+Q_2 , т.е. произведение D_2 и результата измерения C_a C_b / C_{cosn} будет равно величине Q_1+Q_2 .

Для вычисления поправочного коэффициента D_2 необязательно знать абсолютные значения Q_1 , Q_2 , g_1 и g_2 - достаточны их относительные значения. Отношение измеренных скоростей счета детектора от каждого из источников C_{a1} и C_{a2} или C_{b1} и C_{b2} , находящихся в одинаковом положении относительно детектора, дает возможность вычислить величину β , равную

$$\beta = C_{a2} / C_{a1} = C_{b2} / C_{b1} = Q_2 / Q_1$$
.

Измеряя скорости счета детектора при разном положении источника относительно детектора, получаем величину

$$\alpha = g_2 / g_1 = C_{a2} / C_{a1} = C_{b2} / C_{b1}$$

и тогда это позволяет вычислить

$$D_2 = \frac{(1+\beta)(1+\alpha^2\beta)}{(1+\alpha\beta)^2}.$$
 (3)

Для проверки справедливости соотношения (2) была проведена серия измерений в полиэтиленовом блоке с двумя сравнимыми по интенсивности точечными источниками. При этом использовался метод росси- α -измерений.

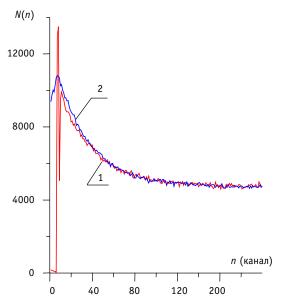


Рис. 1 Временные росси- α -распределения, измеренные с двумя 2) и одним 1) детектором

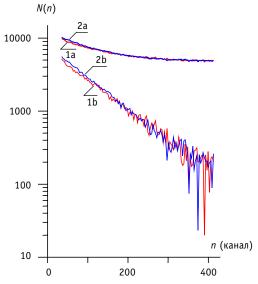


Рис. 2. Результат вычитания некоррелированного фона (1b и 2b)

Метод росси- α с успехом применяется для определения абсолютной интенсивности источников Cf-252 в неразмножающей среде [1]. Для измерения временного росси-α распределения используется установка (с двумя счетчиками нейтронов в водородосодержащей среде), в которой один из счетчиков дает старт временного анализатора (ВА), а импульс другого счетчика подается на счетный вход ВА (иногда через линию задержки). На рис. 1 (график с индексом 2) показан результат подобных измерений (ширина канала ВА 3.2 мкс, линия задержки 23 мкс).

Аналогичные результаты можно получать и в автокорреляционном режиме в том же полиэтиленовом блоке с одним счетчиком (см. рис. 1, график с индексом 1). Здесь отчетливо виден автокорреляционный пик в 7 - 8 каналах и провалы слева и справа от него. Провал слева связан с особенностями регистрации статистических импульсов таким ВА [2, 3]. Провал справа в 9 - 10 каналах связан с мертвым временем используемого Не-3-счетчика нейтронов (СНМ-18). Начиная со 150 канала наблюдается некоррелированная часть распределения. На рис. 2 изображены те же графики в логарифмическом масштабе, начиная с 12 канала (см. графики 1а и 2а). Также на рис. 2 изображены те же коррелированные части временных росси-α-распределений с вычтенной некоррелированной частью распределения N_{Φ} (см. графики 1b и 2b). N(n) - количество импульсов в каналах ВА.

Абсолютная интенсивность источников Cf в методе Росси- α определяется по формуле [1]

$$Q = \frac{D_i N_{\phi}}{S \Delta t (1 + C \tau)},$$

где - D_i - изотопный дайвен-фактор; N_ϕ - средний счет в каналах некоррелированной части спектра; S - площадь под коррелированной частью спектра; Δt - ширина канала ВА; C - скорость счета детектора в стартовом канале; τ - время жизни нейтронов в блоке.

Правда, некоторая доля коррелированной части временного распределения, измеренного в автокорреляционном режиме, пропадает. Однако с помощью получаемой из 1b и 2b величины τ можно определить эту долю, умножив величину S на $e^{n\Delta t/\tau}$, где n - число "пропавших" каналов (в нашем случае n=3).

После введения этой поправки результат определенной обоими вариантами метода величины Q согласуется обычно в пределах статистической погрешности.

Для проверки правильности соотношения (2) автокорреляционный метод предпочтительнее, поскольку автоматически обеспечивает выполнение условия $\varepsilon_a = \varepsilon_b$.

Два Cf-источника (далее Q_1 и Q_2) известной интенсивности располагались на корпусе счетчика в двух точках: в середине (положение 0) и на краю (положение 1). Результаты измерения приведены в таблице.

N	Абсолютная интенсивность	Резул	тьтаты измер	ений
	источников Q (дел/с) при разных их положениях на корпусе камеры	1	2	3
1	Q ₁ (0)	3244±28	3188±32	3166±27
2	Q ₂ (0)	4375±44	4457±48	4427±50
3	Q ₂ (1)	4673±70	4577±56	4570±63
4	Q ₁ (0)Q ₂ (0)	7836±175	7716±103	7787±174
5	Q ₁ (0) Q ₂ (1)	6492±131	6653±138	6999±120
6	$\alpha = C_2(1)/C_2(0)$	0.455±0.1	0.49±0.1	0.52±0.1
7	D_2	1.19	1.13	1.14
8	D ₂ *Q ₁ (0) Q ₂ (1)	7725±160	7719±150	7979±140

Первые три строки таблицы — результаты измерений, полученные, когда либо только источник Q_1 , либо только источник Q_2 находились на корпусе счетчика (например, $Q_1(0)$ — результат, полученный, когда источник Q_1 находился на корпусе счетчика в положении Q_1 ;

- четвертая строка оба источника находились в положении 0 $(Q_1(0)Q_2(0))$;
- пятая строка источник Q_1 находился в положении 0, а источник Q_2 находился в положении 1 ($Q_1(0)Q_2(1)$) (имитируя распределенный источник);
- в шестой строке приведена измеренная величина α для источника 2 (здесь $\mathcal{C}_2(1)$ и $\mathcal{C}_2(0)$ скорости счета детектора в положении 1 и 0 от источника \mathcal{Q}_2);
- в седьмой строке приведены полученные (согласно (2)) из данных 1,2 и 6 строк величины D_2 ;
- в восьмой результаты перемножения величины D_2 и $Q_1(0)$ $Q_2(1)$, т.е. истинная абсолютная суммарная интенсивность обоих источников.

Таким образом, для результата измерения абсолютной интенсивности разнесенных в пространстве источников $Q_1(0)Q_2(1)$ правильная величина получается с учетом пространственного фактора D_2 ($D_2*Q_1(0)Q_2(1)=Q_1(0)Q_2(0)$):

$$Q = \frac{D_i D_2 N_{\phi}}{S \Delta t (1 + C \tau)}.$$

Заметим, что, как видно из (3), для получения D_2 вовсе не нужно знание абсолютных интенсивностей источников Q_1 и Q_2 , а достаточно знания их относительной величины $\beta = C_2(0)/C_1(0) = Q_2/Q_1$.

Этот результат может быть обобщен и для случая непрерывно распределенных в пространстве источников. Для этого необходимо знать непрерывную функцию ценности $\phi^+(x)$ положения источников по отношению к детектору.

Воспользуемся известной процедурой [4], записав для среды, где находятся распределенные источники спонтанных делений и детектор, уравнение для плотности потока нейтронов $\varphi(x)$

$$\widehat{L}\varphi(x)+q(x)=0\tag{4}$$

и сопряженное ему относительно скорости счета детектора $\mathcal C$ уравнение

$$\widehat{L}^{+} \varphi^{+}(x) + \Sigma_{d}(x) = 0. \tag{5}$$

Здесь x - условное обозначение всех переменных, от которых зависит решение уравнений (4) и (5); q(x) - плотность источников нейтронов; $\Sigma_d(x)$ - макроскопическое сечение поглощения нейтронов в детекторе; W - объем детектора; $\Sigma_d(x)$ = 0 везде вне W.

Из сопряженности операторов $\widehat{\mathcal{L}}$ и $\widehat{\mathcal{L}}^{\scriptscriptstyle +}$ следует

$$C = \int q(x)\varphi^+(x)dx = \int \Sigma_d(x)\varphi(x)dx.$$

Получение C как свертки источника q по ϕ^+ удобно, поскольку позволяет получать величину C для разных q(x) без нахождения ϕ и кроме того, что особенно важно для этой работы, позволяет интерпретировать эксперименты с методом совпадений. Это становится очевидным с выяснением смысла ϕ^+ . Согласно (6) для точечного единичного источника делений Q скорость счета C пропорциональна произведению q(x) = vQ(x) и ценности источника $\phi^+(x)$: $C \sim Q \lor \phi^+(x)$. Соответственно число коррелированных совпадений в методе росси- α будет пропорционально $Q \lor (\lor -1) \phi^{+2} dx$.

Таким образом, скорость счета от протяженного источника C является обобщением выражений для C_1 и C_2 . Функция $\phi^+(x)$ является ценностью относительно скорости счета детектора от точечного источника в точке x, и величину D_2 (2) в этом случае можно обозначать как D_{sq} :

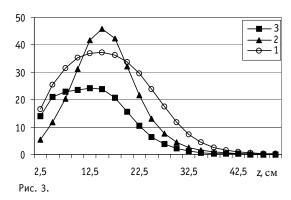
$$D_{sq} = \frac{\int Q(x)dx \int Q(x)\phi^{+2}(x)dx}{[\int Q(x)\phi^{+}(x)dx]^{2}}.$$
 (7)

Здесь $\int Q(x)dx$ - полный интеграл от плотности источника деления (аналог первого множителя числителя выражения (2); $\int Q(x)\phi^{+2}(x)dx$ - аналог второго множителя числителя выражения (2); $[\int Q(x)\phi^+(x)dx]^2$ - аналог знаменателя выражения (2).

Как видно, выражение для D_{sq} совпадает в данном случае по форме с известным определением пространственного дайвен-фактора D_{s} , учитывающего распределение плотности делений в реакторе. Отличие лишь в том, что вместо плотности делений размножающей среды $\Sigma_f(x)\phi(x)$ выражение (7) содержит плотность спонтанных источников Q(x). Очевидно, что в случае одного точечного источника $D_{sq}=1$.

Результаты экспериментов, приведенные в табл. 1, были проанализированы с помощью решения уравнений (4) и (5). При этом использовалось интегрально-транспортное приближение в плоской геометрии и четырехгрупповая система констант [5]. В расчетной модели счетчик ($\Sigma_d(x) \neq 0$) располагается вдоль z от 0 до 25 см. (длина счетчика 25 см.).

На рис. 3 (см. график 1) изображена зависимость ценности помещенного источника $\phi_{\chi}^{+}(z)$ (усредненная по спектру деления ценность) при таком положении счетчика.



Источники деления Q_1 и Q_2 (Q_1 < Q_2 - см. табл. 1), как мы помним, помещались вместе на корпусе счетчика в двух положениях: либо оба источника находились в середине счетчика (см. график 2), либо источник Q_1 находился в середине, а Q_2 - на краю (z =1.5 см) счетчика (см. график 3). Соответствующие этим положениям источников

распределения скорости захватов по $z \int \Sigma_d(z,E) \phi(z,E) dE$ изображены на рис. 3.

Величина рассчитанного согласно (7) пространственного дайвен-фактора D_{sq} при положении $Q_1(0)Q_2(0)$ равна единице, а при положении $Q_1(0)Q_2(1)$ - 1.16, что соответствует среднему D_{sq} из таблицы. Отметим, что разброс значений D_{sq} в таблице связан с неопределенностью положения источника при проведении эксперимента. Действительно, если переместить источник Q_2 вправо (от положения 0) по счетчику (источник Q_1 все время находится в середине него), то при передвижении Q_2 в точку Z=26.25 см пространственный дайвен-фактор D_{sq} равен 1.14, а в Z=28.75 см. D_{sq} равен 1.31, т.е. неопределенность в положении источника в один сантиметр дает изменение D_{sq} , примерно равное 0.07.

Вышеизложенные результаты измерений и анализа позволяют утверждать, что правильное значение абсолютной интенсивности протяженного источника

 $\int Q(x)dx$ может быть получено с учетом поправочного множителя D_{sq} . Для вычисле-

ния D_{sq} необходимо вычислить распределение плотности потока нейтронов $\phi(x)$ и ценности относительно счета детектора $\phi^+(x)$.

Описанный метод может быть применен и для определения абсолютной активности протяженных источников γ -излучения, таких как элементы стальных конструкций реактора с γ -активностью Co^{60} .

Литература

- 1. Дулин В. В., Михайлов Г. М.//Атомная энергия. 1995. Т. 78. Вып. 3. С. 151 155.
- 2. Tsutomu Iijima On the Background Counts in the Rossi- α Experiment, Nucleonik, 11. bd., Helf 3, 1968.
- 3. Doulin V., Mozhaev V. Nuclear Instruments and Methods. 1972. C. 277.
- 4. *Белл Д., Глестон С.* Теория ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1974. С. 201.
- 5. Бартоломей Г.Г., Бать Г.А., Байбаков В.Д., Алхутов М.С. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1989. 512 с.

Поступила в редакцию 28.02.2002

УДК 621.039.58

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ НАСОСОВ ВЫСОКОГО И НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ АЭС С ВВЭР

С.Т. Лескин, В.В. Валуй

Обнинский государственный технический университет атомной энергетики, г. Обнинск



Обсуждаются вопросы применения метода главных компонент для диагностики состояния насосов высокого и низкого давления АЭС с ВВЭР. На основании выбранной статистической модели с использованием энтропии получен комплекс информативных признаков, описывающий динамику поведения насосов. Представлены результаты обработки данных четвертого блока Балаковской АЭС. Выделены аномалии в состоянии насосов и параметры, обусловившие их возникновение.

ВВЕДЕНИЕ

Основной проблемой ядерных установок является обеспечение надежности элементов технологических систем, входящих в их состав. В настоящее время важной задачей эксплуатации оборудования в энергосистемах является поддержание его работоспособности экономически оптимальными мерами. Расчеты показывают, что оптимальное проведение профилактических мероприятий в соответствии с текущим состоянием объектов снижает до пяти раз расходы на ремонты и ущербы от перерывов энергоснабжения [1]. Отказы насосного оборудования на АЭС с ВВЭР составляют около 6% от общего числа нарушений [2], и эта цифра практически не уменьшается.

На АЭС с ВВЭР особые затруднения вызывает диагностика насосов системы аварийного ввода бора (САВБ) высокого и низкого давления. Контроль состояния насосов САВБ на станции проводится посредством периодических испытаний, в ходе которых производится замер ряда технологических параметров. Вывод о необходимости ремонта делается по принадлежности полученных данных установленному регламентом диапазону значений.

Однако, как показывает опыт эксплуатации, несмотря на проводимую в результате испытаний диагностику выход насосов из строя зачастую является непредсказуемым. Причиной этого может быть как несовершенство процедуры сбора данных, так и неверная их интерпретация, влекущая за собой ошибочную диагностику. Даже если испытания прошли успешно, у эксплуатационного персонала нет достаточной уверенности, что при необходимости включения или при следующих испытаниях не произойдет отказ.

© С.Т. Лескин, В.В. Валуй, 2002

Еще одна проблема диагностирования состояния насосов высокого и низкого давления заключается в том, что выход их из строя происходит именно вследствие испытаний. С одной стороны, надо чаще проводить испытания, чтобы своевременно обнаружить отклонение в состоянии насоса, с другой стороны, каждый его запуск приводит к уменьшению ресурса агрегата.

Таким образом, одной из задач обеспечения надежной работы АЭС с ВВЭР является создание сравнительно недорогой системы диагностики насосов САВБ, которая могла бы своевременно по результатам испытаний обнаружить аномальные процессы в элементах их оборудования до развития нарушений, связанных с отключениями насосов.

Для решения задачи диагностирования насосов САВБ, в условиях которой приходится иметь дело с множеством данных различной физической природы, определяющих состояние объекта, наиболее эффективно использование статистической модели представления исходных данных [3]. Разложение Карунена-Лоева позволяет наглядно выявить аномалию, устойчиво проявляющуюся в некотором наборе измеряемых параметров, которые отображаются в двумерное пространство главных компонент. Поскольку матрица данных испытаний имеет большую размерность, для отображения в двумерное пространство проводится отсеивание малоинформативных параметров посредством вычисления энтропии для различных временных сечений. Данная процедура позволяет из всего объема измеряемых параметров выбрать комплекс информативных признаков, тем самым уменьшая размерность и повышая информативность входной матрицы данных.

Как показала практика, до самого процесса аварийного отключения насоса его параметры находятся в эксплуатационных пределах, и в рамках традиционного подхода (контроля за отклонениями параметров) нет оснований считать его аномальным. Напротив, результаты обработки данных позволяют сделать вывод, что аномалия в состоянии насосов САВБ проявляется задолго до обнаружения нарушения штатными системами контроля.

В статье описываются возможности метода главных компонент. Приводятся результаты обработки реальных данных Балаковской АЭС.

ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ

В задаче исследования динамики поведения насосов данные испытаний образуют трехмерное пространство, измерениями которого являются дата испытания, временное сечение, отсчитываемое от момента пуска насоса, и номер измеряемого параметра. Таким образом, анализ поведения насосов от испытания к испытанию представляет собой довольно трудоемкий процесс, для оптимизации которого необходимо произвести сокращение матрицы исходных данных.

На первом этапе осуществляется переход от трехмерного к двумерному пространству посредством формирования матрицы информативных признаков. Поскольку кривые зависимостей поведения любого измеряемого технологического параметра практически идентичны от испытания к испытанию, за исключением некоторых участков, в качестве информативных признаков целесообразно взять значения параметров в тех сечениях графиков, которые наиболее отличаются друг от друга и, следовательно, отображают основную информацию о динамике поведения насосов.

В качестве меры, характеризующей вероятностный разброс данных, принимается энтропия [4] - сумма произведений вероятностей различных состояний какого-либо параметра X на логарифмы этих вероятностей, взятая с обратным знаком:

$$H(X) = -\sum_{i=1}^{N} p_i \log p_i, \tag{1}$$

где p_i – вероятность i-ого состояния; N – число состояний системы.

Для выбора наиболее информативного сечения кривой воспользуемся тем свойством, что энтропия обращается в максимум, когда все состояния системы равновероятны. Будем рассматривать значения какого-либо параметра на фиксированном участке кривой в разных испытаниях как возможные состояния системы. В таком случае, чем меньше энтропия временного сечения кривой, тем в большем числе испытаний значения параметра на этом участке принимают близкие, похожие значения, т.е. имеют тенденцию повторяться от испытания к испытанию. Следовательно, основную информацию несут в себе временные сечения, обладающие максимальной энтропией.

Для каждого измеряемого параметра выделяется определенное количество информативных сечений, которые в совокупности представляют набор информативных признаков, описывающих поведение насоса в течение отдельного испытания. Таким образом, формирование матрицы информативных признаков позволяет, с одной стороны, перейти к двумерному пространству, что облегчает процесс анализа динамики поведения насосов, и, с другой стороны, отсеять малоинформативный «шум», что повышает точность анализа.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ МАТРИЦЫ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ В ПРОСТРАНСТВО ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

Поскольку полученная на первом этапе матрица информативных признаков еще не позволяет наглядно отобразить структуру данных, для их дальнейшего анализа с целью выявления особенностей поведения насосов необходимо перейти от большего числа исходных информативных признаков к существенно меньшему числу наиболее эффективных, являющихся функциями от исходных признаков. Имеются, по крайней мере, три предпосылки, позволяющие сократить размерность данных: вопервых, дублирование информации при наличии сильно взаимосвязанных признаков, во-вторых, наличие признаков, мало меняющихся от одного измерения к другому, в-третьих, возможность представления некоторых признаков без существенной потери информации в виде линейных функций от других признаков.

Для представления матрицы информативных признаков в наглядном виде применяется разложение Карунена-Лоева [5, 6], которое позволяет осуществить переход от полученного двумерного пространства к более эффективному пространству главных компонент следующим образом. Пусть X - матрица размера $n \times m$, где n - число информативных признаков, m - количество испытаний, тогда ее можно представить разложением

$$X = \Phi Y$$
, (2)

где $\Phi = [\Phi_1...\Phi_n]; Y = [Y_1...Y_n]^T$.

Матрица Φ состоит из n линейно независимых векторов-столбцов (базисных векторов). При выполнении для нее условия ортонормированности компоненты матрицы Y определяются следующим образом:

$$Y = \Phi^T X. \tag{3}$$

Следовательно, Y представляет собой ортогональное преобразование исходной матрицы X. При этом компоненты каждого столбца матрицы Y являются признаками, которые вносят вклад в представление соответствующего столбца матрицы X.

Оптимальный выбор матрицы Ф удовлетворяет условию

$$\mathsf{S}\Phi_i = \lambda_i \Phi_i, \ i = (1, ..., n), \tag{4}$$

где S - корреляционная матрица исходной матрицы X, т.е. оптимальные базисные векторы разложения — это собственные векторы корреляционной матрицы S, соот-

ветствующие собственным значениям λ . Такое разложение минимизирует ошибку представления данных и в то же время максимально учитывает закономерности их распределения.

Уравнение (4) можно записать в следующей форме:

$$(S - \lambda E)\Phi = 0, (5)$$

где E — единичная матрица. При симметричности корреляционной матрицы имеется n вещественных неотрицательных корней системы уравнений (5).

В данной задаче векторы Y_i рассматриваются как признаки, представляющие компоненты матрицы Х. Эффективность каждого признака определяется величиной соответствующего собственного значения. Если некоторый признак Y_i исключается из разложения, то среднеквадратичная ошибка преобразования вектора X в пространство, базисом которого является вектор Φ_i , увеличивается на λ_i . Поэтому для уменьшения количества признаков нужно, в первую очередь, исключить признак с наименьшим собственным значением и т.д. Если собственные числа пронумерованы в порядке убывания

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_n > 0, \tag{6}$$

 $\lambda_1 > \lambda_2 > \ldots > \lambda_n > 0$, то признаки должны быть упорядочены по важности таким же образом.

Размерность признакового пространства уменьшается за счет того, что для разложения используются только первые две главные компоненты собственных векторов, соответствующие наибольшим собственным числам и несущие в себе более 90% информации. Поскольку эти компоненты вычисляются для каждого информативного параметра исходной матрицы, они служат своеобразными весами, определяющими отображение того или иного параметра в признаковое пространство. Следовательно, если при анализе отображения информативных параметров в признаковое двумерное пространство обнаружатся особенности в состоянии какого-либо насоса (точки, описывающие его поведение, будут расположены отдельно от общей группы), посредством сопоставления отображения информативных параметров в пространство главных компонент с весами параметров в этих же компонентах можно выявить причины аномалии.

Отдельный интерес представляет временная зависимость дисперсии [7] первой главной компоненты. Фактически дисперсию можно интерпретировать как меру отклонения состояния насоса от общего режима, имевшего место для насосов одной системы на какой-либо момент времени. Поскольку первая главная компонента несет в себе определяющее количество информации (порядка 80%), анализ данной зависимости позволяет выявить, когда и как именно происходило зарождение и развитие аномалии в состоянии какого-либо насоса.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для преобразования в пространство главных компонент использовались данные Балаковской АЭС по насосам высокого давления (TQ13D01, TQ23D01, TQ33D01) и низкого давления (ТQ14D01, TQ24D01, TQ34D01). В число измеряемых в процессе испытаний данных, описывающих поведение насосов, входили параметры, отображенные в табл. 1.

Графики зависимостей энтропий от временных сечений приведены на рис. 1 и 2. Матрицы информативных признаков соответственно для насосов высокого и низкого давления формировались из значений параметров, соответствующих сечениям с максимальной энтропией (на рисунках помечены маркером). Посредством вариантных расчетов установлено, что в информативную матрицу для насосов высокого давления целесообразно включать по три признака для каждого измеряемого парамет-

Таблица 1

Обозначение параметра	Наименование параметра
P01	Давление во всасывающем трубопроводе насоса
P02	Давление в напорном трубопроводе насоса
F01	Расход насоса
T04	Температура 1 подшипника
T05	Температура 2 подшипника
T06	Температура 4 подшипника
T07	Температура 3 подшипника
T08	Температура за гидропятой

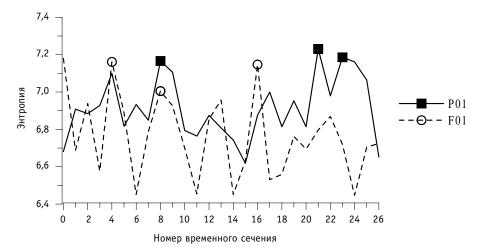


Рис. 1. Зависимость энтропии от временного сечения для насосов высокого давления

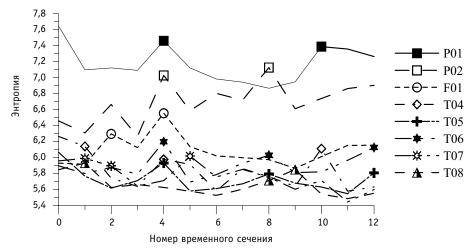


Рис. 2. Зависимость энтропии от временного сечения для насосов низкого давления

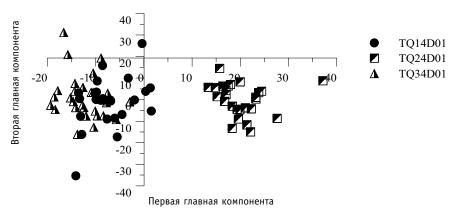


Рис. 3. Отображение матрицы информативных признаков в пространство главных компонент для насосов высокого давления

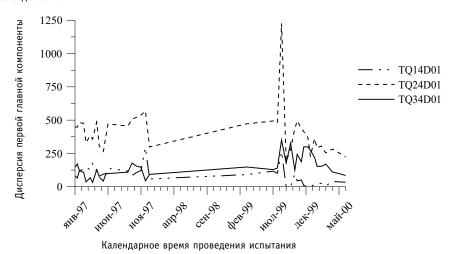


Рис. 4. Дисперсия первой главной компоненты для насосов высокого давления

ра, а для насосов низкого давления - по два информативных признака для давлений и расхода и по три признака для температур.

Результаты обработки данных испытаний насосов высокого давления представлены на рис. 3 и 4. Как видно из рис. 3, точки, описывающие поведение насосов ТQ14D01 и TQ34D01, довольно плотно налагаются друг на друга, образуя единый класс, т.е. состояния этих насосов не различаются. Точки, определяющие состояние насоса TQ24D01, расположены далеко в стороне от основной группы, что можно интерпретировать как отличие в поведении этого насоса от общего режима. При анализе рис. 4 можно заметить, что аномалия на насосе TQ24D01 носит длительный временной характер, ее пик приходится на лето 1999 г., после чего она постепенно уменьшается.

По результатам сопоставления рис. 3 и 5 можно предположить, что к информативным параметрам, определяющим особенность состояния насоса TQ24D01, относится динамика расхода воды. К сожалению, это предположение относительно, поскольку в данном случае приходится ограничиваться тем небольшим количеством параметров, которые измеряются в ходе испытаний.

Результаты обработки данных насосов низкого давления представлены на рис. 6 и 7. Анализ поведения насосов низкого давления показывает, что области проекций данных по каждому насосу равномерно «размыты» вокруг начала координат, пересекаются между собой, и нет какой-либо закономерности в расположении точек. В

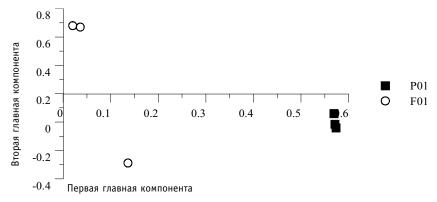


Рис. 5. Веса параметров в главных компонентах для насосов высокого давления

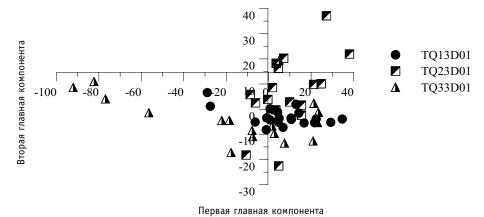


Рис. 6. Отображение матрицы информативных признаков в пространство главных компонент для насосов низкого давления



Рис. 7. Дисперсия первой главной компоненты для насосов низкого давления

целом состояние всех насосов можно считать удовлетворительным. Исключение составляют отдельные точки, характеризующие поведение насоса TQ33D01, отстоящие далеко в стороне от общей группы. Из рис. 7 видно, что аномалия на этом насосе проявляется не постоянно, а периодически, причем со временем период ее проявления имеет тенденцию уменьшаться. Следовательно, можно предположить наличие в

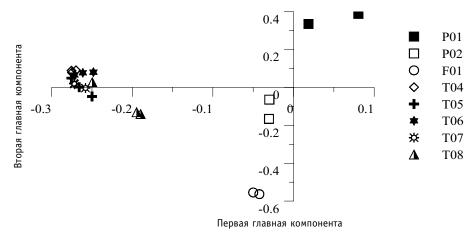


Рис. 8. Веса параметров в главных компонентах для насосов низкого давления

поведении насоса TQ33D01 отклонений от общего режима, которые в случае отсутствия своевременного вмешательства могут привести к отказу насоса.

По сопоставлению с графиком весов параметров (рис. 8) можно предположить, что определяющими параметрами в случае выявленных отклонений явились температуры подшипников.

ВЫВОДЫ

Разработан алгоритм диагностики состояния насосов САВБ, который позволяет распознавать аномалию в поведении насосов высокого и низкого давления на ранней стадии развития, что дает возможность своевременно принять меры для устранения причин нестабильной работы насоса и предотвратить аварию.

В основе алгоритма лежит разложение Карунена-Лоева. Из общего комплекса измеряемых параметров выделяются наиболее информативные. Матрица информативных признаков преобразуется в визуально наглядное пространство главных компонент.

Алгоритм опробован на данных Балаковской АЭС. Выделены длительная аномалия на насосе высокого давления второго канала и периодические отклонения в работе насоса низкого давления третьего канала. Установлено, что в первом случае аномалию определила динамика расхода воды, во втором случае — температуры подшипников.

Литература

- 1. *Копьев. Ю.В.* Экспресс анализ-работы АЭС России за первое полугодие 2000 г. Концерн «Росэнергоатом».
- 2. *Антонов. Б.В.* Итоги эксплуатации АЭС России в 1995 г. // Ядерная энергетика. 1996. -№3. C.4-10.
- 3. *Лескин С.Т., Зарюгин Д.Г.* Разработка алгоритмов распознавания состояния оборудования АЭС по анализу данных оперативного технологического контроля // Научные исследования в области ядерной энергетики в технических вузах России. -М.: Изд. МЭИ, 1999.
- 4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: М.: Высшая школа, 1999.
- 5. 3агоруйко Н.Г. Методы распознавания и их применение. Советское радио, 1972.
- 6. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов. М: Наука, 1979.
- 7. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности: Справ.изд. М: Финансы и статистика, 1989.

УДК 621.039.526:621.039.546.8

ВЕРИФИКАЦИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕНДА "ЦИРКУЛЯЦИОННАЯ ПЕТЛЯ"

Е.Ф. Авдеев, И.А. Чусов, В.И. Белозеров, В.В. Максимовский, А.Я. Устюжанин, С.П. Пашков, А.В. Шувалов

Обнинский государственный технический университет атомной энергетики, г. Обнинск



В работе приводится описание теплогидравлического стенда "Циркуляционная петля" кафедры "Теплофизика" ИАТЭ. Описаны разработанная система динамического управления теплогидравлическими режимами, необходимыми в ходе экспериментальных работ, и система автоматического сбора и обработки экспериментальных данных. Приведены результаты экспериментального исследования некоторых характеристик стенда в сравнении с опытными данными других авторов и общепринятыми расчетными зависимостями.

ВВЕДЕНИЕ

Расчет гидравлических потерь в контурах АЭС связан с необходимостью оптимизации их гидравлических характеристик и направлен на уменьшение потерь на собственные нужды и увеличения КПД установок в целом. Основные потери напора в контуре складываются из потерь на местные сопротивления. Это обусловлено тем, что течение теплоносителя осуществляется с достаточно большими числами Рейнольдса, при которых величины местных сопротивлений достигают максимальных значений.

Для получения оптимальных гидравлических потерь представляется важным проведение экспериментальных работ на установке, включающей в себя все основные виды местных сопротивлений в широком диапазоне режимных параметров, аналогичных реальным, возникающих при эксплуатации теплоэнергетических установок.

