

61.110-5/1493-X
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени академика А.И. Лейпунского

УДК 621.039.5

На правах рукописи

Камаев Алексей Альфредович

Технико-экономическая оптимизация параметров
активной зоны и теплогидравлических
характеристик оборудования энергоблока с
реактором БН

05.14.03 - ядерные энергетические установки

Диссертация на соискание
ученой степени кандидата
технических наук

А. Камаев

Научные руководители:
доктор технических наук
Ринейский Анатолий Антонович,

доктор технических наук,
профессор
Багдасаров Юрий Ервандович

Обнинск - 1999

О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
Введение	4
Глава 1. Методика определения параметров натриевых контуров и паросилового цикла энергоблока с реактором типа БН с учетом ограничений на теплогидравлические характеристики и конструкцию основного технологического оборудования и элементов активной зоны при фиксированной тепловой или электрической мощности	11
1.1. Постановка задачи.....	12
1.2. Математическая модель. Методика и алгоритм расчета.....	15
1.3. Характеристика комплекса программ.....	34
Выводы.....	36
Глава 2. Оптимизационные исследования по улучшению технико-экономических показателей энергоблока средней мощности с РУ типа БН-800 за счет увеличения тепловой мощности и повышения выгорания топлива	37
2.1. Постановка задачи. Исходные данные и ограничения.....	38
2.2. Характеристика энергоблока с РУ БН-800М (I) тепловой мощностью 2100 МВт.....	46
2.3. Характеристики энергоблока с РУ БН-800М (II) с увеличенной тепловой мощностью.....	50
2.4. Техничко-экономические показатели вариантов энергоблока с РУ БН-800М (I) и БН-800М (II) с различной тепловой мощностью.....	53
Выводы.....	55
Глава 3. Оптимизация энергоблока с реактором большой мощности типа БН-1600М исходя из достижения высоких выгораний топлива	56
3.1. Влияние давления острого пара и вида тепловой схемы пароводяного контура на технико-экономические показатели парогенератора и турбоустановки.....	58
3.2. Зависимость максимальной температуры оболочек, ресурса	

твэла и металлоемкости РУ типа БН-1600М от параметров натриевых контуров и температуры острого пара.....	72
3.2.1. Характеристики активных зон с оболочками твэлов из аустенитных сталей.....	79
3.2.2. Характеристики активных зон с оболочками твэлов из ферритно-мартенситных сталей.....	83
3.2.3. Параметры активной зоны и РУ типа БН-1600М с высоким выгоранием топлива.....	95
Выводы.....	98
Глава 4. Исследование возможности существенного улучшения характеристик безопасности и натуральных показателей топливного цикла активной зоны РБН с КВА~1.0 при снижении требований по НПЭР.....	101
4.1. Зависимость нейтронно-физических (в том числе НПЭР _{А3+верх}) и теплогидравлических характеристик активных зон с КВА=1.0 от величины относительного шага пучка твэлов.....	104
4.2. Улучшение натуральных показателей топливного цикла активной зоны с КВА~1 при снижении требований по НПЭР _{А3+верх}	119
Выводы.....	130
Заключение.....	133
Список использованной литературы.....	136
Приложение 1. Конструкция и характеристики парогенераторов натрий-вода на закритические и умеренные давления пара для энергоблока с РУ типа БН-1600М.....	148
Приложение 2. Зависимость нейтронно-физических характеристик активных зон с уран-плутониевым оксидным и нитридным топливом от относительного шага пучка твэлов.....	157

ВВЕДЕНИЕ

Вплоть до 80-ых годов в России (как и в ряде других стран, интенсивно развивающих ядерную энергетику) была принята стратегия топливообеспечения ядерной энергетики на долгосрочную перспективу, заключающаяся в развертывании замкнутого уран-плутониевого топливного цикла и расширенном воспроизводстве плутония в реакторах-бридерах. При этом исходили из соображений, что запасы дешевого природного урана ограничены, и при прогнозируемых темпах ввода АЭС на урановом топливе данных запасов хватит на весьма ограниченный период времени.