Стенд предназначен для исследования гидродинамических и теплофизических характеристик одно- и двухфазных течений, встречающихся в трактах первого контура и КМПЦ действующих и перспективных атомных электрических станций, а также верификации расчетных кодов, описывающих течение теплоносителя в контурах АЭС. Стенд позволяет выполнять экспериментальные исследования, связанные со стационарными и нестационарными режимами при переходных процессах, включая гидравлические удары.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА

В 1996-1999 гг. на кафедре "Теплофизика" ИАТЭ был смонтирован, введен в эксплуатацию и прошел опытные испытания экспериментальный стенд "Циркуляцион-

[©] Е.Ф. Авдеев, И.А. Чусов, В.И. Белозеров, В.В. Максимовский, А.Я. Устюжанин, С.П. Пашков, А.В. Шувалов, 2002

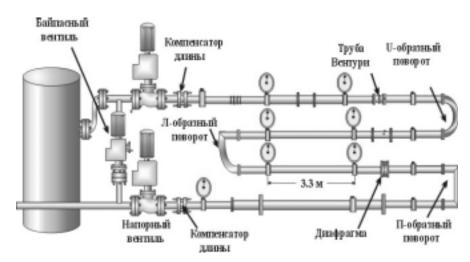


Рис. 1. Схема стенда "Циркуляционная петля"

ная петля". Стенд содержит питательно-приемный бак с подсоединенными к нему трубопроводами основного контура и консольным насосом K-8/18-C-У. Принципиальная схема стенда (без насоса) представлена на рис.1. Тракт основного контура общей длинной 45 м выполнен из нержавеющей стали. Диаметр труб основного контура варьируется в диапазоне от 50 до 82 мм. Общие характеристики стенда приведены в табл. 1; в табл. 2 приведены гидродинамические и геометрические параметры в сравнении с действующими энергоблоками типа ВВЭР. Стенд оснащен запорной

Общие характеристики стенда

Таблица 1

Название характеристики	
Длина основного контура	45 м
Длина рабочего участка основного контура	38 м
Высота стенда (по баку)	2.2 м
Масса теплоносителя в баке (основного контура)	600 кг
Теплоноситель основного контура	Вода
Давление на выходе из насоса	3 атм. (30 м.вод.ст.)
Тип консольного насоса (основной контур)	K-8/18
а) подача	8 м ³ /ч
б) напор	18 м. вод. ст.
Стандартные расходомерные устройства	
а) труба Вентури (Гершеля)	Исполнение ГОСТ 23720-79
б) диафрагма	Исполнение РД-50-411-83

Таблица 2

Сравнение некоторых гидродинамических характеристик экспериментального стенда с параметрами действующих реакторных установок (реакторы типа ВВЭР)

Характеристика	BB9P-210	BB3P-365	BB3P-440	BB3P-1000	Стенд
Отношение высоты корпуса к диаметру	2.93	3.07	3.07	2.4	1.88
Общая длина первого контура, м	-	-	26.5	49.8	45
Число Рейнольдса (в контуре)	3.01*10 ⁷	4.0*10 ⁷	3.96*10 ⁷	6.82*10 ⁷	4*10 ⁵
Максимальные скорости (по петле) м/с	7.7	10.0	9.6	9.3 м/с	4.26



Рис 2. Общий вид питательно-приемного бака и запорной арматуры

арматурой с сервоприводами, аналогичной арматуре, используемой на действующих АЭС и ТЭС, что позволяет оперативно изменять расход и давление в основном контуре. Условный диаметр вентилей 50 мм.

На рис. 2 показан общий вид питательно-приемного бака стенда с запорной арматурой, в качестве которой используются три фланцевые клиновые задвижки 30с915нж (ЗКЛПЭ-40).

Для исследования неизотермических режимов внутрь питательно-приемного бака вмонтирован теплообменник с отдельным вспомогательным контуром разогрева, включающим в себя насос и водоподогреватель мощностью 15 кВт.

Для измерения уровня теплоносителя в питательном баке основного контура стенд оснащен уровнемером ДД-01 с блоком индикации БИ и блоком уставок нижнего и верхнего уровня БИУ-2УИ.

Эксперименты, выполненные на стенде в 1997-1998 гг., позволили рассчитать ос-

Таблица 3
Основные гидродинамические характеристики некоторых прямолинейных участков стенда (тракт основного контура)

Диаметр труб, мм	Число Рейнольдса	Измеренный перепад давления, Па	Коэффициент сопротивления трения			ия
			Эксперимент на стенде	Формула Блазиуса	Формула Филоненко	Формула Никурадзе
50	7.5 10 ⁴	441.0	1,96E-02	1,91E-02	1,91E-02	1,88E-02
	1.0 10 ⁵	728.0	1,82E-02	1,78E-02	1,80E-02	1,78E-02
	1.4 10 ⁵	1340.6	1,71E-02	-	1,68E-02	1,66E-02
66	8,8E+04	138,69	2,07E-02	1,84E-02	1,85E-02	1,82E-02
	1,0E+05	181,81	2,00E-02	1,77E-02	1,79E-02	1,77E-02
	1,6E+05	402,17	1,72E-02	-	1,62E-02	1,62E-02
82	7,5E+04	320,41	1,84E-02	1,91E-02	1,91E-02	1,88E-02
	1,0E+05	590,45	1,88E-02	1,78E-02	1,79E-02	1,77E-02
	1,3E+05	896,92	1,67E-02	-	1,70E-02	1,68E-02

новные гидравлические характеристики стенда, которые приведены в табл. 3, в сравнении с общепринятыми расчетными зависимостями для различных по диаметру участков труб. Приведенные ниже результаты экспериментов получены при температуре воды $\approx 20\,$ °C.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И СБОРА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Основной концепцией при разработке системы контроля являлось недопущение потери управления над запорно-регулирующей арматурой и выхода из строя основных измерительных датчиков стенда. Это условие положено в основу организации системы контроля и сбора экспериментальных данных.

Система управления и сбора экспериментальных данных состоит из трех основных компонентов: 1) блока магнитных пускателей (БМП); 2) стойки управления вентилями (СУВ); 3) системы контроля и автоматического управления теплофизическими экспериментальными работами (СКАУТЭР), включающей в себя стойку КАМАК-ВЕКТОР и управляющий компьютер. Блок-схема системы управления и сбора экспериментальных данных приведена на рис. 3.

Программа по обслуживанию системы СКАУТЭР - GALIAF была разработана на платформе объектно-ориентированого языка Delphi 4.x, 5.x. Программа ориентирована на работу под управлением операционной системы Windows 98/NT. Она состоит из 8 модулей, отвечающих за отображение, расчет конечных значений, расчет констант, обработку расположения датчиков по каналу, а также модуля, написанного на языке Assembler, выполняющего связующую роль между РС и КАМАК-ВЕКТОРОМ посредством

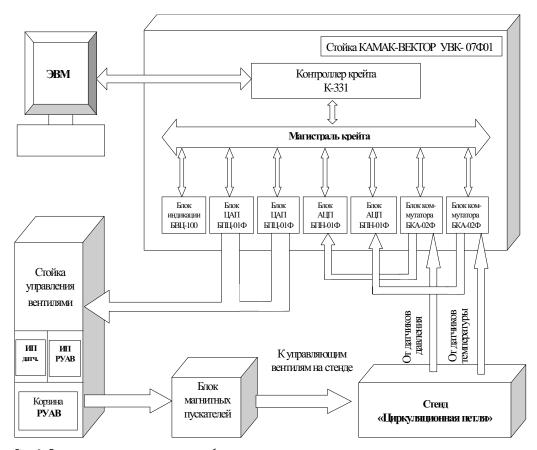


Рис. 3. Блок-схема системы управления и сбора экспериментальных данных

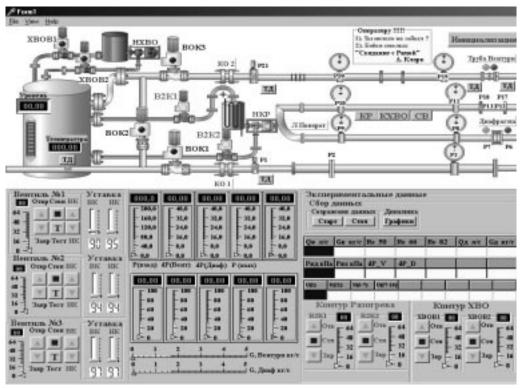


Рис 4. Общий вид интерфейса оператора стенда "Циркуляционная петля"

передачи команд NAF в блок интерфейса K-331, и получении ответных сигналов со стойки канала каркаса (СКК). Отметим, что сбор и обработка данных осуществляется в режиме реального времени. Программа управления позволяет осуществлять визуализацию данных на следующих взаимодополняющих двух уровнях.

- 1. Оперативная визуализация реализована на двух взаимодублирующих уровнях. Первый уровень визуализация посредством индикаторов. Внешний вид индикаторов выполнен в соответствии с внешним видом приборов, используемых на атомных и тепловых электрических станциях. Шкалы индикаторов имеют цветную окраску, что позволяет быстро усвоить и проанализировать полученную информацию о текущих режимах работы установки. Кроме этого индикаторы снабжены указателями критических положений, что также способствует быстроте реакции оператора на происходящие в системе события. Второй уровень визуализация посредством вывода оперативных данных в таблицы. Необходимость дублирования оперативных данных вызвана необходимостью одновременного охвата оператором всех параметров, отвечающих за надежность и безопасность работы установки в целом. Вид интерфейса в режиме оперативных данных показан на рис. 4.
- 2. Динамическая визуализация осуществляет графический вывод основных измеряемых и рассчитываемых параметров (массовый и объемный расходы, определенные по трубе Вентури и диафрагме, перепады давления на этих сужающих устройствах, температура теплоносителя, давление на входе и выходе рабочего участка стенда, перепады давления на U- и П-образных поворотах). В режиме работы динамической визуализации происходит накопление измеренных и рассчитанных параметров в реальном времени. Накопленные данные резервируются в оперативной памяти компьютера и при достижении их объема 64 К автоматически сохраняются на диске. В ходе работы оператор имеет возможность просмотреть всю предысторию про-

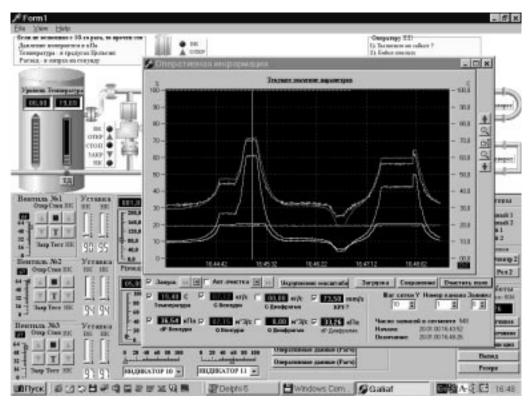


Рис 5. Графическое представление измеряемых динамических параметров стенда

ведения измерений, не останавливая выполнения программы. Типичный вид интерфейса динамической визуализации представлен на рис. 5.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕВИЗИИ НЕКОТОРЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Основные измерения проводились в штатном режиме работы стенда. При этом температура теплоносителя равнялась температуре окружающей среды (» 20°С). Диапазон изменения чисел Рейнольдса составлял от $8*10^4$ до $4*10^5$. Расход в контуре составлял от 2 до 5 л/с.

Регулирование режимов работы осуществлялось двумя путями: напорным вентилем (рис. 1) при полностью открытом вентиле на байпасной линии; байпасным вентилем при полностью открытом вентиле на напорной ветке основного контура. Причем вентиль сброса теплоносителя в питательно-приемный бак был полностью открыт в течение всего времени эксперимента. Во время проведения экспериментов снимались показания с образцовых манометров с классом точности 0,1 — 0,15, расположенных вдоль всего тракта основного контура, которые обрабатывались по соответствующим зависимостям.

С целью проверки соответствия гидравлических характеристик стенда общепринятым табличным и расчетным соотношениям, а также экспериментальным данным других авторов были проведены специальные модельные опыты по экспериментальному определению коэффициентов сопротивления трения на различных режимах.

Расчет численных значений коэффициента сопротивления трения проводился на основе формулы Дарси-Вейсбаха.

Перепады давления измерялись на всех характерных прямолинейных участках стенда. Результаты этих измерений представлены в табл. 3 и на рис. 6. На этом же

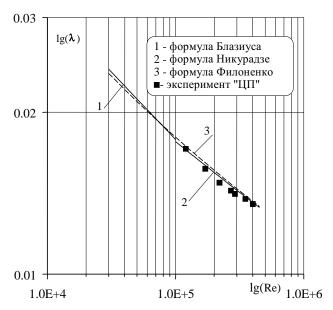


Рис 6. Сравнение опытных и расчетных данных для коэффициента сопротивления трения

рисунке приведено сравнение рассчитанных и экспериментальных значений коэффициента сопротивления трения в зависимости от числа Рейнольдса по сравнению с расчетными формулами Блазиуса, Филоненко и Никурадзе [1]. Из рисунка видно, что полученные экспериментальные значения хорошо согласуются с расчетными величинами. Относительная ошибка экспериментальных значений коэффициентов сопротивления трения не превышала 1.5%.

Другой важной характеристикой стенда являются величины коэффициентов местных сопротивлений. Из рис. 1 видно, что стенд имеет несколько видов местных сопротивлений, наиболее часто встречающихся в промышленных установках.

Экспериментально определялись коэффициенты местного сопротивления для U-

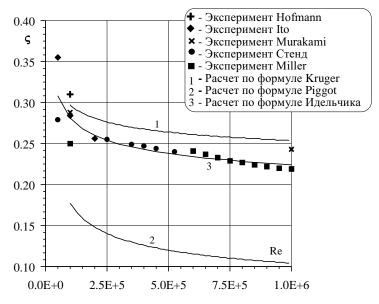


Рис 7. Сравнение экспериментальных данных различных авторов на U-образном повороте

Таблица 4

Re	ζ Стенд Эксп	$\zeta^{3\kappa cn}[2]$	$\zeta^{\Im\kappa cn}[3]$	$\zeta^{\mathcal{I}_{\kappa cn}}[4]$	ζ ^{Эκсп} [5]	ζ ^{Pacчem} [6]	ζ ^{Pacчem} [7]	ζ Расчет [8]
1*10 ⁵	0.271	0.284	0.31	0.288	0.25	0.275	0.293	0.172

образного поворота потока, Л-образного поворота и П-образного поворота потока. Для расчета значений коэффициентов местных сопротивлений использовалась формула Вейсбаха.

Отметим, что основные опыты по определению коэффициентов местных сопротивлений были проведены при достаточно высоких числах Рейнольдса (квадратичная область сопротивления), что соответствует стационарным условиям функционирования реально действующих энергоблоков АЭС и ТЭС. Кроме того, в справочной литературе (как отечественной, так и зарубежной) приводятся значения коэффициентов местных сопротивлений в автомодельной области, когда они перестают зависеть от числа Рейнольдса.

В табл. 4 приведены измеренные значения коэффициента местного сопротивления для U-образного поворота (R/d=3, d=50 мм) в сравнении с экспериментальными и расчетными данными других авторов для числа Рейнольдса $1*10^5$. На рис. 7 показаны экспериментальные данные в более широком диапазоне чисел Рейнольдса.

Из табл. 4 и рис. 7 хорошо видно, что полученный экспериментальным путем коэффициент местного сопротивления сравнительно хорошо согласуется с расчетными и экспериментальными данными других авторов. Это обстоятельство позволяет сделать вывод не только о достоверности полученных данных, но и о правильности проведенной тарировки и методики эксперимента.

Выполненная ревизия гидравлических характеристик делает возможным моделирование на стенде "Циркуляционная петля", являющемся полупромышленной установкой, теплогидравлических процессов в контурах ЯЭУ и других теплоэнергетических установок.

Литература

- 1. *Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П.* Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). Энергоатомиздат, 1990. С. 358.
- 2. Ito H. Pressure Losses in Smooth Pipe Bends. Trans. ASME. Ser. D. №3. 1960. P. 34-42.
- 3. Hofmann A. Loss in 90-Degree Pipe Bends of Constant Circular Cross-section. Trans. ASME. -1935. P. 29-41.
- 4. *Murakami M., Shimizu V.* Experimental Formulae on the Hydraulic Loss in Pipe Bends. -Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. -1977. 43. №3. P. 174-183.
- 5. Miller D.S. Internal Flow. A Guide to Losses in Pipe and Duct Systems. BHRA, 1971.
- 6. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992.
- 7. Krugger H. Berechnung von Druckverlusten in Rohrkrummern. Maschinenbau Technik. №3. 1970.
- 8. *Piggot R.*J.S. -Trans. ASME. №11. 1957. P. 59-68.

Поступила в редакцию 29.07.2002

УДК 621.039.534

ПАРАМЕТРЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ КВАЗИОДНОМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ДВУХФАЗНЫХ НЕРАВНОВЕСНЫХ ПОТОКОВ. ОБОБЩЕНИЕ ДЛЯ ТЕЧЕНИЙ В КАНАЛАХ ПРОСТОЙ ГЕОМЕТРИИ

Ю.Н. Корниенко

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Работа посвящена построению обобщенных иерархически замкнутых аналитических зависимостей для параметров распределений \mathcal{C}_{ks} квазиодномерной формы уравнений неразрывности, энергии и движения двухфазных неравновесных потоков на примере модели потока дрейфа. Основным допущением при выводе квадратур и проведении количественных оценок является справедливость степенных аппроксимаций профилей локальных параметров фаз. Выявлены и доказаны свойства дополнительности и зеркальной симметрии для параметров распределений фаз, полезные для верификации замыкающих соотношений \mathcal{C}_{ks} .

ВВЕДЕНИЕ

В отечественной и зарубежной литературе представлено большое количество работ по гидродинамике, тепло- и массообмену неравновесных двухфазных потоков, выполненных с использованием различных многомерных уравнений законов сохранения массы, импульса и энергии. Однако только относительно недавно были предприняты строгие и систематические исследования корректных форм двухфазных уравнений сохранения [1-4]. Эти исследования показали, что хотя и вполне возможно записать точные уравнения сохранения, но высокая степень их сложности и огромное количество детализированной локальной и статистической информации, требуемой для решения, препятствуют их использованию в практических приложениях. Таким образом, необходимо применять упрощенные формы уравнений сохранения для многих проблем, имеющих практическое значение. Это в особенности относится к задачам анализа аварий с «большой» и «малой» потерей теплоносителя из контура ЯЭУ и используемым для этого кодам «улучшенных оценок» типа RELAP5, RETRAN (США), CATHARE (Франция), ТРАП (Россия). Текущие версии этих кодов основаны на одномерных формах уравнений законов сохранения и замыкающих соотношениях, полученных в ограниченном диапазоне режимных условий и поэтому не всегда адекватных исследуемым аварийным режимам.

Большинство предыдущих упрощенных формулировок уравнений сохранения игнорировали или не полностью учитывали радиальные распределения фаз, фазовых скоростей и энтальпий. Эти эффекты радиальных распределений явно учитываются

© Ю.Н. Корниенко, 2002

в данной работе путем введения интегральных параметров распределений двухфазных потоков (C_{ks}), представляющих [5] поправочные множители (подобные коррективам Буссинеска и Кориолиса для однофазных течений). Необходимо отметить, что различные формы одномерных уравнений законов сохранения, в том числе содержащие и параметры распределений разной степени полноты, использовались ранее в отдельных исследованиях [6-10] и в кодах, например, RELAP5/M3.2 использует C_0 .

Однако оказался не рассмотренным ряд теоретически важных и полезных в практике экспериментальных и расчетных исследований вопросов, связанных с собственно свойствами параметров распределений, как таковых: 1) анализ и взаимосвязь параметров распределений различных субстанций между собой; 2) проблемы получения компактной и универсальной формы замыкающих соотношений для параметров распределений и их верификации, 3) их количественная оценка и диапазоны изменения. Данный цикл статей посвящен рассмотрению указанных проблем на основе единой квазиодномерной формулировки.

1. КВАЗИОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ НЕРАВНОВЕСНОГО ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА

Корректным приемом перехода к одномерной формулировке является осредне-

ние в поперечном сечении (A) канала $\langle f_{ks} \rangle = \int_A f_{ks} dA/A^*$ локальных субстанций и их потоков $f_{ks} = f(x, y, z, t)$ таких как масса, инерция, энергия, количество движения, помеченных далее индексами (s = 0, 1, 2, 3) для каждой из фаз (k = f или g - жидкость или пар (газ)). Подынтегральная функция f_{ks} в общем случае конвективно-диффузионных явлений переноса [1-5, 10], записанная в виде произведения переменных (ϕ_{ks} , например, фазосодержания α_k , энтальпии h_k , плотности потока j_s , или скорости фаз w_k), представляет собой плотность объемного потока массы, импульса или энергии $f_{ks} = \phi_{ks}$. j_s . Из-за отличий в распределениях (профилях) ϕ_{ks} и возникают осреднения вида

$$C_{ks} = \frac{\langle \varphi_{ks} j_s \rangle}{\langle \varphi_{ks} \rangle \langle j_s \rangle} = \frac{A \int_A \varphi_{ks} j_s dA}{\int_A \varphi_{ks} dA \int_A j_s dA} \Big|_{\substack{npu \ occeso\ u\\ cummempuu}} = \frac{\int_0^1 \varphi_{ks} j_s \gamma R^{\gamma - 1} dR}{\int_0^1 \varphi_{ks} \gamma R^{\gamma - 1} dR \int_0^1 j_s \gamma R^{\gamma - 1} dR}, \tag{1}$$

иллюстрируемые определениями из колонок 1 и 2 табл. 1. В частности, при $\phi_{ks} \equiv \alpha$ и $j_s \equiv j$ имеем C_0 - параметр распределения двухфазного потока Зубера-Финдлея [11].

Здесь уместно отметить, что поскольку параметры распределений составлены из локальных переменных, входящих в законы сохранения, то в них отражается как структура (другими словами «иерархия») взаимосвязей параметров \mathcal{C}_{ks} , так и взаимосвязь самих законов сохранения между собой. Последнее будет приводить к итеративному характеру алгоритмов расчета, использующих параметры распределений в квазиодномерных расчетных кодах.

Изложенное выше определение параметров распределений представляет собой обобщение введенных в [6, 11, 12] коэффициентов осреднения. Запись одномерных уравнений с параметрами распределений, равными единице $C_{ks} \equiv 1$, соответствует принятию допущения о плоских профилях параметров фаз. Вид и количество парамет-

^{*)} В цилиндрических координатах (r,θ,z) имеем $\langle f_{ks} \rangle = \frac{1}{A} \int\limits_0^\theta \int\limits_0^{k_s} f_{ks} 2\pi r dr d\theta$ или $\langle f_{ks} \rangle = \int\limits_0^1 f_{ks} \gamma R^{\gamma-1} dR$ - при осевой симметрии с $R=r/r_w$. Параметр γ обобщает геометрию для плоской $(\gamma=1)$ или круглой $(\gamma=2)$ трубы.

ров распределений зависят от принятой модели двухфазного потока - модель потока дрейфа, двухжидкостная и т.д.

В основе настоящего анализа лежит модель потока дрейфа (МПД), впервые предложенная в работе [11]. Модель потока дрейфа связывает локальные характеристики фаз [2, 13] с движением центра объема двухфазной смеси через скорость всплытия (дрейфа) легкой фазы соотношениями МПД (см. табл. 1). Подставляя их в локальные уравнения законов сохранения в результате действия оператора осреднения (1), приходим к следующей одномерной форме, содержащей параметры распределений в качестве поправочных коэффициентов к осредненным значениям переменных в уравнениях неразрывности фаз, импульса и энергии смеси:

$$\frac{\partial m_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} G_k = \langle \Gamma_k''' \rangle, \tag{2}$$

Таблица 1 Функциональный вид параметров распределений C_{ks} для одномерных уравнений законов сохранения двухфазного (двухкомпонентного) потока для случая монотонных профилей истинного объемного содержания фазы k и энтальпии фазы k, (k=1,2)

Наименование коэффициента	Определение	Аналитическая зависимость	Соотношения дополнительности
осреднения	МПД: $j = j_1 + j_2$	и балансы	
Параметр распределения двухфазного	$C_{k0} = \frac{\langle \alpha_k j \rangle}{\langle \alpha_k \rangle \langle j \rangle}$	$C_{k0} = 1 + \frac{\gamma}{m+n+\gamma} \left(1 - \frac{\alpha_{kw}}{\langle \alpha_k \rangle} \right)$	$1 \equiv \sum_{k=1}^{2} c_{k0} \langle \alpha_{k} \rangle$
потока (фазы <i>k</i>) * энтальпии	$*C_{kh} = \frac{\langle h_k j \rangle}{\langle h_k \rangle \langle j \rangle}$	$C_{kh} = 1 + \frac{\gamma}{l_k + m + \gamma} \left(1 - \frac{h_{kw}}{\langle h_k \rangle} \right)$	-
Параметр распределения энтальпии	$C_{k1} = \frac{\langle \alpha_k h_k \rangle}{\langle \alpha_k \rangle \langle h_k \rangle}$	$C_{k1} = 1 + \frac{\gamma^2 \left(1 - \frac{\alpha_{kw}}{\langle \alpha_k \rangle}\right)}{\ell_k + n + \gamma} \left(1 - \frac{h_{kw}}{\langle h_k \rangle}\right)$	$\sum_{k=1}^{2} C_{k1} \langle c_{k} \rangle \langle h_{k} \rangle = h_{e1}$
фазы <i>k</i>	(3° _k / (1.° _k /	$\ell_k + n + \gamma \left(\qquad \langle h_k \rangle \right)$	$h_{e^1} = \langle \sum_{k=1}^{L} c_k h_k \rangle$
Параметр распределения потока энтальпии	$C_{k2}^{j} = \frac{\langle \alpha_{k} h_{k} j \rangle}{\langle \alpha_{k} j \rangle \langle h_{k} \rangle}$	$C_{k2}^{j} = 1 + (C_{kh} - 1) \left(1 + F_k \frac{C_{k0} - 1}{C_{k0}} \right)$	$\sum_{k=1}^{2} C_{k2} \langle X_{k} \rangle \langle h_{k} \rangle = h_{e2}$
фазы <i>k</i>	$C_{k2} = \frac{\langle \alpha_k h_k w_k \rangle}{\langle \alpha_k w_k \rangle \langle h_k \rangle}$	$C_{k2} = \left(C_{k2}^{j} + \frac{C_{k1}}{C_{k0}}\widetilde{W}_{kj}\right) \frac{1}{1 + \widetilde{W}_{kj}}$	$h_{e^2} = \frac{\int_0^\infty q_w'''(z)dz}{\langle \rho w \rangle}$
Динамический параметр распределения	$C_{k3}^{j} = \frac{\langle \alpha_{k} j^{2} \rangle}{\langle \alpha_{k} \rangle \langle j \rangle^{2}}$	$C_{k3}^{j} = 1 + \frac{2m+n+2\gamma}{2\gamma m} (C_{k0} - 1)$	$1 \equiv \sum_{k=1}^{2} C_{k3}^{j} \langle \alpha_{k} \rangle$
фазы к	$C_{k3} = \frac{\langle \alpha_k w_k^2 \rangle}{\langle \alpha_k \rangle \langle w_k \rangle^2}$	$C_{k3} = \frac{C_{k3}^{j} + 2C_{k0}W_{kj} + W_{kj}^{2}}{(1 + W_{kj})^{2}}$	$0 \equiv \sum_{k=1}^{2} \widetilde{W}_{kj} \langle \alpha_{k} \rangle$
Относительная скорость дрейфа и другие	$\widetilde{W}_{kj} = \frac{\langle \alpha_k W_{kj} \rangle}{\langle \alpha_k \rangle \langle j \rangle}$	$c_k = \alpha_k \rho_k / \rho;$	$1 \equiv \langle \tilde{j} \rangle \sum_{k=1}^{2} \rho_{k} \langle \alpha_{k} \rangle C_{k0}^{w}$
дополнительные определения	$\langle X_k \rangle = \frac{\langle \alpha_k \rho_k w_k \rangle}{\langle \rho w \rangle}$	$\langle j \rangle = \langle j \rangle / \langle \rho w \rangle$ $\rho = \sum_{k=1}^{2} \alpha_{k} \rho_{k}; \rho w = \sum_{k=1}^{2} \alpha_{k} \rho_{k} w_{k}$	$C_{k0}^{w} = C_{k0} + \langle \widetilde{W}_{kj} \rangle$
$\langle \phi \rangle = \int_{0}^{1} \phi \gamma R^{\gamma - 1} dR , \gamma = 0$	[1 – пл. канал 2 – кр. труба	$F_k = \frac{(m+\gamma)^2}{l_k n} \left[\frac{(l_k + \gamma)(n+\gamma)(l_k + m)}{\gamma(m+\gamma)(l_k + n + \gamma)(l_k + n + \gamma)} \right]$	$\begin{pmatrix} +\gamma \end{pmatrix} (m+n+\gamma) \\ \begin{pmatrix} l_k+m+n+\gamma \end{pmatrix} - 1 \end{bmatrix}$

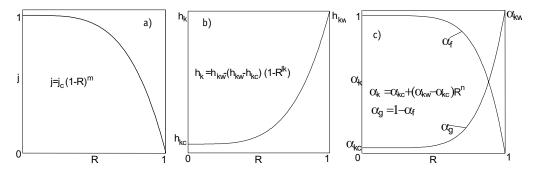


Рис. 1. Степенные аппроксимации профилей параметров: a) плотности объемного потока смеси; b) энтальпии фаз h_k c) истинного объемного фазосодержания α_k

где k=f или g - жидкость или пар (газ),

$$\frac{\partial \langle \rho w \rangle}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(C_{g3} \frac{G_g^2}{m_g} + C_{f3} \frac{G_f^2}{m_f} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} - \Delta P_\delta' - g \langle \rho \rangle - \langle F_w'''(\lambda, ...) \rangle, \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(C_{g1} m_g \langle h_g \rangle + C_{f1} m_f \langle h_f \rangle + \left(C_{g3} \frac{G_g^2}{m_g} + C_{f3} \frac{G_f^2}{m_f} \right) \right) + \\
+ \frac{\partial}{\partial z} \left(C_{g2} G_g \langle h_g \rangle + C_{f2} G_f \langle h_f \rangle + \left(C_{g4} \frac{G_g^3}{m_g^2} + C_{f4} \frac{G_f^3}{m_f^2} \right) \right) = \langle q_w'''(h_q, \dots) \rangle$$
(4)

где массовая скорость смеси

$$\langle \rho w \rangle = \langle \sum_{k=1}^{2} \alpha_{k} \rho_{k} w_{k} \rangle = \langle \dot{j} \rangle [\rho_{f} - \langle \alpha \rangle \mathcal{C}_{0} (\rho_{f} - \rho_{g})] - \langle \alpha \rangle \overline{w}_{gj} (\rho_{f} - \rho_{g}), \tag{5}$$

объемные расходы паровой и жидкой фаз на единицу площади

$$\langle j_q \rangle = \langle \alpha \rangle (C_0 \langle j \rangle + \overline{W}_{qj}), \tag{6}$$

$$\langle j_{f} \rangle = \langle j \rangle - \langle \alpha \rangle (\mathcal{C}_{0} \langle j \rangle + \overline{W}_{gj}), \tag{7}$$

массы фаз на единицу объема и массовые скорости фаз

$$m_k = \langle \alpha_k \rangle \rho_k \tag{8}$$

$$G_k = \rho_k \langle j_k \rangle$$
 (9)

При выводе уравнений (2) - (4) были приняты следующие допущения: 1) давление в поперечном сечении канала постоянно, 2) влияние изменения температуры в поперечном сечении на плотности фаз отсутствует. В левых частях этих уравнений стоят осредненные в поперечном сечении канала изменения во времени масс фаз, энтальпии смеси в единице объема и массовой скорости смеси, а также изменения (ускорения) в аксиальном направлении массовых скоростей фаз, потока энтальпии смеси и потока количества движения смеси.

Таким образом, как это хорошо видно из системы уравнений (2)-(9), отличные от единицы коэффициенты C_{ks} корректируют названные субстанции и их потоки по каждому из контрольных объемов, используемых в схемах дискретизации («нодализации») расчетных кодов. Например, параметр распределения двухфазного потока C_0 ,

учитывающий профили паро(газо)содержания и плотности потока смеси*), осуществляет коррекцию массовой скорости смеси, а также приведенных скоростей фаз по соотношениям (5)-(7). Кроме того, являясь структурообразующей компонентой в полной системе параметров распределений МПД (см. табл. 1), C_{k0} корректирует потоки энергии и импульса. Здесь следует отметить, что параметры распределений C_{k3} и C_{k4} представляют собой обобщение для условий двухфазных течений известных в однофазной гидравлике коррективов Буссинеска и Кориолиса для потоков количества движения и кинетической энергии. Необходимость учета C_{k4} в уравнении энергии возникает при «газодинамических» скоростях – от 100м/c и выше. В правых частях системы уравнений (2) - (4) стоят осредненные в поле течения источники паровой фазы, плотность теплового потока q_w^m (как функция коэффициента теплоотдачи h_q), указанные выше перепады давлений и потери на трение F_w^m (как функция коэффициента трения λ).

Уравнения (2)-(4) с зависимостями (5)-(7) являются общей квазиодномерной формой модели потока дрейфа уравнений законов сохранения для двухфазного неравновесного потока, в которых с помощью коэффициентов C_{ks} учитываются профили пространственной распределенности параметров фаз в одномерной формулировке.

2. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ДЛЯ КАНАЛОВ ПРОСТОЙ ГЕОМЕТРИИ И АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ НИХ

Одним из наиболее общих свойств параметров распределений \mathcal{C}_{ks} , вводимых с помощью системы уравнений законов сохранения (2)-(4) на основе определений (1) и табл. 1, является их последовательно усложняющаяся, иерархическая структура. А именно, в более сложных, представляющих более высокий уровень «свертки» параметрах распределений, таких как \mathcal{C}_{k3} и \mathcal{C}_{k2} , составными компонентами являются более «простые» - \mathcal{C}_{k0} и \mathcal{C}_{k1} . Таким образом, в свойствах сложных коэффициентов будут проявляться основные черты более простых коэффициентов. Анализ (и использование) иерархической структуры \mathcal{C}_{ks} является одним из принципиальных отличий данной работы, обобщающим и углубляющим разработанные ранее методики [6].

Как следует из определений коэффициентов осреднения (параметров распределений C_{ks} , см. вторую колонку табл. 1), по своему физическому смыслу они являются мерой отклонения реальных профилей параметров фаз и их потоков от плоских. Количественной мерой такого отклонения является отличие этих коэффициентов от единицы, что очевидно из соотношения (1) при каком-либо из его параметров, являющемся неизменным в поперечном сечении. На примере системы уравнений законов сохранения (2)-(4) видно, что каждый из коэффициентов C_{ks} представляет собой корректив к соответствующей компоненте, т.е. это поправки в массы паровой и жидкой фаз, их расходы, инерция системы, потоки импульса и энергии. При умеренных скоростях вблизи номинальных режимов работы энергетического оборудования с малой степенью термодинамической и динамической неравновесностью фаз эти параметры распределений весьма близки к единице и не проявляются ни в расчетных предсказаниях термогидравлических переменных, ни при анализе экспериментальных результатов. И наоборот, при значительной термодинамической и скорост-

Значения параметров представлены в табл. 2.

Таблица 2 (см. [14])

m _w	7	8	9	10
Сш	8,74	9,71	10,6	11,5

^{*)} Справедливость допущения о степенных аппроксимациях профилей следует в частности из полуэмпирических теорий [14]. Например, профиль относительной скорости жидкости имеет вид $W^+ = \mathcal{C}_{_{u}} \left(m_{_{u}} \right) \left(y w_{_{v}} / v_{_{w}} \right)^{1/m_{_{u}}}.$ (9)

ной неравновесности в потоках с сильным изменением профилей параметров их отличие от единицы значительно. Такие условия возможны в течение продолжительных отрезков времени в ходе аварийных ситуаций. Кипение с недогревом и закризисный теплообмен являются также типичными примерами таких процессов в оборудовании ЯЭУ.

Наиболее удобной формой представления коэффициентов осреднения \mathcal{C}_{ks} для выяснения их физического смысла и характера поведения являются аналитические зависимости, выраженные в виде интегралов (квадратур) через элементарные функции. Это позволяет исчерпывающе, компактно и наглядно представить основные свойства полученных параметров распределений.

В анализах как однофазных [14], так и двухфазных [5, 6, 8, 9, 12] течений большую пользу принесли представления о степенном монотонном характере распределения параметров в поперечном сечении потока. Допустим возможность таких распределений для каждой из фаз (k) в модели потока дрейфа

$$j(R) = j_c(1 - R^m),$$
 (10)

$$h_k(R) = h_{kc} + (h_{kw} - h_{kc})R^{\ell_k},$$
 (11)

$$\alpha_k(R) = \alpha_{kc} + (\alpha_{kw} - \alpha_{kc})R^n, \tag{12}$$

$$\sum_{k=1}^{2} \alpha_k(R) \equiv 1 \tag{13}$$

для плотности объемного потока смеси j, энтальпий фаз h_k и истинного объемного фазосодержания α_k соответственно (см. рис. 1).

Для функции локального истинного объемного фазосодержания (ИОФ) α_k здесь следует еще раз подчеркнуть важный для последующих выводов интегральных замыкающих соотношений для \mathcal{C}_{ks} аддитивный характер определения ИОФ (13), а именно.

$$\alpha_q(R) + \alpha_f(R) \equiv 1, \tag{14}$$

где $\alpha(R)$ - истинное объемное влагосодержание в точке R. Заметим, что именно это свойство лежит в основе принципа измерения [15, 16] ИОФ или верификации и обработки сигналов датчиков. Аналогичные (14) соотношения дополнительности имеют место и для локальных значений α_k на стенке и на оси канала.

При этом степенная аппроксимация влагосодержания описывается кривой с тем же показателем степени, что и газосодержание (см. [5], лемма 2 раздела 4), а меняется лишь характер кривизны зависимости для фазосодержания - вогнутая кривая паросодержания α_g (см. рис. 1с) становится выпуклой кривой влагосодержания α_f , поскольку меняется знак разности:

$$\alpha_{gw} - \alpha_{gc} = -(\alpha_{fw} - \alpha_{fc}). \tag{15}$$

В общем случае для анализа нестационарных потоков применение степенных аппроксимаций (10)-(12) соответствует принятию допущения о справедливости квазистационарного подхода к описанию профилей распределения параметров. В табл. 1 дана конкретизация обобщения (1) на исходные определения коэффициентов осреднения (второй столбец) для уравнений законов сохранения (2)-(4).

Подстановка зависимостей (10)-(12) в исходные определения параметров распределений C_{ks} приводит к интегралам от линейной комбинации дифференциальных биномов [17], квадратурные выражения для которых через элементарные функции представлены в третьем столбце табл. 1. Параметры распределений потоков кинетической энергии C_{k4} , важные, например, для газовой динамики (w>100 м/с) и при ис-

следовании критических истечений, в данной работе не рассматриваются.

При выводе зависимостей для коэффициентов C_{k1} было пренебрежено работой проталкивания, а при выводе C_{k2} и C_{k3} пренебрежено профилем w_{kj} по сечению канала; в этом случае имеем $\overline{W}_{kj} = W_{kj}$. Учет знака в скорости относительного всплытия (дрейфа) \widetilde{W}_{kj} осуществляется на основе [5] (лемма 1 раздела 4). В случае необходимости учет профиля w_{kj} может быть произведен либо с помощью введения степенной зависимости вида (10) [6], либо принятием известного соотношения [13].

Как видно из табл. 1 параметр \mathcal{C}_{k0} распределения фазосодержания двухфазного потока для фазы \boldsymbol{k} входит в структуру каждого из параметров распределений \mathcal{C}_{ks} , управляя тем самым, характером поведения каждого из них, поэтому целесообразно остановиться на его свойствах более подробно. Его наиболее удобная форма записи имеет вид

$$C_{k0} = \frac{\langle \alpha_k j \rangle}{\langle \alpha_k \rangle \langle j \rangle} = 1 + \frac{\gamma}{m + n + \gamma} \left(1 - \frac{\alpha_{kw}}{\langle \alpha_k \rangle} \right). \tag{16}$$

Очевидно, что соотношение (16) переходит в классический параметр распределения Зубера-Финдлея C_0 [11] при k=g для паросодержания.

Параметр распределения влагосодержания тогда запишется в виде

$$C_{f0} = \frac{\langle \alpha_f j \rangle}{\langle \alpha_f \rangle \langle j \rangle} = 1 + \frac{\gamma}{m + n + \gamma} \left(1 - \frac{\alpha_{fw}}{\langle \alpha_f \rangle} \right). \tag{17}$$

Он обладает подобными параметру Зубера-Финдлея C_0 фундаментальными свойствами, определяя интегральное скольжение жидкой фазы в двухфазном потоке, и служит дополнительной к C_{a0} характеристикой кинематических свойств потока.

Записав обобщенный параметр фазосодержания \mathcal{C}_{k0} в виде

$$C_{k0} = 1 + \frac{\gamma \cdot n \cdot (\alpha_{kc} - \alpha_{kw})}{(m + n + \gamma)(n + \gamma)(\alpha_{k})}$$
(18)

и учитывая знак разности (15) видим, что для выпуклых кривых $\alpha_{kc} > \alpha_{kw}$ величина $C_{k0} > 1$, для вогнутых - наоборот. Отсюда следует первое качественное утверждение: если $C_{g0} > 1$, то $C_{f0} < 1$ и, наоборот, если $C_{g0} < 1$, то $C_{f0} > 1$. Это указывает на существование определенной связи между ними, раскрыть которую поможет ряд вспомогательных утверждений (или лемм) о свойствах симметрии и дополнительности этих интегральных параметров, представленных более подробно в [5] в виде простых, но строгих алгебраических выкладок.

3. СООТНОШЕНИЯ СИММЕТРИИ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТИ. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ БАЛАНСЫ ДЛЯ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

Как видно из системы уравнений МПД (2)-(4), параметры распределений \mathcal{C}_{ks} с учетом взаимосвязи между локальными искомыми переменными двухфазного потока присутствуют в интегральных балансовых соотношениях субстанций (неразрывности, энергии и количества движения), отражая их пространственную распределенность. Это является, с другой стороны, основой получения и верификации их полуэмпирических корреляций из опытных данных, что, в свою очередь, стимулирует поиск взаимосвязей \mathcal{C}_{ks} с другими интегральными характеристиками течения. В [2, 6, 11-13] описаны некоторые основные свойства модели потока дрейфа. Однако для МПД существует ряд неочевидных и неисследованных ранее, но полезных как в теоретическом плане, так и для практических приложений свойств, связывающих между собой

локальные распределения параметров и их интегральные характеристики. Эти свойства можно обосновать, используя лишь определения МПД и законы сохранения. В [5] представлены локальные формулировки и строгие формы вывода в виде лемм (от простого - к сложному) основных соотношений симметрии и дополнительности для параметров распределений. Они основаны на определении МПД и иерархической структуре связей между параметрами распределений в законах сохранения (см. систему (2)-(4) и табл. 1), и поэтому могут быть выведены в виде ряда простых, но строгих выкладок - лемм, связывающих локальные и интегральные переменные. Например, соотношение аддитивности (или дополнительности) истинных объемных фазосодержаний (14) и плотности потока дрейфа приводит к дополнительному (неочевидному) утверждению о симметрии между векторными плотностями потока дрейфа

фаз $\vec{J}_{gj} = -\vec{J}_{fj}$, доказанному в виде леммы 1 [5] в логически более строгой и обобщенное форме, чем вывод Уоллиса [2, 13] для локальных скоростей дрейфа фаз. В качестве примера приведем одну из лемм [5].

Лемма 3. Из дополнительности (аддитивности) интегральных свойств $\langle \alpha_g \rangle \equiv 1 - \langle \alpha_f \rangle$ следует дополнительность их эффективных (т.е. с учетом параметра распределения \mathcal{C}_{k0}) интегральных фазосодержаний в форме взаимных произведений фазосодержаний на соответствующие параметры распределений фаз \mathcal{C}_{k0} :

$$1 \equiv \mathcal{C}_{g0}\langle \alpha_g \rangle + \mathcal{C}_{f0}\langle \alpha_f \rangle \text{ или } 1 \equiv \sum_{k=1}^{2} \mathcal{C}_{k0}\langle \alpha_k \rangle. \tag{19}$$

Доказательство элементарно и следует из зависимостей (14)-(16):

$$\mathcal{C}_{g0}\langle\alpha_g\rangle+\mathcal{C}_{f0}\langle\alpha_f\rangle=\langle\alpha_g\rangle+\langle\alpha_f\rangle+\frac{\gamma\big\{\big(\langle\alpha_g\rangle-\alpha_{gw}+\langle\alpha_f\rangle-\alpha_{fw}\big)=0\big\}}{m+n+\gamma}\equiv 1, \text{ ч.т.д.}$$

Доказанные в [5] леммы о свойствах дополнительности или зеркальной симметрии интегральных параметров распределений и потока дрейфа помещены в четвертой колонке табл. 1. Они обобщают и обосновывают свойство зеркальной симметрии (ранее замеченное [6] только для динамических параметров распределений фаз C_{k3}) на весь набор параметров распределений C_{ks} . Эти соотношения дополнительности завершают логическую и математическую структуры вывода полного набора замыкающих соотношений для параметров распределений C_{ks} в рамках степенной аппроксимации монотонных распределений параметров фаз.

С физической (точнее кинематической) точки зрения соотношения дополнительности отражают баланс эффективных «скольжений» плотностей потоков фаз, энтальпий, потоков энтальпий и потоков импульсов фаз в рамках модели потока дрейфа. Здесь следует отметить также, что соотношения дополнительности обеспечивают методическую основу для построения верификации и валидации [5, 15, 16] моделей двухфазных потоков, формулируя взаимное дополнение рассчитываемых или измеряемых интегральных параметров распределений, например, паросодержания \mathcal{C}_{fs} .

В иллюстративном плане соотношения дополнительности позволяют ограничиться представлением графического материала для какой-либо одной из фаз, например, паросодержания. Одной из прикладных целей настоящего анализа параметров распределений \mathcal{C}_{ks} являлось исследование характера их поведения в широком диапазоне параметров и выявление возможных аномальных областей их изменения. Поэтому приведенные в последующих разделах расчеты по полученным аналитическим выражениям параметров распределений \mathcal{C}_{ks} (см. табл. 1) проводились в максимально возможном диапазоне изменения переменных.

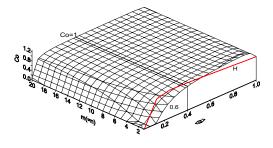


Рис. 2. Параметр распределения двухфазного потока для выпуклых и вогнутых профилей истинного объемного паросодержания \mathcal{C}_0 : α_w =0.4; H - Ханкокс [5]

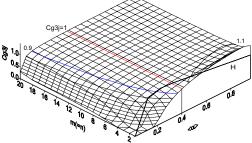


Рис. 3. Динамический параметр распределения паровой фазы C_{g3}^i как функция показателя степени m и $\langle \alpha \rangle$ при α_w =0.4; H - Ханкокс [5]

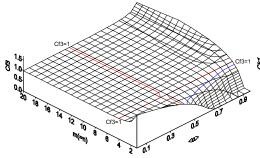


Рис. 4. Динамический параметр распределения жидкой фазы C_{f3} как функция показателя степени m и среднего по сечению $\langle \alpha \rangle$ при α_w =0.4, \overline{W}_{fi} = 0.5

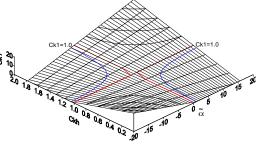


Рис. 5. Параметр распределения энтальпии C_{k1} как функция термического параметра распределения C_{kh} и фактора формы паросодержания $\widetilde{\alpha} = 1 - \alpha_{kw}/\langle \alpha_k \rangle$

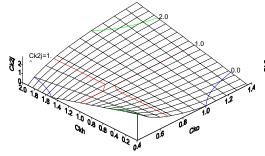


Рис. 6. Параметр распределения потока энтальпии $\mathsf{C}_{k2}{}^{\mathrm{j}}$ как функция параметров распределения: термического - C_{k0} и фазосодержания - C_{k0} при F_{k} =2

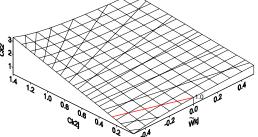


Рис. 7. Параметр распределения потока энтальпии \mathcal{C}_{k2} как функция параметров распределения \mathcal{C}_{k2j} и относительного всплытия \mathcal{W}_{kj} при $\mathcal{C}_{k1}/\mathcal{C}_{k0}$ =0.5

4. ИЛЛЮСТРАЦИИ ПОВЕДЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

На основе аналитических соотношений для параметров распределений \mathcal{C}_{ks} , представленных в табл. 1, было проведено их параметрическое исследование [5] с тем, чтобы найти области наиболее значительных отклонений \mathcal{C}_{ks} от единицы, характерные для двухфазных неравновесных течений.

Рисунки 2-7 дают наиболее полное представление о поведении параметров распределений \mathcal{C}_{ks} в широком диапазоне режимных условий в виде трехмерных поверхностей отклика \mathcal{C}_{ks} . Эти иллюстрации сделаны для наиболее общих случаев течения двухфазного потока в круглой трубе с выпуклыми и вогнутыми профилями истинно-

го объемного паросодержания. Аргументами являются как параметры, связанные с режимными условиями (например, $m = f(\text{Re}, \lambda...)$), так и собственно параметры распределений (например, C_{ks}).

Отмечено возможное значительное влияние формы профиля фазосодержания на параметры распределений, в частности для параметра распределения двухфазного потока на рис. 2 и других. Сравнение с эмпирической зависимостью Ханкокса-Никола [12] приведено на рис. 2 и 3. Хотя в первом приближении сравнение можно считать вполне удовлетворительным, на этих рисунках видны обширные области отличий от единицы. Рисунки 4 и 7 демонстрируют значительную степень влияния относительной скорости дрейфа (всплытия) на параметры распределений при различных режимах течения двухфазного потока. \mathcal{C}_{ks} .

Параметр распределения фазосодержания C_{k0} (в частности, параметр распределения двухфазного потока C_0) включен в структуру каждого из параметров распределений и управляет их характером поведения. Следовательно, C_0 может служить основой для исследования поведения других параметров распределений, включая общий случай немонотонного распределения паросодержания [6]. Кроме того, используя параметр распределения фазосодержания C_{k0} в качестве аргумента для других более сложных параметров распределений, например, C_{k2} , становится возможным более комплексное и универсальное описание поведения последнего (см. рис. 6). Именно благодаря иерархической структуре полученных аналитических соотношений для параметров распределений становится возможным построение более сложных параметров распределений (например, C_{k0} и C_{kh}). Это свойство иерархии в структурах параметров распределений обеспечивает возможность наиболее лаконичного и универсального представления сложных параметров распределений через более простые (см. рис. 5-7).

Соотношения дополнительности или зеркальной симметрии о характере поведения параметров распределений паро- и влагосодержания можно записать в виде [5]

$$C_{gs}(m,n,\alpha_{gw},\langle\alpha_{g}\rangle) = C_{fs}(m,n,\alpha_{fw},\langle\alpha_{f}\rangle)$$
 для $s=0$ или 3. (20)

Видно, что свойства C_{gs} полностью аналогичны отмеченным свойствам и в этом смысле нет необходимости его иллюстрации. Однако, следует подчеркнуть, что обладая свойством дополнительносьти C_{fs} становится альтернативой C_{gs} в тестовых и верификационных исследованиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1. В приближении степенных аппроксимаций профилей параметров фаз получена замкнутая в рамках модели потока дрейфа система аналитических зависимостей для параметров распределений \mathcal{C}_{ks} , входящих в уравнения неразрывности, энергии и количества движения, двухфазного неравновесного потока.
- 2. Полученные аналитические формы параметров распределений образуют иерархическую структуру взаимосвязей переноса субстанций в уравнениях законов сохранения. При этом кинематические параметры распределений простой структуры, такие как C_{k0} и C_{k1} , входят составной частью в структуру более сложных параметров распределений для уравнений переноса энергии C_{k2} и импульса C_{k3} .
- 3. Приведенные леммы о свойствах дополнительности интегральных параметров распределений фаз \mathcal{C}_{ks} одномерных моделей демонстрируют свойство зеркальной симметрии и взаимосвязь фазовых параметров распределений между собой, что является весьма полезным и важным как для квазиодномерных теорий моделирования двухфазных течений, так и для их полуэмпирических приложений, включая проблемы верификации замыкающих соотношений \mathcal{C}_{ks} .

- 4. Представленные иллюстрации \mathcal{C}_{ks} указывают на значительное влияние формы профиля фазосодержания на параметры распределений. Выявленные обширные области отклонений значений \mathcal{C}_{ks} от единицы указывают на неправомерность использования приближения плоских профилей параметров в одномерных моделях для ряда неравновесных режимов, например, при течении недогретого до состояния насыщения двухфазного потока, а также для условий «закризисного» теплообмена. Отмечается заметное влияние относительной скорости дрейфа (всплытия) на параметры распределений при различных режимах течения двухфазного потока.
- 5. Предложенные подходы позволяют проводить как систематический анализ пределов применимости одномерной теории, так и количественную оценку погрешностей одномерной модели, а также указывают направления совершенствования одномерных кодов, логику и количественные формы связей одномерных и многомерных моделей.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

Α	- площадь поперечного сечения		Греческие символы
C_{ks}	- параметры распределений	α	- истинное объемное паросодерж.
$\langle \rho w \rangle$	- массовая скорость	1-α	- истинное объемное влагосодерж.
g	- гравитационное ускорение	Γ	- интенсивность генерации пара
h	- удельная энтальпия,	ρ	- плотность, $ ho_{\it m} = \sum lpha_{\it k} ho_{\it k}$
	-"- смеси, $h_m = \sum (\alpha_k \rho_k h_k)/\rho_m$	φ	- обобщенная переменная
j	- плотность объемного расхода	ν	кинематическая вязкость
I,m,n	- показатели степени профилей		
Р	- давление		Индексы
q	- плотность теплового потока	c	- ось канала, центральная зона
$r=r_w-y$	- радиальная координата, радиус	j	- центр объема
$R=r/r_{\rm w}$	-"-, безразмерная	k	- фаза: 1- _f жидкость; 2- _g пар
t	- время	s	- субстанция
$w^+=w/w_{\tau}$	- относительная скорость	W	- стенка, пристенная зона
W_{gj}	- скорость всплытия (дрейфа)	τ	- для скорости трения
W_k	аксиальная скорость фазы k	ш	- для представления по Шлихтингу
Z	аксиальная координата.	///	- на единицу объема
		$\langle \rangle$	- символ осреднения по площади

Литература

- 1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Часть 1, 2. М.: Наука, 1987.
- 2. Делайе Дж., Гио М., Рейтмюллер М. Теплообмен и гидродинамика в атомной и тепловой энергетики. Пер. с англ. под ред. Н.Л.Кириллова. М.: Энегроатомиздат, 1984.
- 3. Ishii M. Thermo-fluid dynamic theory of two-phase flow. Paris: Eyrolles, 1975.
- 4. Kornienko Yu.N. Generalized integral forms for friction, heat and mass transfer coefficients // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1995. V. 38. №16. P. 3103-3108.
- 5. Корниенко Ю.Н. Обобщение параметров распределений для квазиодномерных моделей двухфазных неравновесных потоков. Часть 1. Течение в трубах плоской и круглой формы. ГНЦ-РФ ФЭИ-2898. Обнинск, 2001. 43 с.

- 6. Kornienko Yu.N., Kuzevanov V.S., Sorokin A.P. The technique of calculation of non-equilibrium two-phase flow in pin bundles using quasi-2D approaches and sub-channel approximation. // Proc. Intern. Symp. on qas-liquid two-phase flows. ASME. 1990. FED V. 99. P. 321-330.
- 7. *Ishii M., Mishima K.* Two-fluid model and hydrodynamic constitutive relations. // Nuclear Engineering and design. 1984. V. 82. №1. P.107-126.
- 8. Roy R.P, Ho S. Influence of transverse intraphase velocity profiles and phase fraction distributions on the character of two-phase flow equations. // Int. J. Heat Mass Trans. 1980. V. 23. P. 1162-1167.
- 9. Song J.H., Ishii M. The well-posedness of incompressible one-dimensional two-fluid model. // Int. J. Heat Mass Trans. 2000. V. 43. P. 2221-2231.
- 10. *Podowski M.Z.* CFD Simulation of Critical Heat Flux in PWR Fuel Assemblies. // Proc. 4-th Intern. Seminar on Subchannel Analysis. Tokyo, 1997. P.15-26.
- 11. *Зубер Н., Финдлей Д.* Средняя объемная концентрация фаз в системах с двухфазным пото-ком. // Теплопередача. Сер. С. М.: Мир, 1965, Т. 87. №4. С. 29-47.
- 12. *Hancox W.T., Nicoll W.B.* A general technique for the prediction of void distribution in non-steady two-phase forced convection. // Int. J. Heat Mass Trans. 1972. V. 14. № 12. P. 1377.
- 13. *Уоллис Г*. Одномерные двухфазные течения. М.: Мир, 1972.
- 14. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.
- 15. Болтенко Э.А., Горшков В.Д., Корниенко Ю.Н., Кустов В.П. Датчик определения концентрации газа в газожидкостном потоке. Авторское свидетельство № 1037762, Гос. комитет СССР по делам изобретений и открытий, 1983.
- 16. Корниенко Ю.Н., Болтенко Э.А. Способ тарировки устройства для измерения истинного объемного паросодержания смеси. Авторское свидетельство № 1005559, Гос. комитет СССР по делам изобретений и открытий, 1987.
- 17. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике. М.: Наука, 1978.

Поступила в редакцию 14.11.2002

УДК 621.039.534

ПАРАМЕТРЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ КВАЗИОДНОМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ДВУХФАЗНЫХ НЕРАВНОВЕСНЫХ ПОТОКОВ. ОБОБЩЕНИЕ ДЛЯ ТЕЧЕНИЙ С НЕМОНОТОННЫМ ПРОФИЛЕМ ПАРАМЕТРОВ

Ю.Н. Корниенко

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



В работе получены обобщенные иерархически замкнутые аналитические зависимости для параметров распределений \mathcal{C}_{ks} квазиодномерной формы уравнений законов сохранения на примере модели потока дрейфа для двухфазных неравновесных потоков с неравномерным профилем параметров. При выводе квадратур и проведении количественных оценок использованы метод суперпозиции и допущение о справедливости степенных аппроксимаций профилей локальных параметров фаз. Представлены свойства дополнительности и зеркальной симметрии параметров распределений для течений с неравномерным профилем параметров.

ВВЕДЕНИЕ

Один из эффективных путей совершенствования одномерных моделей термогидравлики двухфазных потоков заключается в учете локальных профилей переменных на основе интегральных параметров распределений \mathcal{C}_{ks} , являющихся коррективами к соответствующим компонентам законов сохранения. Наиболее полно такой подход представлен в [1,2].

Со времени появления первых публикаций по параметрам распределений (ПР) для двухфазных неравновесных течений [3] благодаря их теоретической последовательности и универсальности они получили широкое признание и применение во многих экспериментальных и теоретических разработках [4-10] как количественные характеристики радиальной распределенности локальных паросодержаний, скоростей и энтальпий фаз в одномерных моделях. При этом построение полуэмпирических и аналитических [1, 3, 4] зависимостей для них осуществлялось при допущении о монотонном изменении исследуемых параметров по поперечному сечению каналов простой геометрической формы: плоские щели и круглые трубы, тогда как в реальных условиях профили переменных могут иметь немонотонный характер.

Настоящая работа, развивая подходы, предложенные в [1-5, 7-10], представляет метод обобщения аналитических зависимостей для параметров распределений при немонотонном характере изменения паросодержаний и энтальпий фаз для течений

двухфазных потоков, что позволяет вывести и обосновать ряд новых, полезных в расчетной и экспериментальной практике свойств ПР. Основная идея предлагаемого подхода заключается в последовательном применении метода суперпозиции для искомых переменных при рассмотрении различных неоднородностей рассматриваемых переменных в каналах простой геометрии. Список основных обозначений приведен в [1], остальные представлены по тексту работы.

1. ОБОБЩЕННЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ДЛЯ НЕМОНОТОННЫХ ПРОФИЛЕЙ ИСТИННОГО ОБЪЕМНОГО ФАЗОСОДЕРЖАНИЯ И ЭНТАЛЬПИЙ ФАЗ

Имевшиеся в литературе рекомендации [3-5] для расчетов коэффициентов осреднения удовлетворительно описывают \mathcal{C}_{ks} для монотонных выпуклых и вогнутых профилей истинного объемного паросодержания в поперечном сечении канала. Однако в экспериментах часто наблюдается немонотонный профиль истинного объемного паросодержания как в адиабатных условиях [6], так и в случае, например, кипения с недогревом. Кроме того, немонотонный характер изменения в поперечном сечении канала могут иметь и другие параметры, в частности энтальпии фаз (см. рис. 1а и 16). В этой связи становится актуальным получение полного набора параметров распределений для уравнений законов сохранения как в случае немонотонных профилей истинного объемного паросодержания, так и энтальпий фаз.

Впервые аналитические зависимости для описания параметров распределений \mathcal{C}_{ks} в случае немонотонных распределений истинного объемного паросодержания были предложены в [7, 8]. Основная идея методики заключалась в аппроксимации немонотонного распределения с помощью двух («вложенных-в» друг в друга) монотонных профилей с разными показателями степени, «сшитых» в граничной точке их сопряжения \mathcal{R}_Γ . Тогда общее определение параметров распределений \mathcal{C}_{ks} модели вложенных профилей записывается в виде

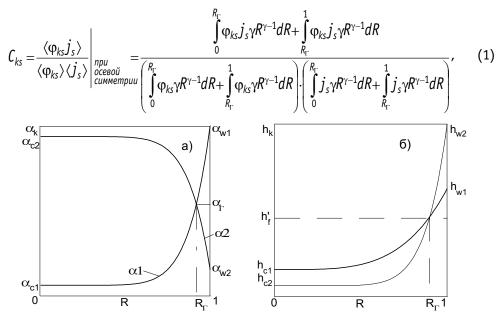


Рис.1. Модель вложенных профилей:

а) фазосодержаний
$$\alpha = \begin{cases} \alpha_{c1} + (\alpha_{w1} - \alpha_{c1})R^{n_1}, & 0 \leq R \leq R_{\Gamma} \\ \alpha_{c2} + (\alpha_{w2} - \alpha_{c2})R^{n_2}, & R_{\Gamma} \leq R \leq 1 \end{cases}$$
; б) энтальпий $h = \begin{cases} h_f = h_{c1} + (h_{w1} - h_{c1})R^{l_1}, & 0 \leq R \leq R_{\Gamma} \\ h_g = h_{c2} + (h_{w2} - h_{c2})R^{l_2}, & R_{\Gamma} \leq R \leq 1 \end{cases}$ Пример расчета показателей степени вынесен в приложение.

где R_{Γ} – граница между зонами монотонного изменения переменных.

Это, с одной стороны, позволило использовать полученный до этого большой объем аналитических соотношений и рекомендаций, а с другой - оставаясь в рамках привычных, классических представлений, описать и проанализировать необычные, немонотонные профили.

Возможны различные комбинации распределений профилей $\alpha(R)$ и $h_k(R)$ в зависимости от конкретных значений переменной на стенке (w) и в ядре (c) потока для первого — внутреннего и второго — внешнего профилей (рис.1). Дальнейший ход анализа ограничен рассмотрением лишь существенно немонотонного вида профиля фазосодержания (конкретнее, паросодержания) - вогнуто-выпуклого (см. рис. 1а). Такой профиль наблюдается в ряде экспериментов с седлообразными профилями паросодержания, а также его следует ожидать в дисперсно-кольцевых потоках с высокой плотностью теплового потока на стенке канала для влагосодержания.