В рамках указанной стратегии топливообеспечения ядерной энергетики реакторам-бридерам отводится важное место. В настоящее время в мире разрабатываются несколько вариантов реакторных систем, обладающих свойством избыточной наработки плутония. В качестве одного из перспективных направлений создания реактора-бридера рассматривается разработка реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем - РБН. Реакторные установки данного типа прошли этапы экспериментального обоснования и промышленного освоения. В конце 80-ых - начале 90-ых годов в России приступили к созданию проекта серийного РБН большой мощности (~1600 МВт (эл)), работающего в бридерном режиме, экономически конкурентоспособного по сравнению с перспективными ВВЭР и обладающего высоким уровнем безопасности.

Работы над проектом серийного РБН совпали по времени с возникновением новой ситуации в сфере топливообеспечения ядерной энергетики страны, характеризующейся следующими моментами:

- замедлились темпы роста энергопотребления;
- снизились темпы ввода АЭС, и сократилась прогнозируемая доля ядерной энергетики в структуре энергообеспечения страны в будущем;
- сформировался стабильный рынок уранового топлива с относительно невысокими ценами;
- разведка и освоение новых месторождений органического топлива при низких темпах его потребления привели к снижению цен на органическое топливо;
- на предприятиях внешнего топливного цикла скопилось значительное количество невостребованного энергетического плутония, и в ближайшие годы ожидается высвобождение десятков тонн оружейного плутония.

В создавшейся ситуации общего замедления развития ядерной энергетики большинство экспертов считают нецелесообразным развертывание в ближайшее время топливного цикла с расширенным воспроизводством плутония и предлагают отодвинуть сроки массового ввода реакторов-бридеров на неопределенный период (после 2030 года).

В соответствии со сложившейся ситуацией и, в первую очередь, для решения проблем, связанных с наличием значительных количеств не востребованного плутония, предложено использовать РБН для выжигания плутония и малых актинидов (МА).

Появление дополнительных функций РБН открывает новый этап в развитии РУ данного типа и предполагает корректировку технической концепции последней и формулировку дополнительных требований к ее характеристикам. В настоящее время в качестве основного направления развития РБН рассматривают создание РУ, работающей в составе энергоблока, конструкция которой допускает реализацию активных зон как со свойствами выжигателя, так и со свойствами бридера. При этом остаются актуальными такие проблемы как обеспечение высокого уровня безопасности РБН и достижение экономической конкурентоспособности последних по сравнению с перспективными источниками электроэнергии.

Решение перечисленных проблем подразумевает выполнение комплекса научно-исследовательских работ с целью обоснования возможности и целесообразности использования в проекте различных технических, конструкторских и схемно-компоновочных решений, оптимизации параметров РУ и определения влияния на них различных факторов.

Важное место в комплексе научно-исследовательских работ отводится решению задач оптимизации и обоснования вида тепловой схемы энергоблока, параметров натриевых и пароводяных контуров, теплогидравлических характеристик активной зоны и основного технологического оборудования, от которых зависят значения ряда показателей, определяющих экономичность, безопасность и надежность работы РУ.

Решение указанных задач становится особенно актуальным на этапе создания коммерческого РБН, когда для достижения высокого уровня безопасности, экономической конкурентоспособности и многофункциональности РУ требуется оптимальным образом выбрать технические, конструкторские и схемно-компоновочные решения и определить условия их реализации.

Основная цель работы заключается в комплексной оценке влияния на технико-экономические показатели РБН (параметры натриевых и пароводяных контуров, к.п.д. цикла, выгорание топлива, металлоемкость РУ и т.д.) ограничений на рабочие характеристики и габариты элементов активной зоны и основного технологического оборудования РУ и требований к нейтронно-физическим характеристикам и мощности энергоблока с реактором БН.

В соответствии с поставленной целью решен ряд задач, основными из которых являются:

- сравнительный анализ двух направлений улучшения технико-экономических показателей энергоблока с РУ средней мощности типа БН-800 – увеличение электрической мощности и повышение выгорания топлива;
- оптимизация параметров натриевых контуров, характеристик и вида тепловой схемы энергоблока с реактором большой мощности типа БН-1600М с целью снижения металлоемкости РУ при условии достижения высоких выгораний топлива (15-20% т.а.) и заданной электрической мощности;
- исследование зависимости теплогидравлических характеристик, конструктивных особенностей и натуральных показателей топливного цикла активной зоны РБН большой мощности от ограничений на величину пустотного эффекта реактивности и изменения реактивности при выгорании топлива за микрокампанию.