Среднее по сечению истинное объемное фазосодержание после интегрирования профиля $\alpha(R)$ по площадям внутренней и внешней зон (см. обозначения рис. 1а) имеет вид

$$\langle \alpha_{k}^{B} \rangle = \frac{n_{2}\alpha_{kc2} + \gamma\alpha_{kw2}}{n_{2} + \gamma} + \left(\frac{\alpha_{kc1} - \alpha_{kc2}}{\gamma} + \frac{\alpha_{k\Gamma} - \alpha_{kc1}}{n_{1} + \gamma} - \frac{\alpha_{\Gamma} - \alpha_{kc2}}{n_{2} + \gamma}\right) \gamma R_{\Gamma}^{\gamma}, \tag{2}$$

Распространение этой идеи - сшивки двух монотонных профилей - для описания немонотонного распределения энтальпий фаз смеси проиллюстрировано на рис. 16 для случая кипения с недогревом, когда в пристенной (второй) зоне сосредоточена паровая фаза с энтальпией h_g , а внутренняя зона не догрета до насыщения. Возможны и другие виды распределений профилей энтальпий в зависимости от конкретных режимов течения и граничных условий. После интегрирования профиля h(R) имеем соотношение для средней по сечению энтальпии [2], совпадающее по форме с (2).

Применение модели потока дрейфа со степенной аппроксимацией профиля, подобной [1], обеспечивает преемственность результатов модели «вложенных» профилей для немонотонных распределений, с полученными ранее [3-5] зависимостями для монотонных профилей.

1.1. Квадратурное представление параметров $\mathbf{C}_{ks}^{\mathsf{B}}$ для немонотонных профилей

В зависимости от граничных условий возможно наличие немонотонных профилей энтальпий для какой-либо из фаз, а не только в целом для смеси. Именно для этого общего случая представлены определения и аналитические зависимости в табл. 1.

Подстановка степенных аппроксимаций (рис. 1а, б) для немонотонных профилей $\alpha(R)$ и h(R) в определение (1) для \mathcal{C}_{ks} приводит к интегралам от линейной комбинации дифференциальных биномов [11], имеющих квадратурные решения и приведенных в третьей колонке табл. 1. При выводе зависимостей для коэффициентов \mathcal{C}_{ks} было пренебрежено работой проталкивания, а при выводе \mathcal{C}_{k2} и \mathcal{C}_{k3} пренебрежено профилем w_{kj} по сечению канала. В таблице 1 для указания немонотонности по h параметры распределений помечены верхним индексом h, например, \mathcal{C}_{kh}^{Bh} . Аналитические соотношения для параметров распределений, приведенные в табл. 1, обобщают \mathcal{C}_{ks}^{B} на случай немонотонного распределения локальных параметров, обеспечивая возможность построения необходимых замыкающих соотношений и проведения численных оценок.

Таблица 1

Квадратурные (аналитические) формы параметров распределений для одномерных уравнений законов сохранения двухфазного потока с немонотонными профилями истинного объемного содержания фазы k (энтальпии фазы k) [2]

Наименование коэффициента осреднения	Определение параметра	Аналитическая зависимость	Соотношения дополнительности		
Параметр распределения двухфазного	$C_{k0}^{B} = \frac{\langle \alpha_{k}^{B} j \rangle}{\langle \alpha_{k}^{B} \rangle \langle j \rangle}$	$C_{k0}^{B} = 1 + \frac{\gamma}{m} \left(1 - F_{m}^{\alpha} \frac{m + \gamma}{\gamma} \right)$	$1 \equiv \sum_{k=1}^{2} C_{k0} \langle \alpha_{k} \rangle$		
потока для фазы k	$C_{kh}^{Bh} = \frac{\langle h_k^B j \rangle}{\langle h_k^B \rangle \langle j \rangle}$	$C_{kh}^{Bh} = 1 + \frac{\gamma}{m} \left(1 - F_m^h \frac{m + \gamma}{\gamma} \right)$			
Параметр распределения энтальпии	$C_{k1}^{B\alpha} = \frac{\langle \alpha_k^B h_k \rangle}{\langle \alpha_k^B \rangle \langle h_k \rangle}$	$C_{k1}^{Bx} = 1 + \frac{\gamma}{l_k} \left(1 - F_{l_k}^{\alpha} \frac{l_k + \gamma}{\gamma} \right) \left(1 - \frac{h_{kw}}{\langle h_k \rangle} \right)$			
фазы к	$C_{k1}^{Bh} = \frac{\langle \alpha_k h_k^B \rangle}{\langle \alpha_k \rangle \langle h_k^B \rangle}$	$C_{k1}^{Bh} = 1 + \frac{\gamma}{n_k} \left(1 - F_{n_k}^h \frac{n_k + \gamma}{\gamma} \right) \left(1 - \frac{\alpha_{kw}}{\langle \alpha_k \rangle} \right)$			
Параметр распределения потока энтальпии	$C_{k}^{j\beta^{x}} = \frac{\langle \alpha_{k}^{B} h_{k} j \rangle}{\langle \alpha_{k}^{B} j \rangle \langle h_{k} \rangle}$	$C_{k2}^{j\beta\alpha} = 1 + (C_{kh} - 1)\frac{m + \gamma}{l_k} \left[1 - (F_{l_k}^{\alpha} - F_{l_k+m}^{\alpha})\right]$	$\left. \left(\frac{(l_k + m + \gamma)(l_k + \gamma)}{\gamma m C_{k0}^{ B}} \right) \right]$		
фазы к	$C_{k2}^{jBh} = \frac{\langle \alpha_k h_k^B j \rangle}{\langle \alpha_k j \rangle \langle h_k^B \rangle}$	$C_{k2}^{jBh} = 1 + (C_{k0}^{B} - 1)\frac{m + \gamma}{n_k} \left[1 - (F_{n_k}^{h} - F_{n_k+m}^{h})\right]$	$\left[\frac{(n_k + m + \gamma)(n_k + \gamma)}{\gamma m C_{kh}^{Bh}}\right]$		
Динамический параметр распределения	$C_{k}^{jB} = \frac{\langle \alpha_{k}^{B} j^{2} \rangle}{\langle \alpha_{k}^{B} \rangle \langle j \rangle^{2}}$	$C_{k3}^{j\beta} = \left(\frac{m+\gamma}{m}\right)^2 \left(1 - 2F_m^{\beta x} + F_{2m}^{\beta x}\right)$	$1 \equiv \sum_{k=1}^{2} C_{k3}^{j} \langle \alpha_{k} \rangle$		
фазы к	$C_{k3}^{B} = \frac{\langle \alpha_{k}^{B} w_{k}^{2} \rangle}{\langle \alpha_{k}^{B} \rangle \langle w_{k} \rangle^{2}}$	$C_{k3}^{B} = \frac{C_{k3}^{jB} + 2C_{k0}^{B}\widetilde{W}_{kj} + \widetilde{W}_{kj}^{2}}{(1 + W_{kj})^{2}}$			
Относительная скорость всплытия	$\widetilde{W}_{kj} = \frac{\langle \alpha_k^B W_{kj} \rangle}{\langle \alpha_k^B \rangle \langle j \rangle}$	$\widetilde{W}_{kj} = \frac{b\left[1 - \left\langle \alpha_g^B \right\rangle (1 - \rho^*) C_{g0}^B \right]}{1 - D + b\left\langle \alpha_g^B \right\rangle (1 - \rho^*)}; \ b = \frac{\overline{W}_{kj} \rho_f}{\left\langle \rho w \right\rangle}; \ \rho^* = \frac{\rho_g}{\rho_f}$			
$\xi_k^{\alpha} = \begin{cases} m, \partial \mathcal{A} & C_{k0}^B; l_k + m \\ l_k, \partial \mathcal{A} & C_{k1}^{B\alpha}; 2m, \end{cases}$	$ \xi_k^{\alpha} = \begin{cases} m, \partial \pi C_k^B; l_k + m, \partial \pi C_k^{B\alpha} \\ l_k, \partial \pi C_k^{B\alpha}; 2m, \partial \pi C_k^{B\alpha} \end{cases} \qquad F_{\xi_k}^{\alpha} = \frac{\gamma}{\langle \alpha_k^B \rangle} $				
$\xi_k^h = egin{cases} m, \partial \mathit{ля} \ C_{kh}^{Bh}; n_k + n \ n_k, \partial \mathit{ля} \ C_{k1}^{Bh}; \ 2m, \end{cases}$	$ \xi_{k}^{h} = \begin{cases} m, \partial \pi C_{kh}^{Bh}; n_{k} + m, \partial \pi C_{k2}^{Bh} \\ n_{k}, \partial \pi C_{k1}^{Bh}; 2m, \partial \pi C_{k3}^{Bh} \end{cases} $				

Как это следует из определений параметров распределений $C_{ks}^{\mathcal{B}}$ (см. вторую колонку табл. 1), по своему физическому смыслу они являются мерой отклонения реальных профилей параметров фаз и их потоков от плоских. При этом немонотонность профилей переменных приводит к дополнительным управляющим воздействиям на параметры распределений. Количественной мерой такого отклонения является отличие этих коэффициентов от единицы. Причем для двух зон монотонного изменения переменных даже постоянство параметров в каждой из них не сможет обеспечить равенство единице общего параметра распределения для канала в целом, что очевидно из уравнения (1) при постоянстве профилей переменных в поперечном сечении каждой из зон. Как и в случае монотонных профилей параметров, каждый из коэффициентов $\mathcal{C}_{ks}^{\mathcal{B}}$ представляет собой корректив к соответствующей компоненте закона сохранения, учитывающий неоднородный профиль переменной в поперечном сечении канала и ячейки. Таким образом, параметры распределений представляют собой поправки в массы паровой и жидкой фаз, их расходы, инерцию системы, потоки импульса и энергии. Причем, как и для монотонных профилей переменных, при

умеренных скоростях вблизи номинальных режимов работы энергетического оборудования с малой степенью термодинамического и динамического неравновесности фаз эти параметры распределений \mathcal{C}_{ks}^B весьма близки к единице и не проявляются ни в расчетных предсказаниях термогидравлических переменных, ни при анализе экспериментов. И, наоборот, при высокой термодинамической и скоростной неравновесности в потоках со значительной неравномерностью профилей их отличие от единицы становится заметным. Такие условия возможны как в стационарных, так и в переходных режимах, а также при кипении с недогревом и закризисном теплообмене.

Одним из наиболее общих свойств системы параметров распределений $\mathcal{C}_{ks}^{\mathcal{B}}$, представленных в табл. 1, является их последовательно усложняющаяся, иерархическая структура, что уже отмечалось для случая монотонных распределений параметров [1]. А именно, в более сложных, представляющих более высокий уровень «свертки», параметрах распределений, таких как \mathcal{C}_{k3} и \mathcal{C}_{k2} , составными компонентами являются более «простые» - \mathcal{C}_{k0} и \mathcal{C}_{k1} . Только в данном случае возникают дополнительные параметры \mathcal{R}_{Γ} , α_{Γ} и другие, связанные с немонотонностью. Однако, как и при монотонных изменениях профилей переменных [1], в свойствах сложных коэффициентов будут проявляться основные черты более простых коэффициентов. Анализ и использование иерархической структуры $\mathcal{C}_{ks}^{\mathcal{B}}$ является одним из принципиальных отличий данной работы, обобщающим и углубляющим методики [1, 3-5, 7-9].

Таблица 1, представляя в форме квадратур интегральные аналитические замыкающие соотношения для искомых параметров распределений, демонстрирует указанный иерархический характер и усложняющуюся структуру связей между простыми параметрами распределений C_{k0}^B , C_{kh}^{Bh} и более сложными параметрами, определяющими поправки для компонент переноса импульса и энергии. Основное отличие функциональных форм параметров распределений двухфазных потоков с монотонными и немонотонными профилями параметров фаз (сравните табл. 1 из [1] и табл. 1 данной работы) содержится в «коэффициентах усиления». Если для монотонных профилей переменных коэффициенты усиления являлись просто масштабными множителями, составленными из показателей степеней в профилях переменных, при факторах формы профиля фазосодержания $(1-lpha_{kw}/\langlelpha_k
angle)$ или энтальпии $(1-h_{kw}/\langle h_k
angle)$, то в случае немонотонных профилей переменных коэффициенты усиления $F^{lpha}_{\xi k}$ и $F^{h}_{\xi k}$ оказываются более сложными, содержащими не только показатели степеней в профилях переменных, но и характерные размеры зон и значения переменных на их границах. Последнее приводит к значительному увеличению числа вводимых параметров при анализах, усложнению и загромождению графических иллюстраций. Поэтому анализ и обсуждение особенностей, связанных с немонотонностью профилей, ограничены рассмотрением параметра распределения фазосодержания для двухфазного потока.

1.2. Параметр распределения фазосодержания двухфазного потока $C_{\kappa_0}^{\ \ B}$

Как видно из табл. 1, параметр распределения фазосодержания двухфазного потока $\mathcal{C}_{k0}^{\mathcal{B}}$ так же, как и подобный ему параметр распределения энтальпии фазы k $\mathcal{C}_{kh}^{\mathcal{B}h}$, входит в структуру каждого из параметров распределения, управляя тем самым их характером поведения. Поэтому при анализе и обсуждении их свойств можно ограничиться параметром $\mathcal{C}_{k0}^{\mathcal{B}}$.

Приведенные ниже зависимости $\mathcal{C}_{k0}^{\mathcal{B}}$ могут служить основой для анализа поведения и других параметров распределений в общем случае немонотонных профилей. Раскрывая коэффициент усиления $F_{\xi k}^{\alpha}$ в соответствии с табл. 1, для параметра $\mathcal{C}_{k0}^{\mathcal{B}}$ получим обобщение полученного в работе [9] параметра распределения \mathcal{C}_{0} в виде

$$C_{k0}^{B} = 1 + \frac{\gamma}{m} \left(1 - \frac{1}{\langle \alpha^{B} \rangle} \cdot \left\{ \left[\frac{n_{1} \alpha_{kc1}}{m + n_{1} + \gamma} - \frac{n_{2} \alpha_{kc2}}{m + n_{2} + \gamma} + \frac{(m + \gamma)(n_{2} - n_{1})\alpha_{kf}}{(m + n_{1} + \gamma)(m + n_{2} + \gamma)} \right] R_{f}^{m+\gamma} + \frac{n_{2} \alpha_{kc2} + (m + \gamma)\alpha_{kw2}}{m + n_{2} + \gamma} \right\} \right).$$
(3)

Параметр распределения $\mathcal{C}_{k0}^{\mathcal{B}}$, как и \mathcal{C}_{k0} , по своему физическому смыслу является мерой заполненности профилей концентрации легкой фазы и плотности объемного потока смеси.

Нетрудно убедиться, что в предельных случаях при $R_\Gamma \to 0$ и $R_\Gamma \to 1$ зависимость (3), описывающая влияние вложенных профилей паросодержания, переходит в зависимость для \mathcal{C}_0 , выведенную Н. Зубером в [3] для монотонных профилей. Это подтверждает правильность предельного перехода настоящей методики к классической формулировке [3].

В приближении $n_1 = n_2 = n$ после преобразований получаем упрощенный вариант:

$$C_{k0}^{B} = 1 + \frac{\gamma}{m+n+\gamma} \left\{ \left[1 + \frac{n+\gamma}{m} \left(1 - R_{\Gamma}^{m} \right) \right] \left(1 - \frac{\alpha_{kw2}}{\langle \alpha_{k}^{B} \rangle} \right) + \frac{n}{m} \cdot \frac{1 - R_{\Gamma}^{m}}{1 - R_{\Gamma}^{n}} \cdot \frac{\alpha_{kw2} - \alpha_{k\Gamma}}{\langle \alpha_{k}^{B} \rangle} \right\}. \tag{4}$$

Представление заваисимости параметра распределения \mathcal{C}_{k0}^B от среднего по сечению паросодержания по зависимостям (3) и (4) является важным для анализа характера развития двухфазного потока по длине канала, т.к. при этом очевидно его отличие от единицы, т.е. гомогенной модели течения. В [2] приведены поверхности отклика параметра распределения $\mathcal{C}_{g0}^B = \mathcal{C}_0^B$, построенные по зависимости (4) при заданных сочетаниях R_Γ , α_Γ и при m=n. В целом, поверхность и кривые, описывающие такой поток с немонотонным профилем α , близки к соответствующей поверхности и кривым с монотонным профилем, приведенным в [1]. Причем, для потоков с немонотонными профилями α , как и для потоков с монотонными профилями [1], рост скорости смеси, чему соответствует увеличение показателя степени m, приводит к уменьшению градиента $d\mathcal{C}_0^B / d\langle \alpha \rangle$.

Сравнение параметров распределений для монотонных и немонотонных профилей паросодержания представляется полезным при разработке, верификации и оценке погрешности (см. приложение и [10]) моделей неравновесных процессов, например, кипения с недогревом.

Для более полного анализа влияния немонотонности в профиле паросодержания введем фактор формы профиля паросодержания в виде разности между двухзонным $\mathcal{C}_{k0}^{\mathit{B}}$ по соотношению (4) и параметром распределения Зубера [3]; его квадратурный вид представлен соотношением

$$\Delta C_{k0}^{B} \equiv C_{k0}^{B} - C_{k0} = \frac{\gamma}{2m + \gamma} \left[\frac{m + \gamma}{m} \left(1 - R_{\Gamma}^{m} \right) \left(1 - \frac{\alpha_{w2}}{\langle \alpha \rangle} \right) - \frac{\alpha_{\Gamma} - \alpha_{w\Gamma}}{\langle \alpha \rangle} \right]. \tag{5}$$

Для моделирования различного вида профилей введен параметр $\alpha_{wf} = (\alpha_{f}, \text{ либо } \alpha_{w2})$.

Поверхности отклика фактора формы неравномерного профиля при заданных режимных условиях приведены на рис. 2. Рисунки 2а и 2в, полученные при α_{w2} =0, соответствуют адиабатическому течению двухфазного потока с вогнутым профилем газо(паро)содержания, тогда как рис. 2б и 2г относятся к диабатным течениям с ненулевым паросодержанием на стенке (кипение с недогревом). Из попарного сравнения этих рисунков видно, что на рис. 2в и 2г преобладают области с отрицательными значениями фактора формы профиля по сравнению с рис. 2а и 2б. Это указывает на то, что при прочих равных условиях потоки с немонотонными профилями являются более «гомогенными», т.е. для них значения $\mathcal{C}_0^{\mathcal{B}}$ ближе к единице, чем в потоках с монотонным вогнутым профилем паросодержания: $\mathcal{C}_0 > \mathcal{C}_0^{\mathcal{B}}$.

2. ОСНОВНЫЕ ЛЕММЫ О СУПЕРПОЗИЦИИ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ДЛЯ СЛОЖНЫХ УСЛОВИЙ

Интегрирование плотности объемного потока (или скоростей) и энтальпий фаз, а также фазосодержаний, распределенных по площади поперечного сечения канала, вообще говоря, опирается на преобразование Грина [12] (и его частный случай- теорему о дивергенции Остроградского-Гаусса), т.е. используется основное свойство линейности интеграла о возможности разбиения области интегрирования на зоны (части как функции верхнего предела). Поэтому наиболее последовательное обобщение данного метода основывается на

- 1) применении принципа суперпозиции при описании полей переменных в выделенных зонах области интегрирования, не обязательно симметричных или концентрических;
 - 2) последующей нормировке выделенных зон и переменных в них.

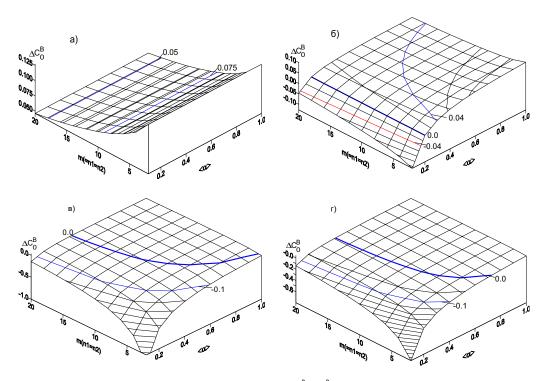


Рис. 2. Фактор неравномерного профиля паросодержания $\Delta C_0^B = C_0^B - C_0$ по соотношению (5) при следующих режимных условиях: R_Γ =0.9; α_Γ =0.4. Для $\alpha_{w\Gamma}$ = α_Γ : a) α_{w2} =0; b) α_{w2} =0.2; для $\alpha_{w\Gamma}$ = α_{w2} : в) α_{w2} =0, г) α_{w2} =0.2.

При таких допущениях одномерная модель каждой зоны «индивидуализируется» в виде соответствующих средних значений переменных, параметров распределений и относительной доли ее площади.

Основное достоинство такого подхода заключается в том, что для построения общих параметров распределений в сложных условиях (или по всей области) возможно использование полученных ранее параметров распределений для простых, «элементарных» [1] условий.

Указанное обобщение о суперпозиции параметров распределений в сложных условиях можно сформулировать в виде следующей основной леммы, продолжающей список лемм из [1].

Лемма 1. Общий (*N-зонный*) параметр распределения \mathcal{C}_{ks} любого вида скалярных (монотонных) функций на основе рассмотрения их распределений по составным зонам из общей области интегрирования есть сумма произведений «элементарных» параметров распределений на относительные средние значения функций в зонах и доли их площади:

$$C_{ks}^{N} = \sum_{n}^{N} C_{ksn} \langle \widetilde{\varphi}_{ks} \rangle_{n} \langle \widetilde{J}_{s} \rangle_{n} \widetilde{A}_{n} .$$
 (6)

где
$$\widetilde{A}_n \equiv \frac{A_n}{A}$$
; $\langle \widetilde{j} \rangle_n \equiv \frac{\langle j \rangle_n}{\langle j \rangle}$; $\langle \widetilde{\phi}_{ks} \rangle_n \equiv \frac{\langle \phi_{ks} \rangle_n}{\langle \phi_{ks} \rangle}$; $\mathcal{C}_{ksn} \equiv \frac{\langle \phi_{ks} J_s \rangle_n}{\langle \phi_{ks} \rangle_n \langle j_s \rangle_n}$.

Доказательство основано на свойствах суперпозиции и леммах, приведенных в [2]. Для параметра распределения фазосодержания двухфазного потока

$$C_{k0}^{N} = \sum_{n}^{N} C_{k0n} \langle \widetilde{\alpha}_{k} \rangle_{n} \langle \widetilde{j} \rangle_{n} \widetilde{A}_{n} . \tag{7}$$

Таким образом, общий параметр распределения (в частности фазосодержания (7)) для сложных условий представлен в виде взвешенной суммы произведений параметров распределений по зонам C_{k0n} на соответствующие относительные доли переменных.

2.1. Общий вид соотношений дополнительности для сложных условий

Полученный выше общий вид параметров распределений для сложных (*п-зонных*) условий указывает на возможность существования соотношений дополнительности и для сложных условий, т.е. соотношений интегральной взаимосвязи и баланса фазовых позонных параметров распределений.

Лемма 2 иллюстрирует свойство дополнительности интегральных эффективных относительных фазосодержаний для сложной N-зонной модели:

$$1 = \sum_{k=1}^{2} \langle \alpha_{k} \rangle \sum_{n=1}^{N} C_{k0n} \langle \widetilde{\alpha}_{k} \rangle_{n} \langle \widetilde{j} \rangle_{n} \widetilde{A}_{n} . \tag{8}$$

Доказательство достаточно очевидно и непосредственно следует из алгебраической цепочки преобразований и аддитивности интегральных фазосодержаний [2].

Аналогичное соотношение дополнительности имеет место для динамических параметров фазосодержания

$$1 = \sum_{k=1}^{2} \langle \alpha_{k} \rangle \sum_{n=1}^{N} C_{k3n} \langle \widetilde{\alpha}_{k} \rangle_{n} \langle \widetilde{j} \rangle_{n} \widetilde{A}_{n}.$$
 (9)

Как видно из полученных соотношений (8) и (9) *N*-зонного канала, они являются «свертками» – интегралами от соответствующих позонных параметров распределений, которые, в свою очередь, представляют собой эффективные суммы элементарных параметров распределений для плоской щели и круглой трубы. Иными словами, в них также отражается свойство аддитивности эффективных «скольжений» (см. [1]), но уже для N-зонной модели.

Правильным будет также определить это свойство как «суперпозицию» позонных распределений с зонными весовыми коэффициентами, представляющими относительный вклад переменных и площади каждой из зон.

2.2. Альтернативное представление $C_{ks}^{\ \ N}$ для немонотонных профилей переменных

Основная лемма о суперпозиции обеспечивает возможность альтернативного (относительно модели «вложенных» профилей, см. табл. 1) квадратурного представления параметров распределений при немонотонных профилях переменных. Для этого необходимо разбить интегрируемую площадь на зоны (например, две) с монотонным изменением переменных, например, газо(паро)содержания, и определить соответствующие элементарные параметры распределений и весовые множители по зонам. Тогда, например, параметр распределения фазосодержания двухфазного потока по двухзонной модели (2z) предстанет как

$$C_{k0}^{2z} = C_{k01} \langle \widetilde{\alpha} \rangle_1 \langle \widetilde{j} \rangle_1 \widetilde{A}_1 + C_{k02} \langle \widetilde{\alpha} \rangle_2 \langle \widetilde{j} \rangle_2 \widetilde{A}_2.$$
 (10)

Путем простых алгебраических преобразований его можно привести к виду \mathcal{C}_{k0}^B по соотношению (3). Последнее свидетельствует, во-первых, о правильности полученных соотношений, во-вторых, об их эквивалентности и, в-третьих, о том, что модель «вложенных» профилей является частным случаем подхода, основанного на принципе суперпозиции.

Динамический параметр распределения на основе суперпозиции для двухзонной модели имеет вид

$$C_{k3}^{j2z} = C_{k31}^{j} \langle \widetilde{\alpha} \rangle_{1} \langle \widetilde{j} \rangle_{1} \widetilde{A}_{1} + C_{k32}^{j} \langle \widetilde{\alpha} \rangle_{2} \langle \widetilde{j} \rangle_{2} \widetilde{A}_{2}. \tag{11}$$

Ясно, что для двухзонной модели так же, как и для много-(N)зонной, существуют соотношения дополнительности вида (8) и (9) при N=2.

Другими словами, из дополнительности локальных и интегральных свойств истинных объемных паросодержаний и при выполнении этих свойств для внутренней и внешней зон поперечного сечения канала с немонотонным профилем следует дополнительность их эффективных (т.е. с учетом \mathcal{C}_{ks}) интегральных фазосодержаний (как и для монотонного распределения) в форме взаимных произведений фазосодержаний на соответствующие параметры распределений фаз.

В последней колонке табл. 1 квадратурных форм для параметров распределений модели вложенных профилей приведены обсужденные в данном разделе соотношения дополнительности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Полученные при допущениях о суперпозиции и степенных аппроксимацях профилей параметров фаз аналитические соотношения для \mathcal{C}_{ks} образуют иерархическую структуру взаимосвязей переноса субстанций для двух(или N-)зонной модели уравнений законов сохранения с немонотонным профилем переменных. При этом кинематические параметры распределений простой структуры, такие как \mathcal{C}_{k0} и \mathcal{C}_{k1} , входят составной частью в более сложные параметры распределений для уравнений переноса энергии \mathcal{C}_{k2} импульса \mathcal{C}_{k3} с учетом характерных размеров зон и значений переменных на их границах.

- 2. Как и в случае монотонных профилей переменных [1], леммы о свойствах дополнительности демонстрируют свойство зеркальной симметрии и взаимосвязь фазовых параметров распределений между собой, что является весьма полезным и важным как для квазиодномерных теорий двухфазных течений, так и для их полуэмпирических приложений.
- 3. В работе аналитически и на численных примерах показано значительное влияние формы профиля паросодержания и границы зон на C_0^B . Продемонстрировано влияние основных переменных двухзонной модели на поведение параметра распределения C_0^B .
- 4. Предложенные подходы представляют собой основу для разработки новых квазиодномерных моделей двухфазных неравновесных потоков и позволяют проводить как систематический анализ как пределов применимости одномерной теории, так и количественную оценку погрешностей, в том числе и для областей с неоднородным изменением параметров.

ПРИЛОЖЕНИЕ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СТЕПЕНЕЙ В СТЕПЕННЫХ АППРОКСИМАЦИЯХ ПРОФИЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ ИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ИХ СВЯЗЬ С ДВУХЗОННОЙ МОДЕЛЬЮ

Для общего случая немонотонного распределения истинного объемного паро-(газо)содержания использована аппроксимация экспериментальных профилей в каждой из выделенных зон (центральной и пристенной) зависимостями степенного вида (см. рис. 1а)

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_{c_1} + (\alpha_{w_1} - \alpha_{c_1})R^{n_1}, & 0 \le R \le R_{\Gamma} \\ \alpha_{c_2} + (\alpha_{w_2} - \alpha_{c_2})R^{n_2}, & R_{\Gamma} \le R \le 1 \end{cases}$$
(\Pi1)

или (альтернативно)

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_{w_1} + (\alpha_{w_1} - \alpha_{c_1}) Y^{n_{y_1}}, \ Y_{\Gamma} \le Y \le 1\\ \alpha_{w_2} + (\alpha_{w_2} - \alpha_{c_2}) Y^{n_{y_2}}, \ 0 \le Y \le Y_{\Gamma} \end{cases}$$
(\(\Omega_2\)

где

$$Y=1-R.$$
 ($\Pi 3$)

Из уравнений (П1) и (П2) следует

$$\alpha_{\Gamma} = \alpha_{c_1} + (\alpha_{w_1} - \alpha_{c_1}) R_{\Gamma}^{n_1}, \tag{14}$$

$$\alpha_{\Gamma} = \alpha_{w_2} + (\alpha_{w_2} - \alpha_{c_2}) \gamma_{\Gamma}^{n_{y_2}}. \tag{15}$$

После подстановки (П4) и (П5) в выражения (П1) и (П2) получим, соответственно

$$\alpha = \alpha_{c_1} + (\alpha_{\Gamma} - \alpha_{c_1}) \frac{R}{R_{\Gamma}^{n_1}}, \quad 0 \le R \le R_{\Gamma}, \tag{\Pi6}$$

$$\alpha = \alpha_{w_2} + (\alpha_{\Gamma} - \alpha_{w_2}) \frac{\gamma}{\gamma_{\Gamma}^{n_{y^2}}}, \ 0 \le \gamma \le \gamma_{\Gamma}, \tag{\Pi7}$$

откуда после интегрирования по выделенным зонам следуют соотношения для показателей степеней в аналитических зависимостях для профилей истинного объемного паросодержания и последующих оценок погрешности:

$$\langle \alpha_c \rangle = \alpha_{c_1} + \frac{\gamma(\alpha_{\Gamma} - \alpha_{c_1})}{n_1 + \gamma},$$
 (П8)

$$\langle \alpha_{w} \rangle = \alpha_{w_{2}} + \frac{\alpha_{\Gamma} - \alpha_{w_{2}}}{n_{2} + \gamma} \left(\frac{n_{2}}{1 - R_{\Gamma}^{n_{2}}} - \frac{\gamma R_{\Gamma}^{\gamma}}{1 - R_{\Gamma}^{\gamma}} \right). \tag{\Pi9}$$

Наиболее простым является применение этих соотношений для относительно широких центральных (узких пристенных) зон, когда $R_{\Gamma} \rightarrow 1$. Тогда предельные переходы с использованием правила Лопиталя показывают, что (П9) становится автомодельным относительно показателя n_2 и параметра формы канала γ

$$\lim_{R_{\Gamma} \to 1} \langle \alpha_{W} \rangle = \langle \alpha_{W} \rangle_{23} = \alpha_{W_{2}} + 0.5(\alpha_{\Gamma} - \alpha_{W_{2}}). \tag{\Pi10}$$

Здесь индекс «23» введен для обозначения двухзонной модели двухфазного потока с кусочно-постоянными профилями α . Для этой модели вводится также

$$\lim_{n_1 \to \infty} \langle \alpha_c \rangle = \langle \alpha_c \rangle_{23} = \alpha_{c_1}. \tag{\Pi11}$$

При этом среднее по сечению канала паросодержание рассчитывается по зависимости

$$\langle \alpha \rangle_{23} = \langle \alpha_{w} \rangle_{23} (1 - R_{\Gamma}^{\gamma}) + \langle \alpha_{c} \rangle_{23} R_{\Gamma}^{\gamma}. \tag{\Pi12}$$

Расчеты указанных параметров, проведенные для условий опытов [6] (см. рис. 3), вынесены в табл. 2.

Параметры [6]	α_{w_2}	Y_Γ	α_{Γ}	n_{y_2}	$\langle \alpha_w \rangle$	$\langle \alpha_c \rangle$	$\langle \alpha \rangle$
	α_{c_1}	R_{Γ}	<i>n</i> ₁	n ₂	$\langle \alpha_w \rangle_{23}$	$\langle \alpha_c \rangle_{23}$	$\langle \alpha \rangle_{23}$
Режим А	0.	0.02	0.29	0.383	0.15	0.121	0.122
	0.11	0.98	29.74	12.51	0.145	0.11	0.1114
Режим В	0.	0.02	0.43	0.253	0.23	0.113	0.118
	0.085	0.98	26.42	22.97	0.215	0.085	0.0902

Таблица 2

Здесь следует заметить, что режимы A и B (см. рис.3 и опыты [6]) соответствуют двум различным профилям седлообразных распределений истинного объемного газосодержания *) с различными значениями показателей степеней и величин граничных газосодержаний.

В первых четырех колонках табл. 2 приведены значения расчетных параметров, соответствующие двухзонной модели (см. рис. 1а и уравнения (П1) и (П2)). Ясно, что в общем случае оптимизация параметров двухзонной модели для седлообразных профилей паро(газо)содержания требует статистической обработки соответствующих баз опытных данных и может составить предмет отдельных исследований. Поэтому приведенные в табл. 2 параметры следует считать лишь первым приближением, используемым в дальнейшем для оценки точности осредненных по сечению величин. Как видно из табл. 2, погрешность аппроксимации экспериментальных профилей истинного объемного газосодержания степенными зависимостями, оцененная сопоставлением с осредненными значениями (см. последние три колонки) не превосходит 2÷4%.

^{*)} Причины существования в экспериментах [6] различных форм седлообразных профилей истинного объемного газосодержания и переход режима А в режим В связаны с размерами пузырьков и эффектами их взаимодействия и влияния на поле скорости жидкой фазы. Анализ этих явлений требует разработки локальных двухжидкостных моделей гидродинамики для турбулентных двухфазных неравновесных потоков и выходит за рамки настоящей работы.

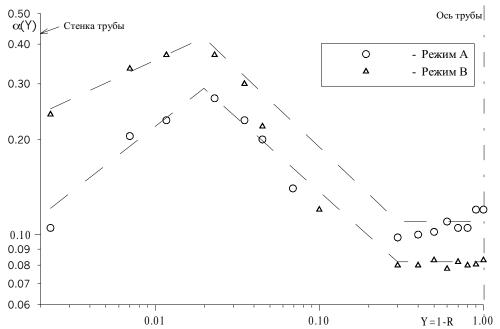


Рис. 3. Профили локального газосодержания седлообразной формы [6]: скорость жидкости на входе 0.79 м/с; расходное объемное газосодержание 0.147, диаметр трубы 86.4 мм

К сожалению в литературе отсутствуют опытные данные по одновременному измерению профилей скорости жидкой и паровой (газовой) фаз по сечению канала, что позволило бы провести тестирование принятых допущений и верификацию полученных замыкающих соотношений для параметров распределений с неоднородным профилем паро (или газо) содержания.

Литература

- 1. Корниенко Ю.Н. Параметры распределений квазиодномерных моделей двухфазных неравновесных потоков. Часть 1. Обобщение для течений в каналах простой геометрии // Известия вузов. Ядерная Энергетика. − 2002. № 4. С. 54 65.
- 2. Корниенко Ю.Н. Обобщение параметров распределений для квазиодномерных моделей двухфазных неравновесных потоков. Течения с неравномерным профилем параметров, в каналах кольцевой формы и сборках стержней. Препринт ГНЦ РФ-ФЭИ 2899. Обнинск, 2001. 42 с.
- 3. Зубер Н., Финдлей Д. Средняя объемная концентрация фаз в системах с двухфазным потоком. Теплопередача. Сер. С. М.: Мир, 1965. Т. 87. №4. С. 29-47.
- 4. $Hancox\,W.T.$, $Nicoll\,W.B.$ A general technique for the prediction of void distribution in non-steady two-phase forced convection // Int. J. Heat Mass Trans.. 1972. V. 14. P. 1377.
- 5. Kornienko Yu. N., Kuzevanov V.S., Sorokin A.P. The technique of calculation of non-equilibri-um two-phase flow in pin bundles using quasi-2D approaches and sub-channel approximation. Proc. Intern. Symp. on gas-liquid two-phase flows. ASME, 1990, FED. V. 99. P. 321-330.
- 6. Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Burdukov A.P., Odnoral V.P. Local characteristics of upward gasliquid flows // Int. J. Multiphase Flow. 1981. V. 7. P. 63-81.
- 7. Кузеванов В.С., Корниенко Ю.Н. Осреднение параметров двухфазного потока при немонотонном распределении концентрации легкой фазы в поперечном сечении канала: В сб. научн. тр. Уральского политехнического института. Теплофизика ЯЭУ. Вып. 4. Свердловск: Изд. УПИ, 1985. С. 44-51.
- 8. *Балакин П.П., Корниенко Ю.Н., Кузеванов В.С.* Уточнение описания двухфазного неравновесного потока в одномерном приближении: Сб. докл. VII Всесоюзной конф. «Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах». Т.1. Л., 1985. С. 59-61.

ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕПЛОГИДРАВЛИКА

- 9. Слехнович А.Н., Похвалов Ю.Е., Субботин В.И. Влияние распределения газосодержания по сечению на проскальзывание фаз в двухфазном потоке: В сб. Расчетные и экспериментальные методы в теплофизике ядерных реакторов. М.: Энергоиздат, 1982. С. 75-82.
- 10. Селиванов В.М., Болтенко Э.А., Корниенко Ю.Н. и др. Оценка погрешности определения истинного объемного паросодержания по измеренным значениям средней плотности смеси в термически неравновесных двухфазных потоках: В сб. Вопросы атомной науки и техники, Сер. Физика и техника ядерных реакторов. Вып. 6, 1987. С. 95-98.
- 11. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике. М.: Наука, 1978.
- 12. Слэттери Дж. Теория переноса импульса, энергии и массы в сплошных средах. М.: Энергоиздат, 1978. 448 с.

Поступила в редакцию 14.11.2002

УДК 621.039.534

ПАРАМЕТРЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ КВАЗИОДНОМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ДВУХФАЗНЫХ НЕРАВНОВЕСНЫХ ПОТОКОВ. ОБОБЩЕНИЕ ДЛЯ ТЕЧЕНИЙ В КОЛЬЦЕВЫХ КАНАЛАХ И ТВС

Ю.Н. Корниенко

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, Обнинск



Полученные в предыдущих работах [1, 2] зависимости для параметров распределений \mathcal{C}_{ks} двухфазных неравновесных потоков обобщены для течений в каналах кольцевой формы и сборках стержней. При этом использованы метод суперпозиции и допущение о справедливости степенных аппроксимаций профилей локальных параметров фаз. Получены предельные формы параметров распределений для симметричных субканалов в ТВС с тесной упаковкой твэлов, а также зависимости для оценки параметров распределений с учетом азимутальных изменений переменных.

ВВЕДЕНИЕ

Кольцевые каналы, являясь примером более сложной геометрии по сравнению с плоскими щелями и круглыми трубами, представляют интерес как сами по себе (в энергетике это трубки Фильда, кольцевые твэлы и проточные части), так и в качестве идеализированной модели тепловыделяющей сборки (ТВС). Определение теплогидравлических характеристик на основе метода кольцевых каналов является следующим, более содержательным физико-математическим описанием после модели «эквивалентной трубы» [3].

Параметры распределений (ПР) двухфазного потока \mathcal{C}_{ksn} , впервые сформулированные для субканальных методик в [4], были представлены там лишь как необходимый элемент такого подхода без каких-либо конкретных рекомендаций по их функциональным зависимостям или оценкам. Вместе с тем, широкий диапазон изменения ПР, показанный в [1,2] для каналов простой геометрии, и требования совершенствования субканальных методик обуславливают необходимость разработки и анализа ПР для сложной геометрии ячеек ТВС.

Очевидно, что параметры распределений \mathcal{C}_{ksn} в субканальных анализах должны быть связаны с геометрией ячеек и упаковкой твэлов в ТВС. Однако наложение принципиальных трудностей, связанных как с описанием турбулентного течения двухфазной неравновесной среды, так и с процессом интегрирования по сечению канала сложной формы, является причиной отсутствия до сих пор строгих и надежных рекомендаций для \mathcal{C}_{ksn} . Поэтому в большинстве работ эти корреляцион-

ные коэффициенты принимают равными единице, что автоматически означает использование допущения плоских профилей параметров. Те немногочисленные субканальные методики, которые используют ПР (как правило, лишь \mathcal{C}_0 [5]), ограничиваются корреляциями, взятыми из работ для каналов простой формы, или эмпирическими зависимостями, полученными из интегральных экспериментов для сборки в целом.

В настоящей работе развивается методология, предложенная в [1, 2, 6-8], и проводится обобщение аналитических зависимостей параметров распределений для течений двухфазных потоков в кольцевых каналах, а также в сборках стержней гексагональной и квадратной упаковки. Как и для каналов простой геометрии [1,2], ПР для каналов сложной формы призваны обеспечить более корректное описание распределенной по рассматриваемому контрольному объему массы, импульса и энергии двухфазного неравновесного потока, что весьма существенно для целей анализа и тестирования субканальных методик. Основная идея предлагаемого подхода заключается в последовательном применении метода суперпозиции для искомых переменных в рассматриваемых фрагментах кольцевых каналов и ячеек (субканалов) в ТВС. Список основных обозначений приведен в [1], остальные представлены по тексту работы.

1. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ДЛЯ КОЛЬЦЕВЫХ КАНАЛОВ

Представим, что движение в осесимметричном кольцевом (an) канале происходит по двум кольцевым зонам: внутренней «1» и внешней «2», толщиной δ_1 и δ_2 соответственно (см. рис. 1). Заметим здесь, что в более общем случае $\delta_1 \neq \delta_2$, т.е. линия раздела зон не проходит на половине ширины кольцевого канала, а определяется на основе рассмотрения гидродинамических или тепловых задач. В частности, в зависимости от граничных условий на стенках это может быть линия экстремума значений вязкого напряжения или плотности теплового потока, или профиля скорости, или температуры.

После элементарных преобразований связь относительных площадей зон с их толщиной принимает вид

$$\widetilde{A}_{1} = \frac{A_{1}}{A} = \frac{\widetilde{\delta}_{1}(1 - \widetilde{\delta}_{1})}{\widetilde{\delta}_{1}(1 - \widetilde{\delta}_{1}) + \widetilde{\delta}_{2}(1 + \widetilde{\delta}_{2})},$$
(1a)

$$\widetilde{A}_{2} = \frac{A_{2}}{A} = \frac{\widetilde{\delta}_{2}(1 + \widetilde{\delta}_{2})}{\widetilde{\delta}_{1}(1 - \widetilde{\delta}_{1}) + \widetilde{\delta}_{2}(1 + \widetilde{\delta}_{2})},$$
(1b)

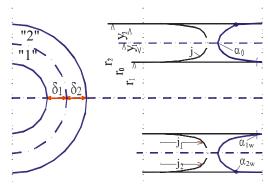


Рис. 1. Геометрические параметры и профили переменных в кольцевом канале

где
$$\widetilde{\delta}_1 = \delta_1/2r_0$$
 и $\widetilde{\delta}_2 = \delta_2/2r_0$.

Общее выражение для ПР в кольцевых каналах (рис. 1) непосредственно следует из двухзонной модели [2] и для параметра распределения паро(влаго)-содержания имеет вид

$$C_{k0}^{an} = \sum_{a=1}^{2} C_{k0a} \langle \widetilde{\alpha}_{k} \rangle_{a} \langle \widetilde{J} \rangle_{a} \widetilde{A}_{a}, \qquad (2)$$

где
$$\langle j \rangle_a \equiv \langle j \rangle_a / \langle j \rangle$$
 и

 $\langle \widetilde{\alpha}_k \rangle_a \equiv \langle \alpha_k \rangle_a / \langle \alpha_k \rangle$; верхний индекс *an* означает общий двухзонный для кольце-

вого (annular) канала параметр распределения (в данном случае фазосодержания).

Здесь следует подчеркнуть, что любой из параметров распределений \mathcal{C}^{an}_{ks} двух-зонной модели кольцевого канала (1) имеет форму соотношения (2). Нетрудно получить параметры распределений в виде

$$C_{ks}^{an} = C_{ks1} \langle \widetilde{\alpha}_k \rangle_1 \widetilde{A}_1 \langle \widetilde{\varphi}_{ks} \rangle_1 + C_{ks2} \langle \widetilde{\alpha}_k \rangle_2 (1 - \widetilde{A}_1 \langle \widetilde{\varphi}_{ks} \rangle_1), \tag{3}$$

$$C_{ks}^{an} = C_{ks1} \langle \widetilde{\alpha}_k \rangle_1 (1 - \widetilde{A}_2 \langle \widetilde{\varphi}_{ks} \rangle_2) + C_{ks2} \langle \widetilde{\alpha}_k \rangle_2 \widetilde{A}_2 \langle \widetilde{\varphi}_{ks} \rangle_2. \tag{4}$$

В этих соотношениях параметр распределения для кольцевого канала в целом \mathcal{C}^{an}_{ks} связан через параметры распределений по зонам с их относительными площадями, фазосодержаниями и расходами. Предпочтение какой-либо из форм (3) или (4) может диктоваться условиями эксперимента или возможностью принятия дополнительных допущений в анализе.

Параметры распределений (например, для паросодержания) по зонам «1» и «2» кольцевого канала в обозначениях рис. 1 удобней всего представить в виде

$$C_{g0a} = \frac{(1 \mp \widetilde{\delta}_a) \int_0^1 \alpha_a j_a (1 \mp 2\widetilde{\delta}_a Y_a) dY}{\int_0^1 \alpha_a (1 \mp 2\widetilde{\delta}_a Y_a) dY \int_0^1 j_a (1 \mp 2\widetilde{\delta}_a Y_a) dY},$$
(5)

где $Y_a = y_a/\delta_a$ и $\widetilde{\delta}_a = \delta_a/2r_0$; здесь индекс a означает номер зоны 1 или 2, причем имеет место следующее правило знаков: для зоны 1 знак "-", для зоны 2 знак "+".

Используя символическую < форму записи интегралов (5), имеем

$$\mathcal{C}_{g0a} = \frac{(1 \mp \widetilde{\delta}_{a})(\langle \alpha j \rangle_{a\delta} \mp \widetilde{\delta}_{a} \langle \alpha j \rangle_{ap})}{(\langle \alpha \rangle_{a\delta} \mp \widetilde{\delta}_{a} \langle \alpha \rangle_{ap})(\langle j \rangle_{a\delta} \mp \widetilde{\delta}_{a} \langle j \rangle_{ap})} = \\
= \frac{(1 \mp \widetilde{\delta}_{a})(\mathcal{C}_{0a\delta} \langle \alpha \rangle_{a\delta} \langle j \rangle_{a\delta} \mp \widetilde{\delta}_{a} \mathcal{C}_{0ap} \langle \alpha \rangle_{ap} \langle j \rangle_{ap})}{(\langle \alpha \rangle_{a\delta} \mp \widetilde{\delta}_{a} \langle \alpha \rangle_{ap})(\langle j \rangle_{a\delta} \mp \widetilde{\delta}_{a} \langle j \rangle_{ap})}.$$
(6)

Тогда для каждой из зон с учетом ее размера δ_1 , δ_2 и осредненных параметров соотношения (6) можно представить в обобщенном виде для любой зоны "a" кольца

$$C_{ksa} = C_{ksa\delta} \frac{\left(1 \mp \widetilde{\delta}_{a} \left(1 \mp \widetilde{\delta}_{a} \frac{C_{ksap}}{C_{ksa\delta}} \frac{\langle \alpha_{k} \rangle_{ap}}{\langle \alpha_{k} \rangle_{a\delta}} \frac{\langle \varphi_{ks} \rangle_{ap}}{\langle \varphi_{ks} \rangle_{a\delta}}\right)}{\left(1 \mp \widetilde{\delta}_{a} \frac{\langle \alpha_{k} \rangle_{ap}}{\langle \alpha_{k} \rangle_{a\delta}}\right) \left(1 \mp \widetilde{\delta}_{a} \frac{\langle \varphi_{ks} \rangle_{ap}}{\langle \varphi_{ks} \rangle_{a\delta}}\right)}.$$
(7)

Здесь индексы " δ " и "p" означают плоскую щель и круглую трубу соответственно. Обобщенные параметры распределений $\mathcal{C}_{ksa\gamma} = f(m_a, n_a, \gamma, \phi_{ksaw}, \langle \phi_s \rangle_{a\gamma})$ для плоских каналов и труб подробно проанализированы и проиллюстрированы в [1]. Заметим только, что в обозначениях переменных кольцевого канала наиболее общая форма выражения параметра распределения, например, для фазосодержания, имеет вид

$$C_{k0a\gamma} = 1 + \frac{\gamma}{m_a + n_a + \gamma} \left(1 - \frac{\alpha_{kaw}}{\langle \alpha_k \rangle_{a\gamma}} \right), \tag{8}$$

где $\gamma = 1$ – плоская щель; $\gamma = 2$ – круглая труба; α - индекс зоны.

Таким образом, общий параметр распределения для кольцевого канала \mathcal{C}^{an}_{ks} (2) представлен в виде взвешенной суммы параметров распределений по зонам \mathcal{C}_{ksa} (7), каждый из которых, в свою очередь, является комбинацией элементарных параметров распределений для каналов простой геометрии: плоской щели и круглой трубы, связанных между собой геометрическими размерами, относительными фазосодержаниями и расходами по зонам.

К сожалению, в литературе отсутствуют опытные данные, содержащие замеры всех необходимых локальных профилей переменных по сечениям кольцевых каналов, что затрудняет осуществление опытной проверки принятых допущений и полученных зависимостей.

2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ДЛЯ ЯЧЕЕК (СУБКАНАЛОВ- $_{ m N}$) $C_{ m KSN}$

С точки зрения термогидравлики, сборки тепловыделяющих стержней являются многосвязанными системами индивидуальных ячеек (субканалов), определенных на основе какого-либо способа разбиения поперечного сечения. Чаще всего в качестве границ ячеек принимают линии симметрии, проходящие через центры твэлов. Вследствие симметрии другие способы разбиения ТВС на субканалы могут быть сведены к данному геометрическими преобразованиями. При этом предполагается, что поперечные (трансверсальные, радиальные и азимутальные) перетоки субстанций (импульса, тепла и массы) через воображаемые границы между ячейками должны способствовать уменьшению локальных неоднородностей в теплонапряженности и увеличению запаса до кризиса теплообмена.

В субканальной термогидравлике *) кроме традиционных процессов, сопровождающих течения в односвязанных геометриях, выделяют три дополнительных механизма взаимообмена субстанциями [4,7,8] на поверхности раздела между ячейками сборки. К ним относят процессы переноса вследствие турбулентного взаимообмена субстанциями, конвективного вынужденного течения в трансверсальном направлении (за счет разности давлений в разных ячейках) и диффузию легкой паровой фазы в более высокоскоростные области (ячейки) сборки. Именно этими механизмами обусловлен азимутальный перенос субстанций и вызываемые им азимутальные изменения в температуре, паро(газо)содержании и аксиальных переменных, прежде всего, скорости. Указанные механизмы с помощью эмпирических замыкающих соотношений вводятся как источниковые члены в правые части уравнений законов сохранения квазиодномерной субканальной модели. Таким образом, к радиальным распределениям параметров (типичным для осесимметричных односвязанных геометрий – плоской щели и круглой трубы) азимутальные переносы субстанций в ТВС добавляют азимутальные изменения переменных, что, естественно, должно найти свое отражение в соответствующих параметрах распределений для субканалов.

Хотя все процессы переноса субстанций в субканальной геометрии нелинейны, взаимосвязанны и взаимообусловленны, но применение основного допущения о возможности разделения переменных позволяет использовать принцип суперпозиции, иллюстрацией которого являются аналитические соотношения, полученные в предыдущих работах [1,2]. Ниже приведен вывод аналитических соот-

^{*)} Замечание. Влияние дистанционирующих решеток и элементов, описываемое в настоящее время лишь чисто эмпирически, вообще говоря, можно учесть, используя модели источниковых и стоковых функций, отражающие механизмы локального возмущающего воздействия как дополнительные факторы для рассматриваемых эффектов.

ношений для параметров распределений при течении теплоносителя в ТВС с треугольной и квадратной упаковкой твэлов.

Исходным при выводе параметров распределений в поперечном сечении A_n ячейки-n является основное соотношение в виде

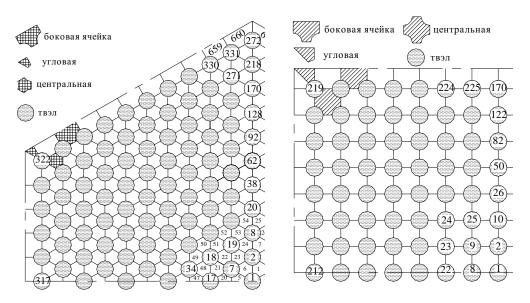
$$C_{ksn} = \frac{\langle \alpha_k \varphi_{ks} \rangle_n}{\langle \alpha_k \rangle_n \cdot \langle \varphi_{ks} \rangle_n} = \frac{A_n \int_{A_n} \alpha_k \varphi_{ks} dA}{\int_{A_n} \alpha_k dA \cdot \int_{A_n} \varphi_{ks} dA}.$$
 (9)

Заметим здесь, что для выделения локальных задач с осреднением по малому углу Δ (в том числе и для субканала) в обозначениях интегральных осреднений мы используем символ криволинейных скобок $\prec \succ$ (или ^) в отличие от глобальных осреднений по периоду симметрии или по всей окружности твэла $\langle \ \rangle$.

С точки зрения упрощения математических описаний и получения аналитических решений множество ячеек в ТВС и геометрическая симметрия являются мощными средствами упрощения исходных моделей субканалов, обеспечивающими преемственность со свойствами «элементарных» ПР [1], а также строгость и последовательность при выводе и анализе замыкающих аналитических соотношений для параметров распределений.

2.1. Параметры распределений для ТВС с симметричными (однородными) ячейками

Огромное число ячеек в современных ТВС (см. рис. 2а, б) «обезличивает» и «симметризует» каждую из них, позволяя сделать допущение о том, что геометрическая симметрия отдельной ячейки и ее пространственная повторяемость (регулярность) приводят к симметрии и азимутальной периодичности граничных условий и распределений искомых переменных в поле течения. Однородность, точнее одинаковость пространственного характера структуры потока позволяет ввести понятия симметричных, «бесконечно» повторяющихся однородных ячеек. Это не различимые (в идеале) между собой ячейки (в количестве n_c) центральной зоны ТВС с большим числом твэлов. Ясно, что параметры распределений $\mathcal{C}_{ksn}^{\infty}$ для них одинаковы.



И если их общее количество велико по сравнению с ячейками другого рода, например периферийными, то общий параметр распределения (Т) для сборки ТВС (при $n_c \rightarrow \infty$) станет

$$C_{ks}^{T} = C_{ksn}^{\infty}, \tag{10}$$

 ${\cal C}_{ks}^{^{
m T}}={\cal C}_{ksn}^{^{\infty}}$, (10) т.е. для однородной сборки общие для нее параметры распределения равны ПР симметричной ячейки. Очевидно также, что если имеются субканалы двух типов, например, центральные (симметричные) и периферийные (несимметричные), то суммарные параметры распределений такой ТВС и их компоненты можно представить в виде полученных ранее соотношений двухзонной модели (2) - (4). Количественную меру такой однородности, или границу разбиения ячеек на зоны, в качестве первого приближения можно связать с эмпирическим инженерным 5-процентным критерием как количественной границей между параметрами распределений для разнородных ячеек, например, центральных и периферийных или иных.

Простейший способ описания собственно параметров $\mathcal{C}_{ksn}^{\infty}$ распределений бесконечной, регулярной, однородной ячейки можно представить также в виде двухзонной модели (рис. 36 и 3в), состоящей из пристенных A_1 кольцевых слоев и центральной A_2 зоны сложной формы в виде регулярных криволинейных треугольников или квадратов. Параметры распределений такой двухзонной модели могут быть описаны на основе приведенного выше подхода для кольцевых каналов. При этом в качестве рекомендаций для пристенной зоны вполне приемлемы соотношения, полученные для первой зоны кольцевого канала. Вторая, центральная зона симметричной ячейки в ТВС хотя и обладает сложной геометрической формой, но изменения переменных в ней весьма незначительны, и с приемлемой для наших целей точностью профили переменных в ней можно считать неизменными. Косвенным подтверждением этого являются прецизионные экспериментальные профили скорости, измеренные в однофазных опытах [9], а также расчетные профили, полученные с помощью многомерных расчетных программ [10] (см. рис. 3а). Прямых измерений необходимых локальных переменных для двухфазных потоков в сборках стержней, прежде всего, из-за отсутствия микродатчиков достаточной чувствительности и трудностей, связанных со сложностью геометрии сборок ТВС, в настоящее время в литературе не имеется.

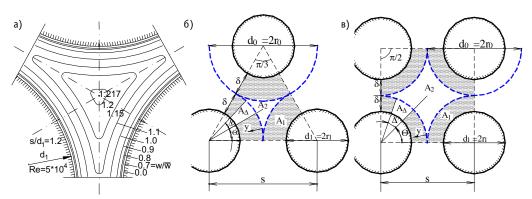


Рис. 3. Параметры и топография ячеек: а) - изотахи [10]; геометрия симметричных ячеек: б) - треугольной (n=3) и в) - квадратной (n=4) упаковок твэлов для двухзонной модели, со следующими

геометрическими характеристиками:
$$\widetilde{A}_1 = \frac{\widetilde{\delta}(2-\widetilde{\delta})}{E_n\widetilde{\widetilde{s}}^2-(1-\widetilde{\delta})^2}$$
; $\widetilde{\delta} = \frac{d_0-d_1}{2d_0}$;

$$E_n = egin{cases} (2\sqrt{3}-\pi)/4\pi, & n=3-\therefore\ ; \widetilde{A}_2 = 1-\widetilde{A}_1 \ , \ \mathrm{3}$$
десь d_0 совпадает с шагом решетки $s=1-\widetilde{A}_1 \ , \ \mathrm{3}$

Итак, двухзонное (пристенная и центральная зоны) представление параметров распределений симметричной ячейки (см. рис. 3б и 3в) на основе соотношений (3) (4) примет вид

$$\mathcal{C}_{k0n}^{\infty} = \mathcal{C}_{k01}^{\wedge} \prec \widetilde{\alpha}_{k} \succ_{1} \widetilde{A}_{1} \prec \widetilde{j} \succ_{1} + \mathcal{C}_{k02}^{\wedge} \prec \widetilde{\alpha}_{k} \succ_{2} (1 - \widetilde{A}_{1} \prec \widetilde{j} \succ_{1}) \tag{11}$$

или

$$C_{k0n}^{\infty} = C_{k01}^{\wedge} \prec \widetilde{\alpha}_k \succ_1 (1 - \widetilde{A}_2 \prec \widetilde{j} \succ_2) + C_{k02}^{\wedge} \prec \widetilde{\alpha}_k \succ_2 \widetilde{A}_2 \prec \widetilde{j} \succ_2$$
 (12)

с геометрическими характеристиками ячеек, приведенными в подписи к рис. 3.

Конкретизация пределов интегрирования определяется условиями рассматриваемой задачи. Следует иметь в виду, что в уравнениях (11) и (12) еще не указаны пределы интегрирования по азимутальной переменной, поэтому они остаются справедливыми для любых пределов: как для осреднения по локальному углу Δ или по соответствующему периоду для треугольной - с углом (π /6), или квадратной - (π /4) упаковки, так и по всему периметру окружности твэла. Необходимые локальные аппроксимации переменных, например, степенного вида для радиального направления, принимаются подобно [2]. При этом возможна дальнейшая детализация характеристик рассматриваемой ячейки, в частности в пристенных зонах, принадлежащих к конкретному стержню ТВС.

Общий вид параметра распределения, например, газосодержания $_{\rm g}$, для пристенной кольцевой зоны на основании определения (9) (в обозначениях рис. 3 для сборок твэлов треугольной и квадратной упаковки) удобнее всего представить как

$$C_{g01}^{\wedge} = \frac{\Delta \cdot (1 - \tilde{\delta}) \cdot \int_{\theta}^{\theta + \Delta} \int_{0}^{1} \alpha_{1} j_{1} (1 - 2\tilde{\delta} Y_{1}) dY d\theta}{\int_{\theta}^{1} \int_{0}^{1} \alpha_{1} (1 - 2\tilde{\delta} Y_{1}) dY d\theta},$$

$$(13)$$

где $Y_1 = y_1/\delta$. Для переменных в пристенной зоне используем индекс $_{(1)}$. Изменения параметров потока в центральной зоне можно в большинстве случаев считать незначительными, а значит, параметры распределений для нее весьма близки к единице, и поэтому основной вклад внесет пристенная зона. Описание параметров распределений для нее дается соотношениями типа (7), записанными для рассматриваемого кольцевого сектора:

$$C_{\hat{k}s1} = C_{\hat{k}s1\delta} \frac{\left(1 - \tilde{\delta}\right) \left(1 - \tilde{\delta}\right) \frac{C_{\hat{k}s1p}}{C_{\hat{k}s1\delta}} \frac{\langle \alpha_k \rangle_{1p}}{\langle \alpha_k \rangle_{1\delta}} \frac{\langle \phi_{ks} \rangle_{1p}}{\langle \phi_{ks} \rangle_{1\delta}}\right)}{\left(1 - \tilde{\delta}\right) \frac{\langle \alpha_k \rangle_{1p}}{\langle \alpha_k \rangle_{1\delta}} \left(1 - \tilde{\delta}\right) \frac{\langle \phi_{ks} \rangle_{1p}}{\langle \phi_{ks} \rangle_{1\delta}}},$$
(14)

где в общем виде «элементарный» параметр распределения для кольцевого сектора зоны "1" записывается подобно (8) и для фазосодержания первой зоны имеет вид

$$C_{k01\gamma}^{\wedge} = 1 + \frac{\gamma}{m_1 + n_1 + \gamma} \left(1 - \frac{\Delta \cdot \alpha_{k1w}^{\wedge}}{\prec \alpha_k \succ_{1\gamma}} \right). \tag{15}$$

Соотношения (14) и (15) определяют наиболее общую форму параметра распределения фазосодержания для рассматриваемого сектора пристенной зоны ячейки (субканала) через его компоненты по 1-ой зоне.

Таким образом, общий параметр распределения для симметричной однородной ячейки, использующий представления кольцевого \mathcal{C}^{an}_{ks} (2) или сложного (моделирующего сборку твэлов) канала по соотношениям $\mathcal{C}^{\infty}_{ksn}$ (11) и (12), представлен в виде комбинации элементарных параметров распределений для каналов простой геометрии (плоской щели $_{(\delta)}$ и круглой трубы $_{(p)}$ - $\mathcal{C}^{\infty}_{ksn1\gamma}$), связанных между собой геометрическими характеристиками, относительными фазосодержаниями и расходами по зонам ячейки (субканала).

2.2. Предельные формы параметров распределений для ТВС с симметричными ячейками

Без учета изменения переменных и граничных условий в азимутальном направлении предельные формы параметров распределений для однородной ячейки сборки ТВС по модели кольцевых каналов (7) при условиях $m_1>>1$, $n_1>>1$, $\delta<<1$ принимают вид

 $\mathcal{C}_{\hat{k}s1} \cong \mathcal{C}_{\hat{k}s1\delta} (1-\widetilde{\delta})(1-\widetilde{\delta}\widetilde{\mathcal{C}}_{\hat{k}s1})(1+\widetilde{\delta}\alpha_{p\delta})(1+\widetilde{\delta}\phi_{p\delta}) \approx \mathcal{C}_{\hat{k}s1\delta} (1-\widetilde{\delta}^2) \approx \mathcal{C}_{\hat{k}s1\delta} (1-4\widetilde{\delta})$, (16) где символ ^ означает осредненные для рассматриваемого азимутального угла переменные.