Для решения указанных задач, а также автоматизации инженерных расчетов, разработаны методика и алгоритм, и создан комплекс программ, позволяющие выполнять взаимосогласованный расчет параметров I, II и III контуров (температуры, расходы), теплогидравлических характеристик основного технологического оборудования и элементов активной зоны, к.п.д. паросилового цикла энергоблока с РБН с учетом ограничений на рабочие характеристики и габариты оборудования при фиксированной тепловой или электрической мощности; разработаны методика, алгоритм и программа теплогидравлического расчета ТВС с пучком тепловыделяющих элементов, содержащим помимо топливных элементы иного типа (воспроизводящие, стальные, поглощающие и т.д.), с различными типами дистанционирования твэлов в пучке и различными моделями пучка твэлов (плотно сжатый, равномерно-распределенный и раздвинутый пучки); разработана инженерная методика теплогидравлического расчета парогенератора натрий-вода при закритических давлениях воды/пара.

Параметры контуров определяются с использованием методик и алгоритмов расчета тепловой схемы турбоустановки и теплогидравлических характеристик активной зоны и ее элементов (ТВС, твэл), основного технологического оборудования (ПТО, ПГ, ГЦН-I, ГЦН-II, и т.д.) энергоблока с РБН, позволяющих получать детальные распределения температур в элементах конструкции.

Решение перечисленных выше задач, обсуждение полученных результатов и их практическая реализация выполнены с использованием методических разработок и результатов, близких по содержанию к исследованиям других организаций при непосредственном участии их сотрудников. Характеристика использованных методических разработок и результатов близких по постановке исследований дана по тексту диссертации.

Автор защищает:

- Постановку задачи, методику и алгоритм комплексного взаимосогласованного расчета параметров натриевых и пароводяного контуров, к.п.д. цикла, теплогидравлических характеристик активной зоны и основного технологического оборудования РБН с учетом ограничений на рабочие характеристики (максимальные температуры топлива и оболочки твэла, температура теплоносителя на входе в парогенератор, напорные и кавитационные характеристики насосов I и II контуров) и габариты оборудования (радиальные и аксиальные габариты ПТО, длина теплообменных трубок модулей парогенератора) при фиксированной тепловой или электрической мощности.
- Инженерную методику и алгоритм теплогидравлического расчета парогенератора натрий-вода на закритические параметры рабочего тела.
- Инженерную методику и алгоритм теплогидравлического расчета ТВС с пучком твэлов, содержащим топливные, воспроизводящие и поглощающие элементы с различными типами дистанционирования твэлов в пучке (решеточное, проволочное) и различными моделями пучка твэлов (плотно сжатый, равномерно-распределенный, раздвинутый).
- Результаты и рекомендации расчетных исследований по определению параметров контуров, к.п.д. цикла, теплогидравлических характеристик активной зоны и основного технологического оборудования и т.д. для двух вариантов энергоблока с РУ типа БН-800: с увеличенной тепловой мощностью и с увеличенным выгоранием топлива; результаты

сравнительного анализа двух направлений улучшения технико-экономических показателей энергоблока с РУ средней мощности.

- Постановку задачи и результаты исследований по оптимизации параметров натриевых контуров, характеристик и вида тепловой схемы третьего контура, к.п.д. цикла, теплогидравлических характеристик основного технологического оборудования (ПТО, ПГ, ГЦН-I, II) и активной зоны энергоблока РБН большой мощности типа БН-1600М при условии обеспечения высоких выгораний топлива и заданной электрической мощности.
- Результаты и рекомендации расчетных исследований по определению зависимости теплогидравлических и нейтронно-физических характеристик, конструктивных особенностей и натуральных показателей топливного цикла активной зоны РБН большой мощности от ограничения на величину $NP_{аз+верх}$ при условии сохранения нулевого значения изменения реактивности при выгорании топлива за микрокампанию.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений.

В первой главе диссертации сформулирована задача и дано описание методики и алгоритма комплексного взаимосогласованного расчета параметров I, II, III контуров, к.п.д. паросилового цикла, теплогидравлических характеристик основного технологического оборудования и активной зоны РБН с учетом ограничений на габариты и рабочие характеристики оборудования при заданной тепловой или электрической мощности энергоблока. Приведено краткое описание инженерных методик и алгоритмов теплогидравлического расчета активной зоны и ее элементов (ТВС, ТВЭЛ), ПТО, ПГ и методик расчета тепловой схемы турбоустановки и к.п.д. цикла.