Это указывает на возможность моделирования характеристик однородной ячей-ки сборки ТВС на основе плоской щели при условиях справедливости принятых допущений, т.е. при средних и высоких массовых скоростях теплоносителя. Используя соотношения (11)-(12) при допущениях $m_1 >> 1$, $n_1 >> 1$ и $\tilde{\delta} << 1$, получим следующую оценку:

$$C_{ksn}^{\wedge} = C_{ks1\delta}^{\wedge} (1 - 4\tilde{\delta}) \left(\frac{\tilde{\delta}}{E_n + \tilde{\delta}} \right)^2 \prec \tilde{\alpha}_k \succ_1 + \tilde{\alpha}_k \succ_2 \left(\frac{E_n}{E_n + \tilde{\delta}} \right)^2. \tag{17}$$

Это при $\widetilde{\delta} >> E_n$ и $\prec \widetilde{\alpha}_k \succ_1 \to 1$ приводит к заключению, что $\mathcal{C}_{ksn} = \mathcal{C}_{ks1\delta}$, т.е. при относительно тесных шагах решетки твэлов параметры распределений таких сборок близки к параметрам распределений щелевых каналов.

Рассмотрим крайние случаи по распределениям паросодержаний. Если в центральной зоне ячейки паросодержание отсутствует, например, при кипении с недогревом, то

$$C_{ksn}^{\wedge} \approx C_{ks1\delta}^{\wedge} (1 - 4\tilde{\delta}) \prec \tilde{\alpha}_k \succ_1 \left(\frac{\tilde{\delta}}{E_n + \tilde{\delta}}\right)^2.$$
 (18)

И, наоборот, если в пристенной зоне паросодержание ничтожно мало, например, в кольцевом режиме течения, то

$$C_{ksn}^{\wedge} \approx C_{ks2\delta}^{\wedge} \prec \widetilde{\alpha}_k \succ_2 \left(\frac{E_n}{E_n + \widetilde{\delta}}\right)^2.$$
 (19)

В последних двух случаях (18) и (19) параметры распределений сборки во многом зависят от геометрических соотношений между зонами 1 и 2, т.е. от шага решетки, тогда для решеток при $\widetilde{\delta} >> E_n$ имеем

$$C_{ksn}^{\wedge} \approx C_{ks1\delta}^{\wedge} (1 - 4\tilde{\delta}) \prec \tilde{\alpha}_k \succ_1 \approx C_{ks1\delta}^{\wedge},$$
 (20)

а для решеток при $\widetilde{\delta} << \mathcal{E}_n$ получим, что $\mathcal{C}_{ksn}^{\wedge} \approx \mathcal{C}_{ks2\delta}^{\wedge} \prec \widetilde{\alpha}_k \succ_2 \approx \mathcal{C}_{ks2\delta}^{\wedge}$.

Таким образом, эти соотношения демонстрируют преобладание той или иной зоны в зависимости от геометрии и условий течения в ячейке и доказывают при-

нимавшееся ранее без обоснований допущение о возможности описания термогидравлики в сборке твэлов тесной упаковки моделью плоской щели.

2.3. Влияние несимметричности на параметры распределений (боковая и угловая ячейки)

При получении аналитических решений для параметров распределений в задачах субканального анализа, даже оставаясь в рамках двухзонной модели, возможно принятие различного уровня приближений относительно влияния азимутальных неоднородностей.

- 1. В ТВС правильной геометрии с большим («бесконечным») числом твэлов, азимутальные эффекты можно считать либо незначительными, либо умеренно периодическими по азимутальной координате без заметного влияния притока субстанций через боковую грань (поверхность) ячеек.
- 2. В ТВС с неоднородной геометрией ячеек (в том числе периферийных), а также с малым числом твэлов необходимо учитывать азимутальное влияние переносимых субстанций. При этом для целей анализа можно выделить две крайних модели:
- а) азимутальные изменения большой амплитуды (например, теплового потока) внутри ячейки с малыми эффектами взаимообмена между смежными ячейками и, наоборот,
- б) преобладание эффектов переноса на боковых гранях ячеек (моделируемых соответствующими членами правых частей уравнений законов сохранения массы, импульса и тепла) при незначительных периодических азимутальных зависимостях внутри субканала.
- 3. Общий случай соизмеримых эффектов 2a) и 2б), т.е. наложение азимутальных процессов внутри ячейки и поперечных перетоков через боковые грани характерен в частности для двухъячейковой геометрии. Исследование и оценка моделей переноса в двух смежных ячейках представляется важным с точки зрения разработки как методик экспериментальных измерений локальных параметров, так и аналитических и численных моделей, что требует отдельной работы.

Для периферийных ячеек ТВС, изображенных на рис. 4, в первом приближении можно также использовать примененное выше двухзонное описание

$$C_{ksnb} = C_{ks1b} \prec \widetilde{\alpha}_k \succ_{1b} \widetilde{A}_{1b} \prec \widetilde{\varphi}_{ks} \succ_{1b} + C_{ks2b} \prec \widetilde{\alpha}_k \succ_{2b} \widetilde{A}_{2b} \prec \widetilde{\varphi}_{ks} \succ_{2b}, \tag{21}$$

где индекс b принимает значения ℓ и c для боковой и угловой ячеек соответственно.

При этом геометрические характеристики этих периферийных ячеек в двухзонном представлении описываются соотношениями, приведенными в подписи к рис.4.

Ясно, что в зависимости от конструкций ТВС возможны различные сочетания между шагом решетки $s=d_0$ и расстоянием до стенки b, поэтому рассмотрение предельных форм таких соотношений, по крайней мере, в четыре раза превысит их количество по сравнению с симметричными ячейками и, при необходимости, может быть сделано отдельно.

При оценке влияния несимметричности азимутальных эффектов на параметры распределений основной вклад, естественно, принадлежит пристенной (первой) зоне ячейки как для ее центрального, так и бокового или углового расположения в ТВС. На рис. 5 изображено возможное поведение профилей переменных в пристенной зоне.

В рассматриваемых приложениях азимутальные распределения переменных и граничных условий в пристенной зоне имеют периодический характер. Исполь-

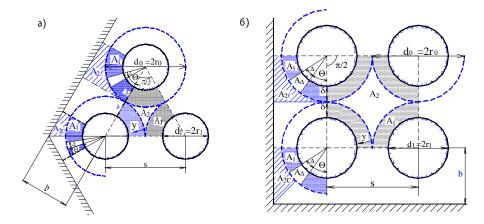


Рис. 4. Геометрические параметры поперечных сечений боковой (ℓ) и угловой (с) ячеек: a) - треугольной (n=3) и б) - квадратной (n=4) упаковок твэлов для двухзонной модели, со

следующими геометрическими характеристиками боковой и угловой ячеек: $\widetilde{A}_{1\ell} = \frac{4\widetilde{\delta}(1-\widetilde{\delta})}{E \cdot \widetilde{b} - (1-2\widetilde{\delta})^2}$;

$$\widetilde{A}_{2\ell} = 1 - \widetilde{A}_{1\ell}; \ \widetilde{\delta} = \frac{d_0 - d_1}{2d_0}; \ E_{n\ell} = 8 / \pi; \ \widetilde{A}_{1c} = \frac{4\widetilde{\delta}(1 - \widetilde{\delta})}{E_{n\ell}\widetilde{b}^2 - (1 - 2\widetilde{\delta})^2}; \ \widetilde{A}_{2c} = 1 - \widetilde{A}_{1c};$$

$$\widetilde{b} = \frac{b}{d_0}$$
; $E_{nc} = \begin{cases} 24/(\sqrt{3}\pi), & n = 3 - ... \\ 16/\pi, & n = 4 - : : \end{cases}$

зуя аппроксимационные зависимости степенного вида [2], можно записать

$$\alpha = \alpha_w^{\hat{}} f_{\alpha w}(\theta) - (1 - R^n) (\alpha_w^{\hat{}} f_{\alpha w}(\theta) - \alpha_c^{\hat{}} f_{\alpha c}(\theta))$$
 (22)

$$h = h_w^{\hat{}} f_{hw}(\theta) - (1 - R^{\ell}) (h_w^{\hat{}} f_{hw}(\theta) - h_c^{\hat{}} f_{hc}(\theta)), \tag{23}$$

$$j = (1 - R^m)j_c^{\hat{}} f_{jc}(\theta), \qquad (24)$$

где $0 \le R \le 1$, здесь $R=y/\delta$. Значком $\hat{}$ обозначен некий средний уровень отсчета для азимутального изменения для любой из рассматриваемых функций $f_{\phi w}(\theta)$ или $f_{\phi c}(\theta)$. По-прежнему, индекс $\phi = (\alpha, \text{ или } h, \text{ или } j)$ означает субстанцию.

Представление переменных в виде (22)-(24) означает принятие допущения о разделении переменных по радиальной и азимутальной координатам.

В общем случае функции $f_{\phi w}(\theta)$ и $f_{\phi c}(\theta)$ могут быть сдвинуты относительно друг друга, что приведет к неэквидистантному изменению переменной по азимуту, что можно интерпретировать как процесс азимутального переноса субстанции. Однако в первом приближении ими можно пренебречь и считать $f_{\phi w}(\theta) = f_{\phi c}(\theta) = f_{\phi c}(\theta)$.

Поскольку азимутальные изменения на границах зон для сборок ТВС являются сложными периодическими функциями, то аппроксимация их на основе рядов Фурье [11, 12] представляется наиболее целесообразной. Если при этом для определенности принять, что экстремальные значения скорости (плотности объемного потока), температур и паросодержаний соответствуют линиям (граням), разделяющим смежные ячейки, то, учитывая четность аппроксимируемых функций, можно использовать для рассматриваемой переменной простое косинусоидальное разложение с соответствующей амплитудой, периодом и фазой и методы гармонического анализа [12] для ее наилучшего приближения, т.е.

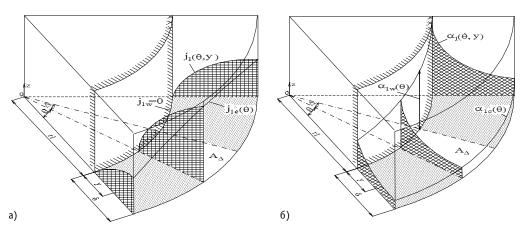


Рис. 5. Иллюстрации азимутальных распределений локальных профилей плотности объемного потока (a) и паросодержания (б), а также граничных условий для пристенной зоны несимметричной ячейки

$$f_{\varphi}(\theta) = 1 + \sum_{i=i_0}^{i_1} a_{i\varphi} \cos(i\theta_{\varphi}), \tag{25}$$

и если аппроксимируемая рядом Фурье функция имеет период 2η, то на интервале (-η,η) коэффициенты вычисляют как

$$a_{i\varphi} = \frac{1}{\eta} \int_{-\eta}^{\eta} f_{\varphi}(\theta) \cos \frac{i\pi\theta_{\varphi}}{\eta} d\theta$$
 (*i* = 0, 1, 2 ...). (26)

Основными гармониками являются i_0 =6 - для треугольной и i_0 =4 - для квадратной решеток, а i_0 =1 - для эксцентрических кольцевых каналов и периферийных твэлов. Значения коэффициентов, а также формулы для частных сумм ряда Фурье $a_{i\phi}$, могут быть получены и оценены аналитически на основе лемм Римана-Лебега [12]; пример обработки опытных данных для пристенного трения приведен в [12].

В общем случае осреднение по углу граничных условий (25) не представляет принципиальных трудностей и подчиняется правилам почленного интегрирования рядов Фурье. После подстановки зависимостей (22)-(25) в определения осредненных по кольцевому сектору переменных и параметров распределений получим их аналитические соотношения с учетом влияния азимутальных изменений. Например, аналитическое соотношение параметра распределения фазосодержания для первой (пристенной) зоны имеет вид

$$C_{k01\gamma}^{\wedge} = 1 + \frac{\gamma}{f_{jc}^{\wedge} m_1 + f_{\alpha w}^{\wedge} n_1 + \gamma} \left(1 - \frac{\Delta \cdot \alpha_{k1w}^{\wedge}}{\langle \alpha_k \rangle_{1\gamma}} \right), \tag{27}$$

где коэффициенты f_{jc}^{\wedge} и $f_{\alpha w}^{\wedge}$ порядка единицы, представляющие вклад азимутальной неравномерности граничных условий, аппроксимированных частной суммой ряда Фурье по плотности объемного потока и фазосодержания на границе зон. Аналогичную форму имеет каждый из рассматриваемых в данной работе параметров распределений для ячейки с неоднородным профилем граничных условий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обобщение аналитических зависимостей параметров распределений, предложенных в [1, 2, 7, 8] для течений двухфазных потоков в каналах простой геометрии и с немонотонным профилем переменных, используется в кольцевых ка-

налах, а также в сборках стержней гексагональной и квадратной упаковок. Основная идея предлагаемого подхода заключается в последовательном применении метода суперпозиции для искомых переменных в рассматриваемых фрагментах кольцевых каналов и ячеек (субканалов) в ТВС.

- 2. На основе двухзонной модели получены аналитические зависимости параметров распределений, их предельные формы и соотношения дополнительности для кольцевых каналов, а также для ячеек (субканалов) в сборках стержней. Приведено описание методики оценки влияния азимутальных неоднородностей для боковой и угловой ячеек, использующее аппроксимации на основе рядов Фурье.
- 3. Предложенные подходы позволяют проводить как систематический анализ пределов применимости одномерной теории, так и количественную оценку погрешностей одномерной модели для областей с неоднородным изменением радиальных и азимутальных параметров. В целом, применение двух- или *N*-зонных квазиодномерных приближенных методов моделирования уточняет направления совершенствования одномерных кодов субканального анализа.

Литература

- 1. *Корниенко Ю.Н.* Параметры распределений квазиодномерных моделей двухфазных неравновесных потоков. Обобщение для течений в каналах простой геометрии // Известия вузов. Ядерная энергетика. -2002. № 4. C. 54 65.
- 2. Корниенко Ю.Н. Параметры распределений квазиодномерных моделей двухфазных неравновесных потоков. Обобщение для течений с немонотонным профилем параметров // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2002. № 4. С. 66 78.
- 3. Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Ушаков П.А. и др. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках. М.: Атомиздат, 1975. 405 с.
- 4. Chawla T.C., Ishii M. Equations of Motion for Two-Phase Flow in a Pin Bundle of a Nuclear Reactor// Int. J. Heat and Mass Transfer. 1978. V. 21. P. 1057-1068.
- 5. Khan H.J., Yi H.C. Subchannel Analysis in BWR Fuel Bundles//Ann. Nucl. Energy. 1985. V. 12. № 10. P. 559-572.
- 6. Kornienko Yu.N., Kuzevanov V.S., Sorokin A.P. The technique of calculation of non-equilibrium two-phase flow in pin bundles using quasi-2D approaches and sub-channel aproximation. Proc. Int. Symp. on qas-liquid two-phase flows. ASME, 1990, FED. V.99. P. 321-330.
- 7. Kornienko Y. Subchannel analytical formulation of the closure relationships for single and two phase flow wall friction heat and mass transfer: Proc. of the 4-th Int. Seminar on Subchannel Analysis ISCA-4 (Tokyo, Japan, April 25-26, 1997). P. 175-187.
- 8. Kornienko Y., Ninokata H. Influences of the transversal non-homogeneous parameter distribution on wall friction, heat and mass transfers in single- and two-phase flows in vertical –annular and subchannel geometries: Proc of the 7-th Int. Conf. on Nuclear Engineering (Tokyo, Japan, April 19-23, 1999). Paper-7391, CD-Room, Trac7.
- 9. Meyer L. Measurements of turbulent velocity and temperature in axial flow through a heated rod bundle: Proc. of Conf. NURETH 5, 1992. Vol. V. P. 1434-1441.
- 10. Pfann J. Heat Transfer in Turbulent Longitudinal Flow Through Unbaffled Assemblies of Fuel Rods. Nucl. Engineering & Design, 1973. V. 25. P. 217-247.
- 11. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике. М.: Наука, 1978. 832 с.
- 12. Методические указания и рекомендации по теплогидравлическому расчету активных зон быстрых реакторов. / Жуков А.В., Сорокин А.П., Кириллов П.Л. и др. РТМ 1604.008-88, ГК ИАЭ ФЭИ, 1988. 436 с.

Поступила в редакцию 14.11.2002

УДК 621.039.534

ТЕПЛООБМЕН И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА БРЕСТ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ СО СВИНЦОВЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

<u>Ю.А. Кузина*, А.В. Жуков*, А.П. Сорокин*, А.И. Филин**,</u> В.П. Смирнов**, В.Н. Леонов**, А.Г. Сила-Новицкий**

* ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск

* * НИКИЭТ, г. Москва



Рассматриваются результаты теплогидравлических исследований для опытного демонстрационного реактора на быстрых нейтронах БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым охлаждением. Даются обобщенные рекомендации (формулы, графические зависимости) для расчета чисел Нуссельта и неравномерностей температуры по периметру твэлов этого реактора для ряда случаев, представляющих наибольший практический интерес при теплогидравлическом обосновании активной зоны реактора

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Концептуальные проработки быстрых реакторов, охлаждаемых свинцом, показали перспективность этого направления в плане создания реакторов, обладающих свойствами повышенной безопасности [1, 2]. Учитывая низкий уровень коэффициентов теплоотдачи в свинцовом теплоносителе по сравнению с натрием (реакторы типа БН), а также практически неисследованную квадратную решетку твэлов, используемую в этих реакторах, представляется необходимым проведение исследований влияния на коэффициенты теплоотдачи числа Пекле (Pe), относительного шага твэлов (s/d), дистанционирующих решеток, переменного по длине и радиусу активной зоны энерговыделения и других факторов, характерных для реактора типа БРЕСТ.

ПОСТАНОВКА ИССЛЕДОВАНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Экспериментальные исследования коэффициентов теплоотдачи и температурных полей твэлов применительно к реакторам типа БРЕСТ были проведены на *теплогидравлических моделях* одинаковой конструкции, отличающихся шагом имитаторов твэлов (s/d=1,46; 1,28 и 1,25), а также наличием или отсутствием дистанционирующих решеток. Модели представляют собой сборки 25 имитаторов твэлов, расположенных в квадратной решетке и помещенных в прямоугольную обечайку (рис. 1, а, б). В центральном имитаторе, выполненном поворотным, проводились измерения температуры поверхности по периметру и длине имитатора микротермопарами, зачеканенными на поверхности или выполненными подвижными по длине энерговыделения. Температура теплоносителя измерялась во всех ячейках на выходе из пучка модели, а

[©] Ю.А. Кузина, А.В. Жуков, А.П. Сорокин, А.И. Филин, В.П. Смирнов, В.Н. Леонов, А.Г. Сила-Новицкий, 2002

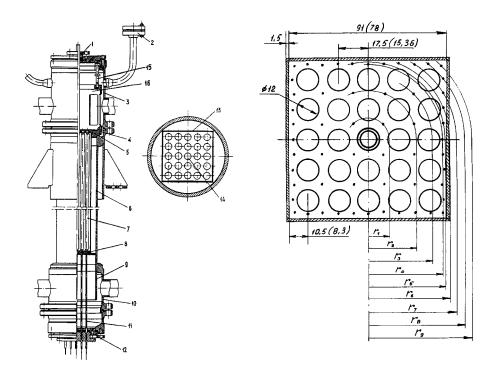


Рис. 1. Общий вид а) и поперечное сечение б) экспериментальной модельной ТВС с однородной решеткой имитаторов твэлов: 1- сальниковое уплотнение; 2- вывод термопар; 3, 10- верхний и нижний коллекторы; 4- термопарная решетка; 5, 8- верхняя и нижняя центрирующие решетки; 6- корпус модели; 7- имитаторы твэлов; 9- направляющий стакан; 11- токоподвод; 12- уплотнение токоподводов; 13- квадратная обечайка (чехол); 14- поворотный (измерительный) имитатор твэла; 15- упорный болт; 16- стакан; 16- радиусы, на которых расположены равноудаленные от центра сборки термопары

также на входе и выходе модели в коллекторах.

В качестве *моделирующего теплоносителя* использовался эвтектический сплав натрия с калием (22% Na + 78% K), имеющий число Прандтля, близкое по своему

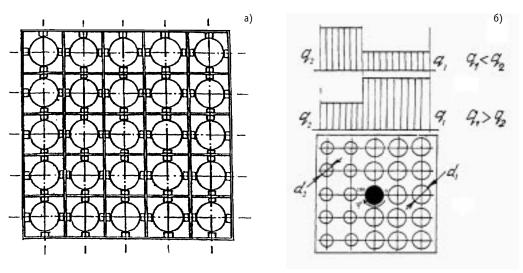


Рис. 2. Дистанционирующая решетка в сборке a); схема поперечного сечения модельной сборки с двумя группами имитаторов твэлов разного диаметра ($d_1 > d_2$) при разных тепловых потоках по группам имитаторов b0)

численному значению к числу Прандтля свинца. Это обусловливало идентичность процессов теплообмена, протекающих на границе раздела «твэл - теплоноситель» в случае «чистоты» рассматриваемых теплоносителей и отсутствия термохимических явлений на поверхности теплообмена.

Тепловое моделирование твэлов реактора БРЕСТ-ОД-300 (делящийся материал - мононитрид урана или плутония, оболочка - нержавеющая сталь, прослойка - свинец) осуществлялось довольно строго (точность - 5%) по четвертой гармонике разложения температурного поля в ряд Фурье ($\kappa_0 = 4$), являющейся основной гармоникой для регулярной квадратной решетки твэлов.

Дистанционирование имитаторов осуществлялось верхней и нижней торцевыми решетками (гладкий вариант имитаторов твэлов) и дополнительно одной или двумя дистанционирующими решетками (рис. 2, a), расположенными от начала энерговыделения на расстоянии $l_p = 372$ и 672 мм соответственно. Обогреваемая длина сборки составляет 960 мм.

ПОЛУЧЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ Однородная модельная сборка

Стабилизированные по длине числа Нуссельта для гладких твэлов описываются формулой [3 - 5]

$$Nu = 7,55 \ s/d - 14(s/d)^{-5} + 0,007 \ Pe^{0,64+0,246 \ s/d}$$
(1)
 $1,20 \le s/d \le 1,50; \ 10 \le Pe \le 2500.$

Для твэлов с одной дистанционирующей решеткой формула для чисел Nu аналогична формуле (1), но имеет другой коэффициент при числе Pe [4-7]:

$$Nu = 7,55 \ s/d - 14(s/d)^{-5} + a \ Pe^{0,64+0,246 \ s/d}, \tag{2}$$

где a=0,01 для степени затеснения проходного сечения ТВС дистанционирующей решеткой ϵ_p = 10% и a = 0,009 для ϵ_p = 20%.

Важным фактором в температурном поле по длине твэлов является отсутствие перегрева стенки имитатора твэла под дистанционирующей решеткой; более того, в районе решетки наблюдается снижение температуры стенки, причем при $\varepsilon_p = 20\%$ происходит более заметное, чем при $\varepsilon_p = 10\%$, понижение температуры стенки имитатора в районе решетки (рис. 3).

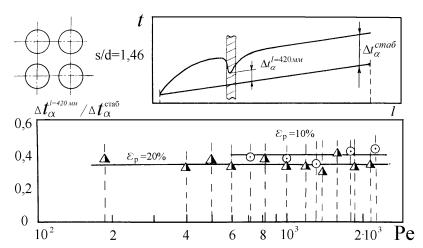


Рис. 3. Сравнение температурных напоров в районе дистанционирующей решетки ($\Delta t_{\alpha}^{[=420\text{ мM})}$) по отношению к стабилизированным значениям температурных напоров ($\Delta t_{\alpha}^{\text{стаб}}$) при различных числах Ре в сборках с дистанционирующими решетками ϵ_{D} = 20 (Δ) и 10% (\odot)

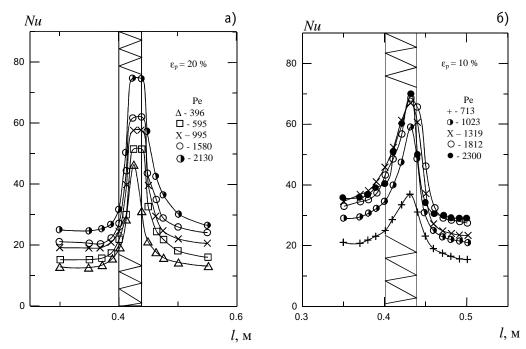


Рис. 4. Локальные значения чисел Нуссельта в районе дистанционирующей решетки с $\varepsilon_{\rm p}=20~a)$ и $\varepsilon_{\rm p}=10~\%~\delta)$

В связи с этим в районе решетки происходит рост коэффициентов теплоотдачи (рис. 4, а, б). При этом распределения локальных чисел Нуссельта в зоне решетки с $\varepsilon_p = 20\%$ (рис. 4, а) более симметричны, чем в случае $\varepsilon_p = 10\%$ (рис. 4, б).

Теплоотрача твэлов с двумя дистанционирующими решетками ($\varepsilon_p = 20\%$) несколько выше (примерно на 15%) теплоотрачи для твэлов с одной дистанционирующей решеткой [8]. Для исследованного диапазона чисел Пекле рекомендуется универсальная критериальная зависимость (2), в которой коэффициент a для рассматриваемого случая составляет 0,0115.

В области малых чисел Пекле происходит предельный переход чисел Нуссельта к значениям, отвечающим ламинарному режиму течения теплоносителя в сборках твэлов без дистанционирующих решеток. Согласно соотношению (2) рост теплоотдачи по мере перехода от чисто гладких твэлов к твэлам с одной, а затем с двумя дистанционирующими решетками происходит, как уже отмечалось, за счет турбулентной составляющей в числе Нуссельта, что отражается значениями коэффициента a для одной (a=0,009) или двух (a=0,0115) дистанционирующих решеток по сравнению с гладкими твэлами (a=0,007). При малых скоростях течения теплоносителя эффект от наличия дистанционирующих решеток (одной или нескольких) в отношении теплоотдачи практически отсутствует.

Неоднородная модельная сборка с одной дистанционирующей решеткой

Основные закономерности в температурных полях измерительного имитатора твэла, расположенного на границе зон с различными диаметрами и мощностями имитаторов (рис. 2, δ) [9, 10], рассмотрим на примере опыта с малым расходом теплоносителя (Re=3030) и большим отношением мощностей по зонам (N_{15} / $N_{10}=2$,0), когда характерные закономерности проявляются наиболее четко.

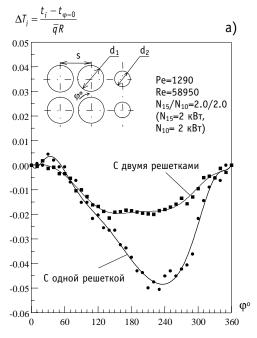
Периодическая неравномерность температуры. На малых расстояниях от начала энерговыделения (до дистанционирующей решетки) подогревы теплоносителя в ячей-

ках вокруг измерительного имитатора отличаются несильно даже при большом различии (в 2 раза) мощностей имитаторов в зонах с s/d_1 =1,25 и s/d_2 =1,46, что создает условия для проявления периодических неравномерностей температуры по периметру имитатора. Безразмерные неравномерности температуры, приведенные к ячейке 0 - 45°, изменяются по косинусоидальному закону и не выявляют какой-либо определенной зависимости от величины скачка энерговыделения. Размерные неравномерности зависят от скачка энерговыделения по зонам, т.к. изменение относительного энерговыделения N_{15}/N_{10} предполагает изменение величины удельного теплового потока на поверхности смежных имитаторов твэлов.

Общая неравномерность температуры. В позиции термопары № 3 (и далее по зоне энерговыделения) проявляется общая неравномерность температуры по периметру, обусловленная разностью подогревов теплоносителя в "пограничных" ячей-ках при отличающихся мощностях имитаторов в зонах.

Общая неравномерность температуры по периметру измерительного имитатора определяется разностью температур в точках периметра ϕ =0 и 180° (максимум – при ϕ =0, минимум – при ϕ =180) (рис. 5, a). И наоборот, если мощность в зоне с s/d_2 =1,46 значительно превышает мощность в зоне с s/d_1 =1,25 (N_{10}/N_{15} =2 — скачок энерговыделения, "обратный" рассматриваемому скачку), то общая неравномерность температуры определяется максимумом при ϕ =180 и минимумом при ϕ =0.

В некоторых режимах работы модельной сборки (особенно при переходном течении теплоносителя от ламинарного к турбулентному) имеет место эффект "смещения" максимума температуры по периметру имитатора в разных сечениях по длине зоны энерговыделения (рис. 5, δ)*): термопара № 8 фиксирует профиль с максимумом при ϕ =00, термопара № 9 — при ϕ =60°; № 10 — при ϕ =120° и т.д. (увеличение



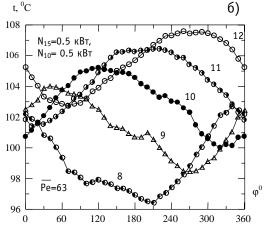


Рис. 5. Сопоставление температурных полей по периметру измерительного имитатора a); изменение температуры стенки измерительного имитатора твэла по его периметру в различных сечениях по длине зоны энерговыделения (термопары № 8-12) при $\overline{\text{Pe}}$ =63 и $\overline{\text{N}}_{15}$ / $\overline{\text{N}}_{10}$ =1,0 $\overline{\text{O}}$: $\overline{\text{R}}$ - внешний радиус оболочки твэла; $\overline{\text{q}}$ - средний по его периметру тепловой поток

^{*)} Используемые на рис. 5, б и далее (рис. 6, 7) числа \overline{Pe} и \overline{Re} рассчитаны по средней скорости \overline{w} по сечению сборки и гидравлическому диаметру регулярной ячейки в зоне $s/d_1=1,25$. Скорость в ячейке $s/d_1=1,25$ практически равна скорости \overline{w}

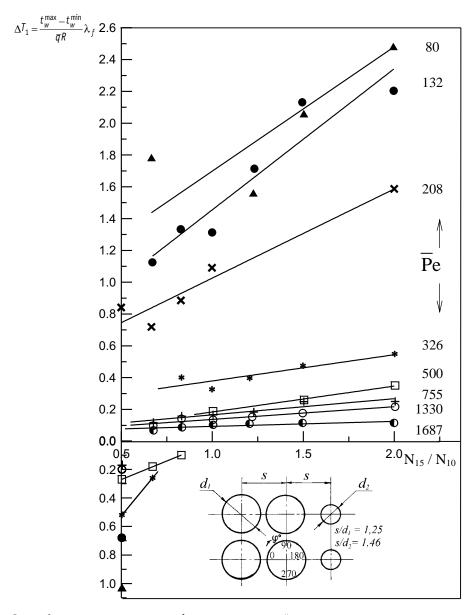


Рис. 6. Зависимости максимальных общих неравномерностей температуры по периметру измерительного имитатора твэла ΔT_1 от скачков энерговыделения N_{15} / N_{10} и чисел Пекле

номера термопары соответствует росту расстояния от начала энерговыделения).

На рис. 6 построены (в безразмерном виде) максимальные общие неравномерности температуры измерительного имитатора твэла в функции величины скачка энерговыделения при фиксированных расходах (числах Pe, Re) теплоносителя (поле температуры показано на рис. 5, a). Как видно, имеют место линейные зависимости (более строгие – при больших расходах теплоносителя), демонстрирующие увеличение неравномерностей с увеличением относительного скачка мощности N_{15}/N_{10} и с уменьшением числа Pe (Re).

При "обратных" скачках мощности, когда происходит перераспределение местоположений максимума и минимума температуры по точкам ϕ =0 и 180 0 , неравномерность температуры условно отложена вниз от нуля по оси ординат. Изменение относительного энерговыделения в смежных зонах имитаторов сборки исследовано в более широком интервале, чем это может быть в активной зоне реактора БРЕСТ-ОД-300; экспериментальные данные для номинальных чисел *Pe* реактора (~2000) воспроизводятся надежной экстраполяцией; конечные рекомендации для реактора базируются на использовании наибольших значений общих неравномерностей температуры по показаниям термопар, расположенных в конце зоны энерговыделения модельной сборки. В активной зоне реактора БРЕСТ-ОД-300 наибольшие неравномерности температуры также будут иметь место в конце зоны энерговыделения, где разность подогревов в смежных ячейках максимальна.

Неоднородная модельная сборка с двумя дистанционирующими решетками

"Взаимодействие" соседних дистанционирующих решеток может снизить температурные неравномерности в ТВС (особенно в неоднородных зонах), повысить теплоотдачу (о чем говорилось выше) и в целом положительно сказаться на температурных режимах твэлов реактора БРЕСТ-ОД-300.

Характерной особенностью температурного поля по периметру имитатора твэла (рис. 5, a) является, как и в опытах с одной дистанционирующей решеткой, наличие максимума температуры стенки имитатора в "затесненной" зоне модельной сборки (s/d=1,25, узкий зазор между имитаторами - $\phi=0^0$) и минимума в "открытой" зоне модельной сборки (s/d=1,34, зазор при $\phi=180^0$) *). Это определяет общую неравномерность температуры по периметру имитатора, обусловленную перегревом теплоносителя в зоне с s/d=1,25 и недогревом в зоне с s/d=1,34.

На рис. 5, *а*) приводятся усредненные температурные поля во второй половине модельной сборки по показаниям нескольких термопар, когда распределения характеризуются меньшим значением неравномерности температуры по сравнению с неравномерностью в конце зоны энерговыделения. Опыты показали, что соотношение между неравномерностями температуры сравниваемых вариантов (сборки с одной и с двумя дистанционирующими решетками) одно и то же для различных сечений сборки (в том числе и для сечения в конце зоны энерговыделения, представляющего наибольший практический интерес). Это соотношение остается таким же и для иллюстрируемых на рис. 5, а) усредненных значений неравномерностей температуры по показаниям нескольких термопар.

Установленная в опытах с одной дистанционирующей решеткой линейная зависимость неравномерности температуры от относительной мощности N_{15}/N_{10} в широком диапазоне изменения N_{15}/N_{10} (0,5 ÷ 2,0) в общем подтверждена и в опытах с двумя дистанционирующими решетками (рис. 7), хотя диапазон изменения относительных мощностей в этих опытах был существенно меньше (0,82 \leq $N_{15}/N_{10} \leq$ 1,20). Это позволяет проводить пересчет полученных закономерностей для относительной мощности $N_{15}/N_{10} =$ 1,0 на другие значения N_{15}/N_{10} .

На рис. 8 показана зависимость безразмерной неравномерности температуры от числа Пекле при использовании как одной (ΔT_1), так и двух (ΔT_2) дистанционирующих решеток. Видно, что неравномерности не очень сильно изменяются в области больших чисел Пекле (Pe>700), но резко возрастают с уменьшением Пекле в области Pe<300÷400 (темп роста ΔT_1 и ΔT_2 примерно одинаков). Неравномерность ΔT_2 составляет ~0,52 ΔT_1 при числе Pe \cong 100 и ~0,42 ΔT_1 при числе Pe \cong 1300. Изменение ΔT_2 / ΔT_1 в зависимости от Pe примерно линейное. Можно приближенно принять ΔT_2 \cong 0,47 ΔT_1 в

^{*)} Промежуточная ячейка между зонами $s/d_1 = 1,25$ и $s/d_2 = 1,46$ рассматривается как условно регулярная ячейка, если ее относительный шаг $s/\overline{d} = 1,34$ рассчитывать по среднему диаметру $\overline{d} = (d_1 + d_2)/2$

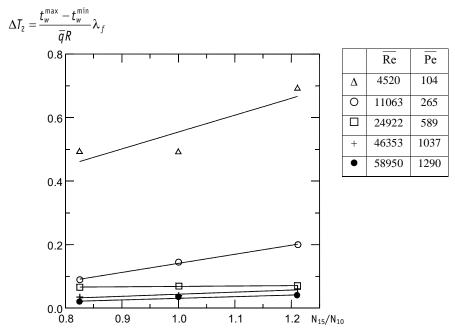


Рис. 7. Зависимости максимальных неравномерностей температуры от скачков энерговыделения, полученные в опытах с двумя дистанционирующими решетками

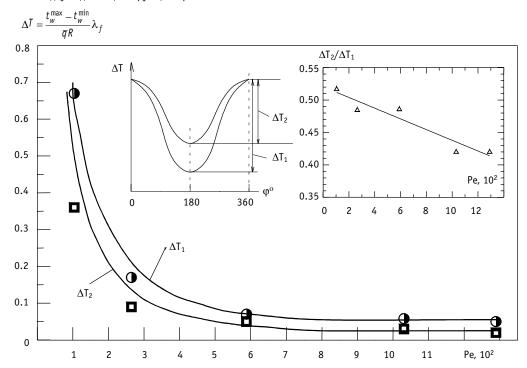


Рис.8. Зависимость безразмерной неравномерностей температуры от числа Пекле при использовании одной (ΔT_1) и двух (ΔT_2) дистанционирующих решеток

исследованном диапазоне изменения чисел Пекле ($100 \le Pe \le 1300$).

При анализе рассматриваемого вопроса применительно к активной зоне реактора БРЕСТ-ОД-300 значения ΔT_1 следует брать из номограммы, представленной на рис.6.

Литература

- 1. *Орлов В.В.* Новый этап ядерной энергетики и быстрые реакторы, охлаждаемые свинцом // Информационный бюллетень № 3 (10). Ядерное общество СССР, 1991. С. 6.
- 2. Адамов Е.О., Орлов В.В. Развитие атомной энергетики на базе новых концепций ядерных реакторов и топливного цикла. // Программа и тезисы докладов конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях», 5 9 октября 1998 г. Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ им. академика А.И.Лейпунского. С.15.
- 3. *Кузина Ю.А., Смирнов В.П., Жуков А.В., Сорокин А.П.* Исследование на модельных ТВС температурных полей и теплоотдачи для быстрого реактора со свинцовым охлаждением //Сб. научных трудов научной сессии МИФИ-2000. М.: МИФИ, 2000. Т. 8. С. 108-110.
- 4. *Ефанов А.Д., Жуков А.В., Кузина Ю.А. и др.* Экспериментальное и расчетное изучение вопросов теплогидравлики активной зоны быстрых реакторов типа БРЕСТ (свинцовое охлаждение)//Сб. тезисов докладов семинара "Математические модели для исследования и обоснования характеристик оборудования и ЯЭУ в целом при их создании и эксплуатации". Сосновый Бор, 2000. С. 117-120.
- 5. *Кузина Ю.А.* Проблемы теплогидравлики реакторов с естественной безопасностью // Труды XIII школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева "Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках", 20 25 мая 2001 г. С.-Петербург. Т.2. С. 469-472.
- 6. *Кузина Ю.А., Жуков А.В., Орехов М.В. и др.* Экспериментальные данные по полям температуры в модельной ТВС реактора типа БРЕСТ (рекомендации, расчетные формулы) // Сб. тезисов докладов отраслевой конференции "Теплофизика-2001" "Теплогидравлические коды для энергетических реакторов (разработка и верификация)", Обнинск, 29-31 мая 2001 г. С. 113-115.
- 7. Жуков А.В., Кузина Ю.А., Сорокин А.П. и др. Экспериментальное изучение на моделях теплообмена в активной зоне реактора БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым охлаждением//Теплоэнергетика. 2002. № 3. С. 2-10.
- 8. *Кузина Ю.А., Сила-Новицкий А.Г.* Модельные эксперименты и расчеты (код ТИГР-БРС) по изучению полей температуры и скорости в активных зонах реакторов с тяжелым теплоносителем //Теплоэнергетика. 2002. № 11.
- 9. *Кузина Ю.А., Жуков А.В., Орехов М.В.* Изучение температурных полей твэлов, расположенных на границе подзон с разными диаметрами и энерговыделениями твэлов (для реакторов типа БРЕСТ)//Сб. тезисов докладов VII Международной конференции "Безопасность АЭС и подготовка кадров", 8 11 октября 2001 г. Обнинск. С. 24-25.
- 10. *Кузина Ю.А., Жуков А.В., Орехов М.В., и др.* Температурные поля твэлов в активной зоне реактора БРЕСТ-ОД-300 (эксперименты на моделях) // Сб. научных трудов научной сессии МИФИ-2002. M., 2002. M. M. M. M. M. M.

Поступила в редакцию 11.11.2002

УДК 621.039.534

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТОЗОНДОВОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ КИПЯЩЕГО ВОДЯНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

В.И. Мельников, А.В. Дунцев, А.Б. Вьюгин

Нижегородский государственный технический университет, г. Н. Новгород



В статье приведены результаты разработки и исследования акустозондовой системы для определения уровня и количества жидкой фазы в контролируемом объеме по данным пространственного распределения пара в кипящей воде. Разработанная система позволяет определять фазовое состояние среды в восьми локальных объемах, размещенных по высоте сосуда, и исследовать дисперсионные характеристики пароводяной смеси. Описываются конструкция прибора, разработанное программное обеспечение, результаты лабораторных и стендовых испытаний системы.

Проблема измерения уровня двухфазного теплоносителя является актуальной во многих практических задачах атомной энергетики. Контроль уровня двухфазного теплоносителя необходим для управления работой парогенераторов АЭС, ядерных установок моноблочного исполнения, кипящих реакторов и при исследованиях тепломассообмена в энергетическом оборудовании, в частности в экспериментах по изучению аварийных процессов.

Попытки решить проблему измерения уровня кипящего теплоносителя при помощи устройств, основанных на различных физических принципах (термометрические, акустические, кондуктометрические и другие), оказались неэффективными ввиду чрезвычайной сложности движения границ раздела фаз в контролируемом объеме и экстремальности условий работы датчика.

Кроме того, существует неопределенность в самой трактовке понятия "уровень двухфазной среды" в сосуде, в частности в литературных источниках различают уровни весовой, объемный, гидродинамический, граница фаз и прочие [1-3], причем различные авторы некоторые из этих определений уровня трактуют по-разному.

Поскольку на практике реально наблюдаются различные переходные двухфазные слои по высоте сосуда с кипящей жидкостью, зависящие от режимов течения теплоносителя, скорости, концентрации фаз, геометрии и других параметров, то, по-видимому, продуктивней формулировать задачу контроля уровня кипящего теплоносителя как проблему измерения распределения концентрации одной из фаз по высоте контролируемого сосуда. При этом задача контроля уровня кипящего теплоносителя сводится к измерению концентраций газовой фазы (паросодержания) в локальных объемах, распределенных по высоте контролируемого сосуда и соответствующим расчетам. Это позволяет получить необходимую информацию о количестве и распределении газовой фазы по высоте контролируемого объема. Затем общее количество жидкой фазы теп-

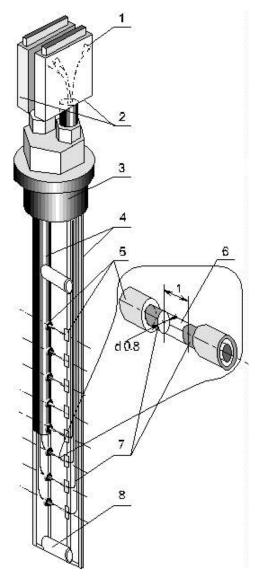


Рис. 1. Датчик акустического уровнемера.
Основные элементы датчика и его геометрические размеры:
1— пьезопреобразователь, 2— блоки предварительных усилителей и выходных каскадов генераторов, 3— узел герметизации датчика, 4— защитные чехлы, 5— герметизирующие гильзы, 6— контролируемые объемы, 7— волноводы, 8— дистанционирующие элементы

лоносителя в сосуде, а также величины уровней (весового, объемного, гидродинамического и т.д.) нетрудно найти при помощи простых вычислений.

Решить задачу измерения распределения паросодержания по высоте сосуда можно с помощью зондов, принцип действия которых основан на индикации газовой и жидкой фаз теплоносителя в локальных контролируемых объемах среды по его электрической, оптической или акустической проводимости [4-7]. При этом, по нашему мнению, наиболее перспективно в жестких условиях, характерных для ЯЭУ, применение акустических зондов, положительно зарекомендовавших себя в практике теплофизических исследований. Данная работа посвящена разработке и исследованию акустозондовой системы измерения уровня кипящего теплоносителя.

Разработанная нами система состоит из акустозондового датчика, электронного блока генерации и обработки сигналов и персонального компьютера.

Датчик содержит восемь пар волноводов, размещенных в двух защитных чехлах, параллельных друг другу. Волноводы образуют восемь контролируемых объемов, расположенных по высоте с шагом 50 мм (рис. 1). В совокупности контролируемые объемы образуют измерительный участок уровнемера высотой 400 мм. При этом, в один из чехлов помещены излучающие волноводы, во второй — приемные.

На верхнем торце каждого волновода установлен электромеханический пьезопреобразователь. Нижние торцы волноводов выведены через боковые отверстия в защитных чехлах, загерметизированы специальными гильзами и попарно формируют контролируемые объемы датчика. Защитные чехлы скреплены дистанционирующими элементами и установлены в герметизирующем фланце.

Волноводы изготовлены из проволоки диаметром 0,8 мм, защитные чехлы — из трубы диаметром 10×1 мм, длиной 1 м. Материал датчика — сталь 12X18H10T. Использовались пьезоэлементы из керамики ЦТС-19 диаметром 2,5мм.

В верхней части датчика размещены восемь предварительных усилителей и восемь выходных каскадов генератора импульсов в защитных экранирующих корпусах. Для подключения датчика к блоку электронной обработки сигналов исполь-

зуется 16-канальный высокочастотный кабель.

Электронный блок выполняет следующую последовательность операций:

- по команде персонального компьютера генерирует зондирующие импульсы заданной длительности и частоты следования для активации пьезоэлементов излучателей;
- усиливает принятые акустические импульсы, прошедшие через контролируемые объемы;
- производит временную селекцию принятых сигналов и определяет их амплитуды;
 - •оцифровывает полученные данные и вводит их в компьютер.

Система работает следующим образом. По командам управляющей программы персонального компьютера блок электронной обработки формирует зондирующие импульсы длительностью 0,7мкс и частотой следования около 800Гц, которые после усиления последовательно подаются на обкладки излучающих пьезоэлементов. Затем по волноводам акустические сигналы поступают в контролируемые объемы, принимаются торцами соответствующих приемных волноводов, достигают приемных пьезоэлементов, усиливаются, оцифровываются и поступают в компьютер.

Для исключения влияния помех при каждом запуске ультразвукового зондирующего сигнала работает только один излучающий канал, и система считывает принятый сигнал только одного принимающего канала.

Далее принятый сигнал сравнивается с заданным уровнем дискриминации. При этом, если амплитуда сигнала превышает уровень дискриминации, то полагается, что в контролируемом объеме в момент прохождения сигнала находилась жидкость, в противоположном случае - пар.

Использовались следующие расчетные формулы.

Локальное объемное паросодержание в i-ом контролируемом объеме

$$a_{j} = \frac{\sum_{i} \tau_{ij}}{T}, \tag{1}$$

где τ_{ij} - время нахождения i-го пузыря в j-ом контролируемом объеме; T - время измерений.

Среднее объемное паросодержание на измерительном участке контролируемого сосуда определяется суммой:

$$\varphi = \frac{1}{8} \Sigma \alpha_j. \tag{2}$$

Объем жидкой фазы теплоносителя в измерительном участке

$$V=SH_0(1-\varphi), \tag{3}$$

где S — сечение измерительного участка контролируемого сосуда; H_0 — высота измерительного участка контролируемого сосуда.

Физический объемный уровень жидкой фазы теплоносителя

$$H=H_0(1-\phi)$$
.

(4)

Основные технические характеристики датчика. Число каналов измерения паросодержания 8. Расстояние по высоте между соседними контролируемыми объемами 50 мм. Высота измерительного участка контролируемого сосуда 400 мм. Описанный диаметр чувствительного элемента датчика 30мм. Максимальная рабочая температура 350°С; давление 25 МПа.

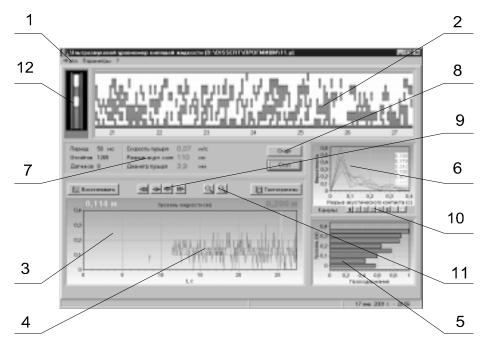


Рис. 2. Окно программы обработки записанных файлов: 1 - строка меню, 2 - записанные данные, 3 - область интерпретации записанных данных в виде графика, 4 - динамика уровня, 5 - гистограмма распределения газосодержания (усреднение за одну секунду), 6 - функции взаимной корреляции для рабочих каналов, 7 - оперативная числовая информация, 8 - кнопки управления пуском программы, 9 - управление прокруткой файла, 10 - управление количеством одновременно изображаемых функций взаимной корреляции (от 1 до 8 графиков), 11 - управление масштабом изображения по временной оси, 12 - мгновенное сечение контролируемого сосуда

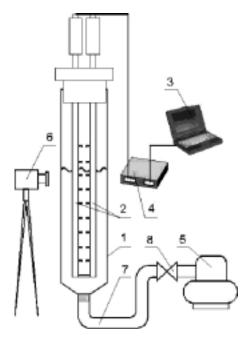


Рис. 3. Схема стенда: 1 — контролируемый сосуд, 2 — датчик, 3 — компьютер, 4 — блок электронной обработки сигналов, 5 — компрессор, 6 — видеокамера, 7 — трубопровод, 8 — арматура

Разработанная программа считывает записанные в файл результаты эксперимента и позволяет визуализировать «историю» эксперимента (рис. 2).

Одновременно с наглядной визуализацией записанные данные используются для построения графика динамики распределения газовой фазы. Параллельно на экран монитора выводятся гистограммы распределения среднего объемного паросодержания (ф) по высоте контролируемого объема путем усреднения данных во времени и графики функций взаимной корреляции сигналов с соседних пар измерительных каналов.

Целью построения графиков функций взаимной корреляции является оценка времени прохождения пузырями дистанции между контролируемыми объемами для определения скорости движения паровой фазы теплоносителя. По времени нахождения пузырей в контролируемом объеме и скорости их движения можно оценивать характерные размеры паровых образований.

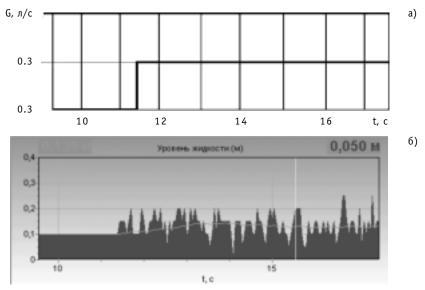


Рис. 4. Результаты испытаний системы на стенде: а) - расход газа, б) - показания системы

Программа предусматривает также возможность наблюдения полученных данных в любой момент времени, прокрутки графика динамики уровня и изменения масштаба графика.

Экспериментальная проверка разработанной системы была проведена в лаборатории акустики физико-технического факультета Нижегородского государственного технического университета и в институте IPM (университет прикладных наук) города Цитау (Германия).

Для экспериментальной проверки системы был изготовлен гидравлический стенд, в котором кипение теплоносителя моделировалось барботажем столба воды воздухом. Стенд представляет собой открытый вертикальный сосуд, изготовленный из прозрачной пластиковой трубы с внутренним диаметром 80 мм и высотой 1 м, в котором предусмотрен барботаж столба жидкости компрессором (рис.3).

Результаты измерений мгновенных значений динамики уровня воды в контролируемом сосуде при барботаже атмосферным воздухом при постоянном расходе газовой фазы представлены на рис.4. На этом же графике показано изменение среднего значения объемного уровня воды во времени при выборе времени усреднения одна секунда (плавная кривая). Данные тестирования системы свидетельствуют, что колебания уровня воды, фиксируемого системой, не выходят за пределы, определяемые шагом чувствительных элементов по высоте, т.е. 50 мм.

Импульсный впрыск газа позволяет имитировать снарядный режим течения теплоносителя в вертикальном участке трубопровода. Реализация в этом случае име-

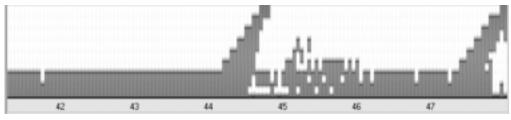


Рис. 5. Показания измерительной системы при снарядном режиме течения двухфазного теплоносителя

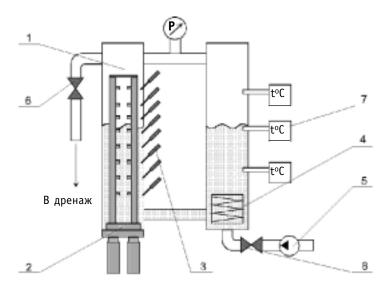


Рис. 6. Схема стенда IPM: 1 - контролируемый сосуд, 2 - акустозондовый датчик, 3 - датчики электроконтактного уровнемера, 4 - электронагреватель, 5 - насос, 6 - дренажный клапан, 7 - термопары, 8 - арматура

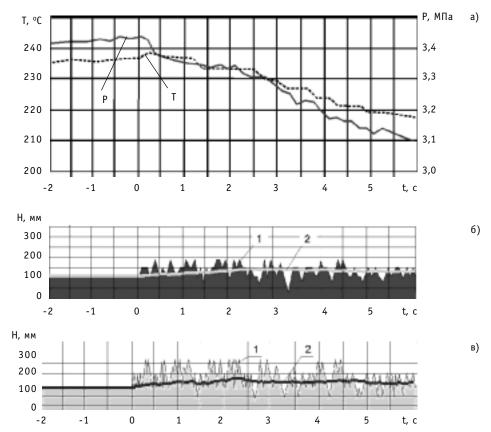


Рис. 7. Показания уровнемеров в кипящем теплоносителе: 1 - мгновенные значения, 2 - усредненные за

¹ секунда; а) - изменение температуры и давления, б) - показания электроконтактного уровнемера,

ет характерный вид, показанный на рис. 5. Таким образом, система дает возможность контролировать процессы образования и движения больших одиночных паровых пузырей (газовых пробок). Можно также наблюдать эффект «вспухания» уровня теплоносителя в момент впрыска газа.

Изучение разработанной системы в условиях кипения водяного теплоносителя высоких параметров были проведены на теплофизическом стенде в институте IPM Цитау (Германия).

Для сравнительных испытаний разработанного ультразвукового датчика в экспериментальный стенд были вмонтированы датчики электрического уровнемера, принцип действия которого основан на измерении электрической проводимости контролируемой среды (рис. 6).

После проверки работоспособности всех измерительных систем на холодном стенде была проведена серия экспериментов, где процесс кипения возникал вследствие уменьшения давления при разгерметизации контролируемого сосуда.

Перед началом эксперимента теплоноситель в стенде разогревался до температуры $T \approx 236$ °C при давлении около $P \approx 3,5$ MPa. Затем в заданный момент времени t_0 открывался автоматический клапан сброса давления, что приводило к объемному вскипанию теплоносителя в контролируемом сосуде.

Характерные результаты измерений приведены на рис. 7. Можно отметить, что вскипание теплоносителя не приводит к изменению регистрируемого системой уровня более, чем на 50 мм. При этом значения уровня воды, измеренные электрическим уровнемером, на 3-5% превышают показания акустозондового измерителя. Это объясняется тем, что акустозондовый измеритель не реагирует на пузырьки пара, проплывающие мимо его контролируемых объемов, а электрический уровнемер их регистрирует.

выводы

- 1. Предложена система определения уровня кипящего теплоносителя, основанная на измерении распределения паровой фазы по высоте акустическими зондами.
- 2. Разработана методика, позволяющая в режиме реального времени осуществлять оперативный контроль за количеством теплоносителя в реакторных установках с естественной циркуляцией и моноблочного исполнения на всех режимах их работы.
- 3. Разработанный прибор может быть использован в экспериментах по изучению развития аварийных процессов в теплофизическом оборудовании, при отработке элементов энергетического оборудования, в процессе технологических испытаний.

Литература

- 1. Стырикович М.А., Резников М.И. Методы экспериментального изучения процессов генерации пара. М.: Энергия, 1977.
- 2. *Куталадзе С.С.* Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990.
- 3. Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. М.: Высшая школа, 1977.
- 4. *Мельников В.И., Усынин Г.Б.* Акустические методы диагностики двухфазных теплоносителей ЯЭУ. М.: Энергоатомиздат, 1987.
- 5. Бабиков О.И. Контроль уровня с помощью ультразвука. М.: Энергия, 1978.
- 6. *Лабутин С.А., Мельников В.И*. Ультразвуковые волноводные измерители параметров однофазных и двухфазных сред и потоков//Датчики и системы. 2001. №2. С. 54-62.
- 7. *Prasser H.-M., Bottger A., Zschau J.* A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows // Flow Measurement and Instrumentation. 1998.- № 9. P. 111-119.

Поступила в редакцию 15.07.2002

Каекин Валентин Сергеевич

16 ноября 2002 года на 66 году жизни скончался Валентин Сергеевич Каекин, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, лауреат премии Президента Российской Федерации в области образования.

Вся трудовая деятельность В.С. Каекина связана с Ивановским государственным энергетическим университетом, куда он пришел еще студентом в 1955 году. Здесь он прошел путь от ассистента до профессора, заведующего кафедрой атомных электрических станций, которую он бессменно возглавлял с 1985 г. до последних дней жизни.

Имя В.С. Каекина хорошо известно не только ученым и специалистам в области тепловой и атомной энергетики России, но и на Кубе, где он проработал несколько лет в Гаванском политехническом институте преподавателем-консультантом.



Являясь блестящим организатором и новатором, лидером по натуре, В.С. Каекин много сделал для совершенствования и развития образовательного процесса в вузе, смело внедряя новые формы обучения студентов, передавая свой богатый педагогический опыт коллегам по работе.

Много сил и энергии он отдавал разработке и внедрению современных компьютерных обучающих технологий в высшей школе, в атомной и тепловой энергетике. Эти разработки, выполненные под его руководством и при его непосредственном участии, внедрены на ряде тепловых и атомных электростанций России и предприятиях Минатома РФ.

Заслуги В.С. Каекина в области подготовки специалистов для тепловой и атомной энергетики неоднократно были отмечены почетными званиями и знаками отличия Минобразования, Минэнерго и Минатома России, концерна «Росэнергоатом».

Являясь в течение ряда лет членом УМК Минобразования РФ по специальности 101000 «Атомные электростанции и установки», В.С. Каекин много делал для развития научно-методической базы подготовки специалистов атомной энергетики и укрепления долговременных связей и сотрудничества между выпускающими кафедрами вузов России.

Благодаря широкому кругозору, эрудиции, авторитету и энергии В.С. Каекину удалось за короткий срок превратить созданную им кафедру атомных электрических станций ИГЭУ в одну из ведущих кафедр в системе подготовки кадров для отрасли, занимающую ныне лидирующее положение в разработке компьютерных обучающих систем и тренажеров.

B.C. Каекин много времени отдавал работе в редколлегии журнала «Ядерная энергетика», членом которой он являлся в течение многих лет.

Добрая память о Валентине Сергеевиче Каекине сохранится на многие годы не только у его бывших учеников, коллег и товарищей по работе, но и у всех тех, кто имел удовольствие общаться с этим замечательным человеком.

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.311.25:621.039

Possibility of joint use of neural networks and best-estimate codes in system of operators support\Yu.B.Vorobyov, V.D. Kuznetsov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 9 pages, 3 illustrations, 2 tables. - References, 4 titles.

The technique for support of the NPP's operator with use of technologies on the basis of thermal-hydraulic best estimate codes, systems of uncertainty analysis and technologies of an artificial intellect on a base of neural networks is offered. It is shown that it is possible with good reliability to identify character of possible accidents at the initial stage of their occurrence. Thus, the practical opportunity of the recognition such failures on NPP may be realized and the system for support of the operator with use of the offered approach can be created.

УДК 621.039:519.7

The Problem of Multicriteria Optimization for NPP Lifetime \ 0.M. Gulina, A.A. Zhiganshin, T.P. Korniets; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 4 pages, 1 illustration. - References, 5 titles.

The problem of NPP unit lifetime optimization is formulated as multicriteria one. There is presented the form of economical criterion under degradation processes in the base equipment. The method of NPP lifetime estimation for the model with interval parameters is supposed.

УДК 621.039.52

Possibility of Safety Ensuring of the Fast Reactor, Cooled by Na-K Alloy \ V.S. Okunev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 9 pages, 2 tables. - References, 5 titles.

The possibilities of safety ensuring of the fast reactors, cooled by Na-K alloy are researched. The results of optimisation of the safety characteristics of core with discount self-protected to severe anticipated transients wuthout scram are presented.

УДК 502.3

The Priorities and Some Findings of Research on Environmentally Occurring "Hot" Radioactive Particles. The General Characterization of "Hot" Radioactive Particles Applicability for Technical Purposes \ I.Ya. Gaziev, Ya. I. Gaziev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 7 pages, 4 illustrations, 2 tables. - References, 8 titles.

The data have been compiled on "hot" radioactive particles (HRPs) in the environment with their individual beta activities of about 1 Bq/particle or higher and on the environmental contamination patterns with these particles. Two priorities in research of environmental contamination with such radioactive particles have been outlined. The first is the data acquisition on the main physical characteristics of HRPs in natural media to specify the principal features of environmental contamination with these particles. The second is the data availability on radiation exposure of the biosphere, including humans, to such particles. Some essential findings from the two approaches are considered in the paper. The possibilities of laboratory produced HRPs have been shown for their uses in organizing and performing radioecological monitoring in the atmosphere - underlying surface - biota (with humans included) system.

УДК 621.039.51

Determination of Absolute Intensity of Extensive Sources by A Coincidence Method \V.V. Doulin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 6 pages, 3 illustrations, 1 table. - References, 5 titles.

Determination of absolute intensity of a point source by a coincidence method is used for a long time. Sometimes there is a need to determine the absolute intensity of an extensive source. Measurements and analysis results on its determination are presented in this work. A need of spatial Diven factor accounting for obtaining of a more accurate value of absolute intensity is demonstrated. A calculation of neutron flux $\phi(x)$ distribution from the source and adjoint flux $\phi^*(x)$ (importance) in relation to detector counts for the Diven factor obtaining has to be done.

УДК 621.039.58

Application of Main Components Method for High and Low Pressure Pumps Diagnostic Based on Testing Data Analysis \ S.T. Leskin, V.V. Valui; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 8 pages, 8 illustrations, 1 table. - References, 7 titles.

The application of main components method for diagnostic of the VVER high and low pressure pumps is discussed. On the basis of selected statistical model with use of entropy the complex of informative attributes describing dynamics of pumps behavior is received. The results of data processing of the forth block of the Balakovo NPP are presented. Pumps statement anomalies and caused their occurrence parameters are allocated.

УДК 621.039.526:621.039.546.8

Verification of Hydraulic Characteristics of Experimental Facility "Circulating Loop" \E.F. Avdeev, I.A. Chusov, V.I. Belozerov, V.V. Maksimovskiy, A.Ia. Ustujanin, S.P. Pashkov, A.V. Shuvalov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 8 pages, 7 illustrations, 4 tables. - References, 8 titles. Description of the experimental facility "Circulating Loop" of the thermal physics department is given. The developed system of dynamic control of thermal hidraulic modes necessary during experimental works is described. The results of an experimental research of some characteristics of the stand, in comparison with the experimental data of other authors and standard calculating dependences are given.

УДК 621.039.534

Distribution Parameters for the Quasi-One-Dimensional Two-Phase Non-Equilibrium Flow Models. Generalization for Simple-Form Channel Flows \ Yu.N. Kornienko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 12 pages, 7 illustrations, 2 tables. - References, 17 titles.

The article is devoted to construction of the generalized hierarchically closed analytical relationships (using drift flux model of two-phase non-equilibrium flow) for distribution parameters \mathcal{C}_{ks} in quasi-one-dimensional form of the continuity, energy and momentum equations. A main assumption is power approximations of the local phase profiles for derivation of the quadratures of distribution parameters and their assessment. The complementarity and mirror symmetry properties are revealed for parameter distributions, which are useful for verification purposes of the closure relationships for \mathcal{C}_{ks} .

УДК 621.039.534

Distribution Parameters for the Quasi-One-Dimensional Two-Phase Non-Equilibrium Flow Models. Generalization For Non-Monotone Parameter Profiles \ Yu.N. Kornienko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineer-

ing). - Obninsk, 2002. - 13 pages, 3 illustrations, 2 tables. - References, 12 titles.

The generalized hierarchically closed analytical relationships are derived for distribution parameters C_{ks} of the quasi-one-dimensional (drift flux model) form of continuity, energy and momentum equations for two-phase non-equilibrium flow with non-uniform profiles. The main assumptions are superposition method and power approximations of the local phase profiles for derivation of the quadratures of distribution parameters and for their assessment. The complementarity and mirror symmetry properties are presented for parameter distributions for flows with non-uniform parameter profiles.

УДК 621.039.534

Distribution Parameters for the Quasi-One-Dimensional Two-Phase Non-Equilibrium Flow Models. Generalization for Annular Channel and Rod Bundle Flows\Yu.N. Kornienko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 12 pages, 5 illustrations. - References, 12 titles.