Перечислены основные допущения, положенные в основу математической модели энергоблока с РБН. Приведено описание структуры и возможностей комплекса расчетных программ SSCAPS-85, позволяющего рассчитывать параметры контуров и к.п.д. цикла с учетом ограничений на температурные условия работы и габариты оборудования. Дана характеристика времени счета различных вариантов и запрашиваемых ресурсов.

Во второй главе изложены результаты сравнения двух направлений совершенствования технико-экономических показателей энергоблока средней мощности с РУ типа БН-800: увеличение тепловой мощности и повышение

выгорания топлива. Приведены результаты оптимизационных исследований по выбору параметров контуров, к.п.д. цикла, теплогидравлических характеристик активной зоны и основного технологического оборудования для двух вариантов энергоблока: с увеличенной тепловой мощностью (оболочки твэлов из аустенитных сталей) и с пониженными температурами оболочек твэлов (оболочки из ферритно-мартенситных сталей). Рассчитаны ресурс и максимальное выгорание топлива для твэлов с оболочками из различных материалов, определены натуральные показатели топливного цикла перечисленных вариантов активных зон. Приведены результаты исследований по определению экономической эффективности рассмотренных вариантов энергоблока с РУ средней мощности типа БН-800.

В третьей главе сформулирована задача и изложены результаты научно-исследовательских работ по оптимизации вида тепловой схемы, к.п.д. цикла, параметров контуров и теплогидравлических характеристик активной зоны и основного технологического оборудования энергоблока с РБН большой мощности типа БН-1600М исходя из достижения высоких выгораний топлива (15-20% т.а.) и заданной электрической мощности.

Исследовалось влияние на технико-экономические показатели энергоблока схемы промежуточного перегрева пара и величины давления острого пара. Изучалась зависимость ресурса твэла и металлоемкости РУ от температуры острого пара и температур теплоносителя в натриевых контурах для активных зон с оболочками твэлов из аустенитных и ферритно-мартенситных сталей. Сформулированы требования к конструкции активной зоны и параметрам контуров РУ большой мощности с высоким выгоранием топлива (15-20% т.а.).

В четвертой главе приведены результаты исследований по определению зависимости теплогидравлических характеристик и натуральных показателей топливного цикла активной зоны РБН большой мощности (типа БН-1600) от ограничения на величину $НПЭР_{аз+верх}$ при условии сохранения нулевого изменения реактивности при выгорании топлива за микрокампанию. Изучалось влияние на нейтронно-физические и теплогидравлические характеристики активной зоны, а также важные для обеспечения безопасности показатели РУ - расход естественной циркуляции в I контуре, постоянная выбега ГЦН-I - изменения высоты активной зоны и относительного шага пучка твэлов. Исследовалась зависимость ресурса твэлов и натуральных показателей топливного цикла (годовой расход твэлов и ТВС) активных зон с оболочками твэлов из

аустенитных и ферритно-мартенситных сталей от относительного шага пучка твэлов.

Автор выражает благодарность специалистам структурных подразделений ГНЦ РФ ФЭИ, ОКБМ, ОКБ Гидропресс, СПб АЭП, ЛМЗ и других предприятий, помогавших и участвовавших в получении и обсуждении результатов, внедрении и реализации рекомендаций диссертации в практику проектирования РБН.

Автор признателен д.т.н., профессорам М.Ф. Троянову, В.М. Поплавскому, Б.Ф. Громову, П.Л. Кириллову и другим специалистам за критические замечания, высказанные при обсуждении работы.

Особую благодарность автор выражает научным руководителям: д.т.н., профессору Ю.Е. Багдасарову и д.т.н. А.А. Ринейскому – за постоянное внимание к работе, помощь и активное непосредственное участие в реализации данного направления исследований в ГНЦ РФ ФЭИ.

ГЛАВА 1

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАТРИЕВЫХ КОНТУРОВ И ПАРОСИЛОВОГО ЦИКЛА ЭНЕРГБЛОКА С РЕАКТОРОМ ТИПА БН С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КОНСТРУКЦИЮ ОСНОВНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ЭЛЕМЕНТОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ПРИ ФИКСИРОВАННОЙ ТЕПЛОВОЙ ИЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ

От параметров натриевых и пароводяного контуров (температуры, давления) во многом зависит возможность и целесообразность использования в проекте РУ различных технических решений, а также значения ряда показателей, определяющих экономичность, безопасность и надежность работы РУ и энергоблока в целом (например, к.п.д. паросилового цикла, габариты и металлоемкость основного теплообменного оборудования, температурные запасы до кипения теплоносителя и разрушения оболочки твэла и т.д.).

С другой стороны при разработке отдельных узлов и оборудования РУ выдвигаются специальные требования к габаритам, температурным условиям работы и гидравлическим характеристикам, определяющим напряженно-деформированное состояние элементов конструкции, скорость процессов коррозии и старения материалов. Данные ограничения обусловлены необходимостью снижения металлоемкости и стоимости оборудования, а также обеспечения назначенного ресурса и высокой надежности его работы. В связи с вышесказанным, при определении параметров натриевых и пароводяного контуров энергоблока с РБН важное значение приобретает комплексный учет всевозможных ограничений и требований.

В данной главе автором применительно к трехконтурной АЭС с реактором БН сформулирована задача определения параметров натриевых и пароводяного контуров и к.п.д. паросилового цикла при наличии ограничений на различные характеристики и показатели установки. Приведено описание методики и алгоритма решения задачи, а также дана краткая характеристика комплекса расчетных программ ССАПС-85, разработанного в ГИЦ РФ ФЭИ в соответствии с

этими алгоритмами. Основные положения методики и характеристика алгоритма изложены в работах /1, 2, 110/.

1.1. Постановка задачи

В общем виде задача определения параметров контуров и к.п.д. паросилового цикла применительно к энергоблоку с РБН решалась сотрудниками СЭИ (г. Иркутск) и ГПИ (г. Нижний Новгород). В первой половине 80-х годов в указанных организациях были разработаны оптимизационные модели АЭС с реактором БН /3, 4/ и соответствующие комплексы расчетных программ. В силу того, что целью этих разработок являлось создание оптимизационных комплексов, предложенный вариант решения поставленной задачи определения параметров контуров имел ряд особенностей. Во-первых, решение данной задачи является частным решением общей задачи оптимизации параметров АЭС с реактором БН при наличии ограничений и условий на отдельные параметры. Во-вторых, для выполнения оптимизационных исследований за разумные времена счета разработчики комплексов программ вынуждены были использовать упрощенные методики и алгоритмы, которые не позволяют с хорошей точностью рассчитать температурные условия работы узлов и оборудования.

В сложившейся ситуации перед автором возникла необходимость в формулировке и решении специальной задачи прямого расчета параметров контуров энергоблока с реактором БН при наличии ограничений на рабочие характеристики и габариты отдельных узлов и оборудования, которые прошли верификацию и апробированы на предприятиях-разработчиках соответствующего оборудования.

Опыт проектирования и обоснования параметров контуров установок БОР-60, БН-350, БН-600 и БН-800 позволил сформулировать задачу определения параметров контуров энергоблока с реактором БН следующим образом.

При фиксированной тепловой или электрической мощности энергоблока требуется определить температуры и расходы теплоносителя I и II контуров, расход и температуру питательной воды, конструктивные характеристики ПГ (количество модулей и длину теплообменных трубок) и к.п.д. паросилового цикла при следующих ограничениях:

- для обеспечения заданного ресурса твэлов максимальная температура оболочки не должна превышать допустимого значения $[t_{об}]$;
- для обеспечения необходимого температурного запаса до плавления максимальная температура топлива не должна превышать допустимого значения $[t_{топ}]$;
- в соответствии с назначенным сроком службы и выбранными материалами теплообменных трубок температура теплоносителя на входе в ПГ не должна превышать величину T_* ;
- исходя из технологических ограничений длина теплообменной трубки модуля ПГ не должна превышать величины l_* ;
- диаметр корпуса ПТО и длина его теплообменных трубок не должны превышать $D_*^{ПТО}$ и $l_*^{ПТО}$, соответственно.