The derived in the previous articles [1,2] relationships for two-phase non-equilibrium flow distribution parameters C_{ks} are generalized for an annulus and pin bundle geometry. The main assumptions are superposition method and power approximations of the local phase profiles for derivation of the quadratures of distribution parameters and for their assessment. There are derived the limiting analytical forms for C_{ks} relationships for symmetrical subchannel in the tight packet pin bundle and also with taking into account the azimuthal profiles of the variables.

УДК 621.039.534

Heat Transfer and Temperature Fields in the Core of Fast BREST Reactor with Lead Cooling \ J.A. Kuzina, A.V. Zhukov, A.P. Sorokin, A.I. Filin, V.P. Smirnov, V.N. Leonov, A.G. Sila-Novitsky; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 9 pages, 8 illustrations. - References, 10 titles.

The results of thermohydraulic research for the experimental demonstration lead-cooled fast reactor BREST-OD-300 are considered.

УДК 621.039.534

Investigation of the Acoustic Probe System for Analysis of a Level of Boiling Water Coolant \V.I. Melnikov, A.V. Dunzev, A.B. Vjugin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 7 pages, 7 illustrations. - References, 7 titles.

The developed acoustic probe system for analysis of a level and amount of liquid phase on the data of a vapor space distribution in control boiling water volume has been investigated. The acoustic probe system allows to determine the state of phase into 8 local volume by probes placed along the height of vessel, and to study dispersing properties of the vapor-liquid water mixture.

The construction of the acoustic device, computer program, laboratory and testing unit experiments are described.

наши авторы

- **Е.Ф. Авдеев** к.т.н., доцент, заведующий кафедрой теплофизики Обнинского государственного университета атомной энергетики (ОИАТЭ). Область научных интересов гидродинамические и тепловые процессы в контурах ЯЭУ: турбулентное смешение теплоносителя, гидродинамика струйных мишеней.
- **В.В. Валуй** аспирант кафедры «Оборудования и эксплуатации ЯЭУ» ОИАТЭ. Область научных интересов: разработка методов анализа состояния оборудования АЭС по данным испытаний.
- **Ю.Б. Воробьев** к.т.н., доцент кафедры атомных электрических станций (АЭС) Московского энергетического института (технического университета) (МЭИ (ТУ)).
- **А.Б. Вьюгин** соискатель кафедры «Ядерные реакторы и энергетические установки» Нижегородского государственного технического университета.
- **А.В. Дунцев** к.т.н., доцент кафедры «Ядерные реакторы и энергетические установки» Нижегородского государственного технического университета.
- **И.Я. Газиев** аспирант ОИАТЭ. Область научных интересов: радиоактивное загрязнение окружающей среды, компьютерные технологии в экологии.
- **Я.И. Газиев** к.ф.-м.н., зав. лабораторией отдела ядерной геофизики НПО "Тайфун" Росгидромета. Область научных интересов: физика техногенных атмосферных аэрозолей, пути миграции радионуклидов в окружающей среде. **О.М. Гулина** к.т.н., доцент кафедры АСУ ОИАТЭ закончила в 1978 г. Обнинский филиал МИФИ.

- Область научных интересов: прогнозирование ресурсных характеристик оборудования АЭС.
- **Ю.Н. Корниенко** к.т.н. (Engineering), ведущий научный сотрудник отдела математики и программных средств ГНЦ РФ ФЭИ. Закончил Московский энергетический институт в 1971г. Область научных интересов: анализ неравновесных двухфазных потоков, в том числе при аварийных процессах.
- **В.Д. Кузнецов** к.т.н., заведующий кафедрой АЭС МЭИ (ТУ)
- **С.Т. Лескин** д.т.н., зав. кафедрой «Оборудование и эксплуатация ЯЭУ» ОИАТЭ. Область научных интересов: анализ безопасности эксплуатации АЭС, разработка методов анализа состояния оборудования АЭС по данным оперативного технологического контроля и испытаний.
- **В.В. Максимовский** ведущий инженер кафедры теплофизики ОИАТЭ.
- **В.И. Мельников** д.т.н., профессор кафедры «Ядерные реакторы и энергетические установки» Нижегородского государственного технического университета.
- **В.С. Окунев** к.т.н., доцент кафедры «Ядерные реакторы и установки» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.
- **С.П. Пашков** аспирант кафедры теплофизики ОИАТЭ.
- **А.Я. Устюжанин** ведущий инженер кафедры теплофизики ОИАТЭ.
- **И.А. Чусов** к.т.н., доцент кафедры теплофизики ОИАТЭ.

OUR AUTHORS

- **E.F. Avdeev** Cand.Sci. (Engineering), Associate professor, head of the thermal physics department of the Obninsk Institute of Nuclear Power Engineering (OINPE). Scientific interests hydrodynamics and thermal processes in outlines of NPP: turbulent mixing of coolant, hydrodynamics of jet targets.
- **I.A. Chusov** Cand. Sci. (Engineering), Associate professor of the thermal physics department of the OINPE.
- **A.V. Duntsev** Cand. Sci. (Engineering), Associate professor of the nuclear reactors and power installations department of the Nizhny Novgorod State Technical University.
- **I.Ya. Gaziev** post-graduate student of the Obninsk State Technical University of Nuclear Power Engineering. Scientific interest: radioactive contamination of the environment, computer technologies in radioecology.
- **Ya.I. Gaziev** Cand.Sci. (Phys.-Math.), chief of laboratory in the department of nuclear geophysics, SPA "Typhoon". Scientific interest: physics of technogenic atmospheric aerosols, paths of radionuclides in the environment.
- **O.M. Gulina** Cand. Sci. (Engineering), Associate professor of the automated control systems department of the OINPE. Scientific interests:estimation of NPPs equipment lifetime. **Yu.N. Kornienko** Cand. Sci. (Engineering), leading researcher of the department of mathematics and software of the SSC RF IPPE. Graduated from the Moscow Power Institute in 1971. Scientific interests: nonequilibrium two-phase flow analysis including accident processes.
- **V.D. Kuznetsov** Cand. Sci. (Engineering), head

- of Nuclear Power Plants department of the Moscow Power Engineering Institute (Technical Institute).
- **S.T. Leskin** Dr. Sci. (Engineering), head of the "Equipment and operation of NPP" department at the INPE. Scientific interests: safety analysis of NPP operation, elaboration of the NPP equipment condition analysis methods using operation technological control and testing data.
- **V.V. Maksimovskiy** leading engineer of the thermal physics department of the OINPE.
- **V.I. Melnikov** Dr. Sci. (Engineering), Professor of the nuclear reactors and power installations department of the Nizhny Novgorod State Technical University.
- **V.S. Okunev** Cand. Sci. (Engineering), associate professor of the Bauman Moscow State Technical University (Department of Nuclear Reactors and Plants).
- **S.P. Pashkov** post-graduated student of the thermal physics department of the OINPE.
- **A.Ja. Ustujanin** leading engineer of the thermal physics department of the OIPE.
- **V.V. Valui** post-graduate student of the "Equipment and operation of NPP" department at the INPE. Scientific interests: elaboration of the NPP equipment condition analysis methods using testing data.
- **A.B. Vjugin** competitor of the nuclear reactors and power installations department of the Nizhny Novgorod State Technical University.
- **Yu.B.Vorobyov** Cand. Sci. (Engineering), associate professor of Nuclear Power Plants department of the Moscow Power Engineering Institute (Technical Institute).

ПЕРЕЧЕНЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2002 г.

І. ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

ьезопасность, надежность и диагностика язу	
И.Б. Кузьмина, Н.Л. Сальников	
Систематизация задач вероятностного анализа безопасности пожаров АС	1
А.Н. Анохин, Е.Н. Алонцева	
Анализ влияния компоновки приборов на БЩУ АЭС на эффективность восприятия	
информации	2
О.Ю. Кочнов, Ю.В. Волков	
Анализ данных по срабатываниям АЗ реактора ВВР-ц	2
М.В. Кащеев	
Моделирование стратификации компонент кориума при тяжелой аварии	3
Ю.Б. Воробьев, В.Д. Кузнецов	
Возможность совместного использования нейронных сетей и интегральных кодов	
в системе поддержки операторов	4
О.М. Гулина, А.А. Жиганшин, Т.П. Корниец	
Многокритериальная задача оптимизации срока службы энергоблока АС	4
Окунев В.С.	
Возможность обеспечения безопасности быстрого реактора при охлаждении активной	
зоны сплавом натрий-калий	4
СНЯТИЕ АЭС С ЭКСПЛУАТАЦИИ	
СПЯТИЕ АЭС С ЭКСПЛІЗАТАЦИИ	
С.А. Немытов, В.К. Зимин	
Вывод энергоблоков АЭС из эксплуатации: концепция; состояние с выполнением работ	2
ФИЗИКА И ТЕХНИКА РЕАКТОРОВ	
В.В.Дулин, И.П. Матвеенко	
Определение глубоко подкритических состояний размножающих сред методом	
росси-альфа	1
Г.Г. Куликов, А.Н. Шмелев, Э.Ф. Крючков, Г.В. Тихомиров, М.Ю. Терновых, В.А. Апсэ, М.Саито,	
В.В. Артисюк	
Физические характеристики легководного ядерного реактора со сверхдлинной	
кампанией ториевого топлива	1
Окунев В.С.	
Анализ применимости галлия и его сплавов для охлаждения реакторов на быстрых	
нейтронах	1
В.А. Дулин	
Об определении эффективного коэффициента размножения нейтронов методами	
импульсного статистического источника	2
В.М. Троянов, Ю.И. Лихачев, В.И. Фоломеев	
Общая постановка исследований термомеханического поведения активной зоны ВВЭР-1000.	2

P.M. T
В.М.Троянов, Ю.И.Лихачев, В.И.Фоломеев
Метод расчета продольно-поперечного изгиба бесчехловой ТВС ВВЭР-1000
при эксплуатационных нагрузках2
А.В. Гулевич, А.В. Зродников, Е.А. Иванов, О.Ф. Кухарчук, Д.В. Евтодиев
Применение ядерных фотонных ракет для исследования дальнего космоса
Моделирование термомеханического поведения ТВС в составе активной зоны ВВЭР-10003 В.М. Троянов, Ю.И. Лихачев, В.И. Фоломеев
Расчетное моделирование термомеханического поведения активной зоны ВВЭР-1000
в авариях с потерей теплоносителя
В.М. Троянов, Ю.И. Лихачев, В.И. Фоломеев
Метод расчета сейсмического воздействия на активную зону ВВЭР-1000
Н.М. Каджури
Анализ аварии разгона быстрого реактора в приближении «мгновенного скачка»
В.В. Дулин
К вопросу об определении абсолютной интенсивности протяженных источников
методом совпадений4
С.Т. Лескин, В.В. Валуй
Применение метода главных компонент для диагностики насосов высокого и низкого
давления по результатам испытаний в процессе эксплуатации АЭС с ВВЭР4
ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ
Р.А. Паркин, М.Ф. Каневский, Е.А. Савельева, И.А. Пичугина, Б.И. Яцало
Ougura appropriate Tonnutonius Englishoù officetti na fivollishen 90°Cr
Оценка загрязнения территории Брянской области радионуклидами 90Sr
с использованием нейронных сетей2
с использованием нейронных сетей

ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕПЛОГИДРАВЛИКА

Г.Н. Власичев, Г.Б. Усынин	
Численное моделирование расплавления твэла с учетом перемещения расплавленной	
оболочки в активной зоне реактора БН при запроектной аварии	2
В.Т. Буглаев, А.А. Анисин	
Влияние геометрических параметров сфероидальных элементов рельефа и схемы	
их расположения на тепловую эффективность пластинчатой поверхности теплообмена	3
А.В. Безносов, С.С. Пинаев, М.А. Камнев, А.В.Назаров, П.В. Романов	
Уменьшение МГД-сопротивления путем формирования электроизолирующих покрытий	
в контурах с жидкими металлами применительно к реактору ТОКАМАК	3
Е.Ф. Авдеев, И.А. Чусов, В.И. Белозеров, В.В. Максимовский, А.Я. Устюжанин, С.П. Пашков,	•
А.В. Шувалов	
Верификация гидравлических характеристик стенда «Циркуляционная петля»	ł
Ю.Н. Корниенко	
Параметры распределений квазиодномерных моделей двухфазных неравновесных	
потоков. Обобщение для течений в каналах простой геометрии	ŀ
Ю.Н. Корниенко	
Параметры распределений квазиодномерных моделей двухфазных неравновесных	
потоков. Обобщение для течений с немонотонным профилем параметров4	í
Ю.Н. Корниенко	
Параметры распределений квазиодномерных моделей двухфазных неравновесных	
потоков. Обобщение для течений в кольцевых каналах и ТВС	í
Ю.А. Кузина, А.В. Жуков, А.П. Сорокин, А.И. Филин, В.П. Смирнов, В.Н.Леонов,	
А.Г. Сила-Новицкий	
Теплообмен и температурные поля в активной зоне реактора БРЕСТ на быстрых	
нейтронах со свинцовым охлаждением4	í
В.И. Мельников, А.В. Дунцев, А.Б. Вьюгин	
Исследование акустозондовой системы определения уровня кипящего водяного	
теплоносителя4	í
ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ И РАО	
С.Г. Олейник, В.А. Болтенков	
Имитационное моделирование системы определения глубины выгорания облученного	
ядерного топлива	Ĺ
Ю.В. Волков, О.Б. Дугинов	
Марковская цепь с доходами для выбора наиболее значимых осколков деления.	
Общая модель	2
С.С. Кречетов, В.С. Внуков	
Нормативные параметры ядерной безопасности при обращении с отходами,	
содержащими плутоний и низкообогащенный уран2)
Т.О. Мишевец, Н.Г. Богданович, О.В. Старков, Э.Е. Коновалов, Д.Л. Тютюнников,	
В.П. Емельянов, В.В. Молчанов	
Экспериментальное исследование возможности обезвреживания концентрированных	
жидких радиоактивных отходов от ¹³⁷ Cs сорбционным методом с последующей	
иммобилизацией сорбента в геоцементный камень)
0.Г. Герасимчук, В.И. Орлов, В.Ф. Украинцев	
Анализ характеристик топливных циклов повышенной длительности реакторов ВВЭР	3

Моделирование переходного излучения для периодических и пространственно

CONTENTS of ISSUES of «YADERNAYA ENERGETICA» in 2002

SAFETY, RELIABILITY AND DIAGNOSTICS NPP

1.B. Kuzmina, N.L. Salnikov	
Systematization of Probabilistic Analysis of NPP Fire Safety Problems	1
A.N. Anokhin, E.N. Alontseva	
Analysis of Influence of Layout of NPP Control Room Displays on Efficiency of Information Perception	<u> </u>
·	<u>-</u>
O.Y. Kochnov, Y.V. Volkov	
Date Accidents Analysis of WWR-c Reactor	
M.V. Kachtcheev	
Modeling of Corium Components Stratification at Severe Accident	3
Yu.B.Vorobyov, V.D. Kuznetsov	
Possibility of Joint Use of Neural Networks and Best-Estimate Codes in System of Operators	,
Support	+
O.M. Gulina, A.A. Zhiganshin, T.P. Korniets	,
The Problem of Multicriteria Optimization for NPP Lifetime	+
V.S. Okunev	,
Possibility of Safety Ensuring of the Fast Reactor Cooled by Na-K Alloy	+
DECOMMISSIONING OF NPP	
S.A. Nemytov, V.K. Zimin	
Decommissioning of NPP Units: Conseption; State of Execution	2
REACTOR PHYSICS AND TECHNOLOGY	
V.V. Doulin, I.P. Matveenko	
Determination Low Multiplying Subcritical States by Rossi- $lpha$ Technique $lpha$	1
G.G.Koulikov, A.N.Shmelev, E.F.Kryuchkov, G.V.Tikhomirov, M.Yu.Ternovykh, V.A. Apse, M. Saito,	_
V.V.Artisyuk	
Physical Characteristics of the Light-Water Reactor with Ultra-Long Life	
of Thorium-Based Fuel	1
V.S. Okunev	
Analysis of Applicability of the Gallium and its Alloys for Cooling of LMFR 1	
V.A. Doulin	
On the Problem of the Effective Multiplication Factor Determination Using Statistical	
Pulse Methods	2
V.M. Troyanov, Y.U.Likhachev, V.I. Folomeev	
General Study Statement on Thermomechanical Behaviour of the WWER-1000 Reactor Core	2
V.M. Troyanov, Y.U. Likhachev, V.I. Folomeev	
Calculation Method on the Longitudinal and Transversal Bowing of WWER-1000 Core	
Subassemblies under Operation	2
A.V. Gulevich, A.V. Zrodnikov, Eu.A. Ivanov, O.F. Kukharchuk, D.V. Evtodiev	
Application of Nuclear Photon Engines for Deep- space Exploration	2

V.M. Troyanov, Y.U.Likhachev, V.I. Folomeev
Simulation of Thermomechanical Behaviour of Fuel Assemblies in the WWER-1000
Reactor Core3
V.M. Troyanov, Y.U.Likhachev, V.I. Folomeev
Computational Simulation of Thermomechanical B ehaviour of the WWER-1000 Reactor C ore
under Loss- of-Coolant Accidents
V.M. Troyanov, Y.U.Likhachev, V.I. Folomeev
The Procedure for Calculating Seismic Impact on the WWER-1000 Reactor Core
N.M. Kadjuri
Analysis of Failure of a Fast Reactor Runaway in Approach of Zero Lifetime of Prompt
Neutrons
V.V. Doulin
Determination of Absolute Intensity of Extensive Sources by Coincidence Method4
S.T. Leskin, V.V. Valui
Application of Main Components Method for High and Low Pressure Pumps Diagnostic
Based on Testing Data Analysis4
ENVIROMENTAL ASPECTS OF POWER ENGINEERING
R. Parkin, M. Kanevsky, E. Saveleva, I. Pichugina, B. Yatsalo
Implementation of Neural Networks for Assessment of Surface Density Contamination
with ⁹⁰ Sr (For Territory of Bryansk Region as an Example)2
E.S. Fesenko, B.I. Synzynys
Ecological Risk. 1. The Origin of Risk in Agrosphere and Natural Ecosystems under Pollution
of the Environment2
M.N. Katkova, Ya.I. Gaziev , G.I. Petrenko, A.M. Polukhina
⁹⁰ Sr Contamination of Water Ecosystems in Bryansk Regions Damaged after Chernobyl
Accident3
S.M. Rudaya, O.V. Chistik, I.I. Matveenko
Distribution of ¹³⁷ Cs on ""Grain-Size" Fractions in Soils at the 30 km Restricted Zone around
Chernobyl NPP
G.I. Sidorov, V.M. Poplavsky, A.A. Kritchko, A.S. Maloletnev
Ecological Aspects of Mass Production of Motor Fuels from Brown Coals and Heavy Petroleum
Residuals by Hydrogenation with the Use of Nuclear Technologies
E.S. Fesenko, B.I. Synzynys Toological viels accompany 2. Setimation of Figure 2. Political of Rich in Agreembers 2.
Ecological risk assessment. 2. Estimation of Exposition at Definition of Risk in Agrosphere3
I.Ya. Gaziev, Ya.I. Gaziev The Drighties and Some Findings of Research on Environmentally Occurring "Het" Radioactive
The Priorities and Some Findings of Research on Environmentally Occurring "Hot" Radioactive Particles. The General Characterization of "Hot" Radioactive Particles Applicability for
Technical Purposes
Technical Fulposes
THERMAL PHYSICS AND HEATHYDRAULICS
C.N. Wasishay, C.P. Usinin
G.N. Vlasichev, G.B. Usinin Numerical Modelling of Pin Meltdown in View of Molten Cladding Relocation in BN Reactor
Core under beyond Design Accident
V.T. Buglaev, A.A. Anisin
Influence of Geometrical Parameters of Surface Spheriodical Elements and the Scheme
of Their Arrangement on Heat Efficiency of Heat-Exchange Plate Surface

A.V. Beznosov, S.S. Pinaev, M.A. Kamnev, A.V. Nazarov, P.V.Romanov
Magnetohydrodynamic Resistance Reduction by Forming Oxide Electroinsulated Coatings
on Channels with Heavy Liquid Metal Coolants of TOKAMAK Reactor3
E.F. Avdeev, I.A. Chusov, V.I. Belozerov, V.V. Maksimovskiy, A.Ia. Ustujanin, S.P. Pashkov,
A.V. Shuvalov
Verification of Hydraulic Characteristics of Experimental Facility "Circulating Loop"4
Yu. N. Kornienko
Distribution Parameters for the Quasi-One-Dimensional Two-Phase Non-Equilibrium
Flow Models. Generalization for Simple-Form Channel Flows4
Yu. N. Kornienko
Distribution Parameters for the Quasi-One-Dimensional Two-Phase Non-Equilibrium
Flow Models. Generalization for Non-Monotone Parameter Profiles4
Yu. N. Kornienko
Distribution Parameters for the Quasi-One-Dimensional Two-Phase Non-Equilibrium
Flow Models. Generalization for Annular Channel and Rod Bundle Flows4
J.A. Kuzina, A.V. Zhukov, A.P. Sorokin, A.I. Filin, V.P. Smirnov, V.N. Leonov, A.G. Sila-Novitsky
Heat Transfer and Temperature Fields in the Core of Fast BREST Reactor with Lead Cooling4
V.I. Melnikov, A.V. Duntsev, A.B. Vjugin
Investigation of the Acoustic Probe System for Analysis of a Level of Boiling Water Coolant4
FUEL CYCLE AND RADIOACTIVE WASTES MANAGEMENT
S.G. Oleynik, V.A. Boltenkov
Simulation of Spent Fuel Burnup Determination System
Yu.V. Volkov, O.B. Duginov
Markov Chain with Rewards for Selection Most Significant Fission Products. General model2
S.S. Krechetov, V.S. Vnukov
Norms of Criticality Safety at Handling with Wastes, Containing Plutonium and Uranium
of Low Enrichment2
T.O. Mishevets, N.G. Bogdanovich, O.V. Starkov, E.E. Konovalov, D.L. Tyutyunnikov,
V.P. Emelyanov, V.V. Molchanov
Experimental Investigation of Possibility of Concentrated Liquid Radwaste Disposal of 137Cs
by Sorption Method with Following Immobilization of Sorbents into Geocement Rock2
O.G. Gerasimchuk, V.I. Orlov, V.F. Ukraintsev
The Analysis of the VVER Reactor Characteristics for Prolonged Duration Fuel Cycles3
O.G. Gerasimchuk, V.I. Orlov, V.F. Ukraintsev
The Analysis and Prediction of the VVER Reactors Fuel Cycle Economical Characteristics
NUCLEAR POWER PLANTS
Ali Basharat, I.I. Locshakov
Regulation of PWR Type Nuclear Power Plants by Changing Productivity of Primary
Coolant Pumps
TRAINING OF PERSONNEL. METHODOLOGICAL ASPECTS OF TEACHING
N.D. Khatkov, U.A. Pavlichenko
Concept of Realization Integrated Multimedia Distance Educating System SYDNEY
in Industry

MATERIALS OF NUCLEAR POWER ENGINEERING	
V.K. Milinchuk, E.R. Klinshpont. I.P. Shelukhov. T.N. Smirnova Degradation of polymeric materials on the «MIR» orbital cosmic station	2
APPLICATION OF NUCLEAR METHODS AND MEANS	
E.S.Matusevich, R.A. Roziev Physical Background of the Radionuclide Diagnostics and Therapy	1
WORKSHOPS, CONFERENCES, SEMINARS, SYMPOSIUMS	
P.P. Volosevich, E.I. Levanov	
Automodelling Solutions of Two-Temperature Magnetohydrodynamics Equations	1
Mathematical Simulation and Numerical Experiment for Nuclear-Physics Researches S.J.Aplin, V.I.Saveliev	1
Simulation of Transition Radiation for Pariodical and Spatial Distributed Structures	1

II. АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Авдеев Е.Ф4	Кричко А.А
Алонцева Е.Н2	Крючков Э.Ф1
Анисин А.А	Кузина Ю.А4
Анохин А.Н2	Кузнецов В.Д4
Аплин С.Дж1	Кузьмина И.Б1
Апсэ В.А	Куликов Г.Г1
Артисюк В.В1	Кухарчук О.Ф2
Башарат Али1	Леванов Е.И1
Безносов А.В	Леонов В.Н4
Белозеров В.И4	Лескин С.Т4
Богданович Н.Г2	Лихачев Ю.И2,3
Болтенков В.А1	Лощаков И.И1
Буглаев В.Т3	Максимовский В.В4
Валуй В.В4	Малолетнев А.С
Власичев Г.Н2	Матвеенко И.И
Внуков В.С2	Матвеенко И.П1
Волков Ю.В2	Матусевич Е.С1
Волосевич П.П1	Мельников В.И4
Воробьев Ю.Б4	Милинчук В.К2
Вьюгин А.Б4	Мишевец Т.О2
Газиев И.Я4	Молчанов В.В2
Газиев Я.И	Назаров А.В3
Герасимчук О.Г	Немытов С.А2
Гулевич А.В2	Окунев В.С
Гулина О.М4	Олейник С.Г1
Дугинов О.Б2	Орлов В.И
Дулин В.А2	Павличенко Ю.А1
Дулин В.В	Паркин Р.А2
Дунцев А.В4	Пашков С.П4
Евтодиев Д.В2	Петренко Г.И
Емельянов В.П2	Пинаев С.С
Жиганшин А.А4	Пичугина И.А2
Жуков А.В4	Полухина А.М
Зимин В.К2	Поплавский В.М
Зродников А.В2	Розиев Р.А1
Иванов Е.А2	Романов П.В
Каджури Н.М3	Рудая С.М
Камнев М.А	Савельев В.И
Каневский М.Ф2	Савельева Е.А2
Каткова М.Н	Саито М1
Кащеев М.В	Сальников Н.Л
Клиншпонт Э.Р	Сидоров Г.И
Коновалов Э.Е	Сила-Новицкий А.Г4
Корниенко Ю.Н	Смирнов В.П
Корниец Т.П	Смирнова Т.Н
Кочнов О.Ю	Сорокин А.П
Кречетов С.С	Старков О.В

Сынзыныс Б.И2,3	Филин А.И4
Терновых М.Ю1	Фоломеев В.И2,3
Тихомиров Г.В1	Хатьков Н.Д1
Троянов В.М2,3	Чистик О.В3
Тютюнников Д.Л2	Чусов И.А4
Украинцев В.Ф3	Шелухов И.П2
Устюжанин А.Я4	Шмелев А.Н1
Усынин Г.Б2	Шувалов А.В4
Фесенко Е.С2,3	Яцало Б.И2

II. AUTHOR INDEX

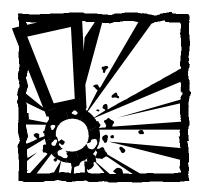
Alontseva E.N2	Katkova M.N	3
Anisin A.A3	Khatkov N.D	1
Anokhin A.N2	Klinshpont E.R	2
Aplin S.J	Kochnov O.Y.	2
Apse V.A	Konovalov E.E	2
Artisyuk V.V1	Kornienko Yu.N	4
Avdeev E.F4	Korniets T.P	4
Basharat Ali1	Koulikov G.G	1
Belozerov V.I4	Krechetov S.S	2
Beznosov A.V3	Kritchko A.A	3
Bogdanovich N.G2	Kryuchkov E.F	1
Boltenkov V.A1	Kukharchuk O.F	2
Buglaev V.T3	Kuzina J.A	4
Chistik O.V	Kuzmina I.B	1
Chusov I.A4	Kuznetsov V.D	4
Doulin V.A2	Leonov V.N	4
Doulin V.V1	Leskin S.T	4
Doulin V.V4	Levanov E.I	.1
Duginov O.B2	Likhachev Y.U2,	,3
Duntsev A.V4	Locshakov I.I	
Emelyanov V.P2	Maksimovskiy V.V	4
Evtodiev D.V2	Maloletnev A.S	3
Fesenko E.S	Matusevich E.S	.1
Filin A.I4	Matveenko I.I	3
Folomeev V.I	Matveenko I.P	
Gaziev I.Ya4	Melnikov V.I	4
Gaziev Ya.I3	Milinchuk V.K	2
Gaziev Ya.I4	Mishevets T.O	2
Gerasimchuk O.G3	Molchanov V.V	2
Gulevich A.V2	Nazarov A.V	3
Gulina O.M4	Nemytov S.A	2
Ivanov Eu.A2	Okunev V.S	1
Kachtcheev M.V3	Okunev V.S	4
Kadjuri N.M3	Oleynik S.G	1
Kamnev M.A3	Orlov V.I	3
Kanevsky M2	Parkin R	2

Известия вузов • Ядерная энергетика • №4 • 2002

Pashkov S.P4	Starkov 0.V2
Pavlichenko U.A1	Synzynys B.I
Petrenko G.I3	Ternovykh M.Yu1
Pichugina I2	Tikhomirov G.V1
Pinaev S.S3	Troyanov V.M2,3
Polukhina A.M3	Tyutyunnikov D.L2
Poplavsky V.M3	Ukraintsev V.F3
Romanov P.V3	Usinin G.B2
Roziev R.A1	Ustujanin A.Ia4
Rudaya S.M3	Valui V.V4
Saito M1	Vjugin A.B4
Salnikov N.L1	Vlasichev G.N2
Saveleva E2	Vnukov V.S2
Saveliev V.I	Volkov Y.V2
Shelukhov I.P2	Volkov Yu.V2
Shmelev A.N1	Volosevich P.P1
Shuvalov A.V4	Vorobyov Yu.B4
Sidorov G.I3	Yatsalo B2
Sila-Novitsky A.G4	Zhiganshin A.A4
Smirnov V.P4	Zhukov A.V4
Smirnova T.N2	Zimin V.K2
Sorokin A.P4	Zrodnikov A.V2

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

(АВТОРСКИХ ОРИГИНАЛОВ)



Материалы, предназначенные к опубликованию в журнале "Ядерная энергетика", должны удовлетворять следующим требованиям.

- 1. Рукописи статей направляются в редакцию по рекомендации кафедр вузов или НТС отделов и должны содержать экспертное заключение о возможности опубликования.
- 2. Объем статей не должен превышать 10 страниц текста. К печатному варианту статьи следует приложить электронный вариант на дискете стандартного формата (1,44М - 3,5"). Файлы должны содержать текст, выполненный в Microsoft Word, PageMaker, Write... Каждая статья должна иметь краткую аннотацию, реферат, сведения об авторах (на русском и английском языках).
- 3. Рукопись статьи должна содержать УДК, название, фамилии авторов, их ученую степень и должность, полное наименование вуза, адреса и номера телефонов авторов. Заголовок статьи должен предельно кратко и конкретно отражать тему статьи.
- 4. В формулах необходимо выделять прописные и строчные буквы, индекс писать ниже строки, показатели степени - выше строки, греческие буквы обводить красным карандашом, на полях делать отметку, каким алфавитом в формулах обозначены буквы, а также и другие пояснения. Математические формулы приводить только необходимые для понимания существа воп-

- 5. Статьи иллюстрировать фотографиями и чертежами, однако не более четырех на статью. Чертежи выполнять четко, размером не более 13х21 см. Обязательно в тексте статьи давать ссылки на рисунки, причем обозначения в тексте должны строго соответствовать обозначениям на рисунках. Каждый чертеж и фотография должны иметь порядковый номер в тексте и подпись. Чертежи и фото в текст рукописи не вклеивать, а прилагать отдельно, составив на них опись.
- 6. Единицы физических величин приводить в Международной системе единиц (СИ).
- 7. В табличном материале точно обозначить единицы физических величин. Не сокращая слов, давать полностью наименование, слишком громоздких таблиц не давать.
- 8. Список литературы должен быть оформлен по ГОСТу и содержать все упоминаемые в тексте статьи работы. Проверить правильность ссылок на литературу, формулы, рисунки, таблицы, приложения и др. Убедиться в правильности оформления справочных и дополнительных текстов.
- 9. Дополнения и корректуру против рукописи вносить нельзя.
- 10. В журнале печатаются только те статьи, которые нигде не опубликованы и не переданы в редакции других журналов.

Материалы для журнала направлять по адресу: 249040 г.Обнинск Калужской обл., Студгородок, 1. Редакция журнала "Ядерная энергетика" E-mail: rio@iate.obninsk.ru

При несоблюдении настоящих требований статьи возвращаются авторам без рассмотрения.