В качестве исходных данных выступают следующие величины:

- схема включения основного технологического оборудования энергоблока по теплоносителю и рабочему телу; количество петель и число единиц оборудования (ПТО, ГЦН-I, ПГ, ГЦН-II, турбоустановка и т.д.);
- конструкция и габариты основных узлов и систем РУ (твэл, ТВС, активная зона, ПТО, трасса теплоносителя I-ого контура в баке реактора, трубопроводы II-ого и III-его контуров), а также конструкция и геометрия модулей ПГ (кроме их количества и длины теплообменной трубки);
- напорные и кавитационные характеристики ГЦН-I и ГЦН-II при номинальном числе оборотов;
- температура и давление острого пара перед турбиной; характеристики проточной части турбоустановки, конденсатора и системы регенеративного подогрева питательной воды; параметры охлаждающей воды на входе в конденсатор;
- теплофизические свойства теплоносителя и рабочего тела (вода/пар), конструкционных материалов (твэл, ТВС, ПТО и ПГ) и топливных композиций;
- распределение мощности по ТВС (включая СУЗ, БЗВ, сборки защиты и ВРХ), а также распределение энерговыделения по сечению и высоте ТВС, для состояний на начало и конец микрокампании с учетом схемы перегрузки (перестановки) ТВС.

Для решения поставленной задачи были разработаны методика и алгоритмы определения параметров контуров и к.п.д. паросилового цикла на основе взаимосогласованного теплогидравлического расчета активной зоны и основного технологического оборудования, описание которых приведено в следующем подразделе главы. Данная постановка задачи и разработка соответствующей методики сделали возможным решение следующих классов задач:

- определение в рамках единой системы ограничений влияния на параметры контуров и к.п.д. цикла различных технических и конструкторских решений по энергоблоку и его оборудованию;
- исследование зависимости параметров контуров и к.п.д. цикла от количественных значений ограничений на различные величины, выделенные в постановке задачи.

Так, например, при фиксированных значениях ограничений на параметры решались следующие конкретные задачи (первый класс задач):

- исследовались перспективы реализации в рамках проекта РУ БН-800 активных зон с аксиальной и кольцевой гетерогенностью /5, 6/;
- исследования в обоснование теплогидравлических характеристик активных зон РУ БН-1600 гомогенного и гетерогенного типа (кольцевая, аксиальная и внутрикассетная гетерогенность) с различными типами топлива (оксид, нитрид, металл) /7÷18/;
- исследования в обоснование схемно-компоновочных, проектных и технических решений, параметров контуров и профиля основного технологического оборудования по энергоблокам с РУ типа БНМ-170, БН-800 и БН-1600 /19÷29, 1, 2/.

Ко второму классу задач, когда изменяются значения ограничений на параметры, можно отнести:

- исследование возможности снижения максимальных температур оболочек твэлов в РУ БН-600 и БН-800 с целью применения на оболочках малораспухающих сталей типа ЭП-450 /30÷35/;
- исследование возможности увеличения тепловой мощности энергоблока с РУ типа БН-800 при сохранении проектных и технических решений /35÷37/;
- сопоставление схемно-компоновочных решений и технико-экономических показателей энергоблоков с РУ с различными ЖМТ: свинец и натрий /38, 2/.

Необходимо отметить, что при проведении указанных исследований были использованы возможности методики по решению задачи как в общей постановке, так и ряда частных задач. Последнее достигалось введением дополнительных ограничений системного характера на соответствующие характеристики установки. Наиболее полно возможности разработанной методики (в плане частных задач) были реализованы при проведении исследований в обоснование вида тепловой схемы и параметров натриевого и пароводяного контуров энергометаллургического комплекса безотходной высокотемпературной переработки твердых бытовых и промышленных отходов, в составе которого используется плавильная печь с трактом отходящих печных газов, охлаждаемых натриевым теплоносителем. Постановка частной задачи определения параметров контуров и отличительные особенности методики ее решения изложены в работах /104-109/.

1.2. Математическая модель. Методика и алгоритм расчета

Методика определения параметров контуров и к.п.д. паросилового цикла предполагает выполнение взаимосогласованного стационарного теплогидравлического расчета (и определение на этой основе рабочих характеристик ГЦН-I, ГЦН-II и температурных полей в элементах конструкций) следующих основных узлов и систем энергоблока: активная зона и ее элементы (ТВЭЛ, ТВС), ПТО, трассы теплоносителя I-ого и II-ого контуров, парогенератор, турбоустановка, конденсатор, система регенеративного подогрева питательной воды, турбопривод питательного насоса. Расчет выполняется с учетом ограничений на рабочие характеристики и габариты оборудования и завершается определением к.п.д. паросилового цикла на основе расчета процесса расширения пара в проточных частях основной турбины (ЦВД, ЦСД, ЦНД) и турбопривода ПН.

На рисунке 1.1 приведена схема расчета параметров контуров и к.п.д. паросилового цикла энергоблока при фиксированной тепловой мощности. В случае фиксированной электрической мощности параметры контуров определяются в результате итераций по величине тепловой мощности с выполнением на каждом шаге итераций расчетов по схеме на рисунке 1.1.

Расчет выполняется в несколько этапов:

- параметры III-его контура и к.п.д. цикла определяются в результате итераций по величине расхода питательной воды;

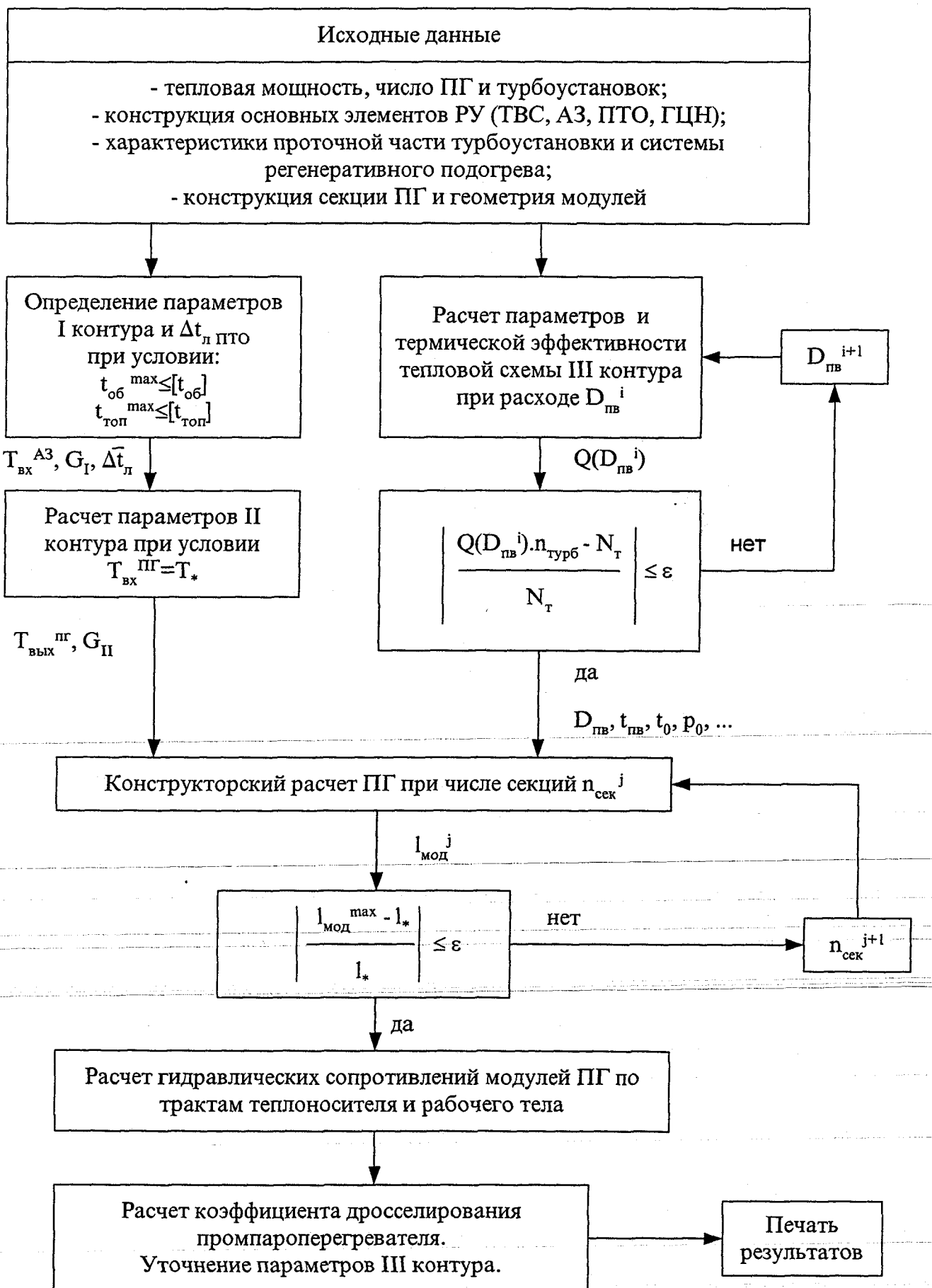


Рис. 1.1. Схема расчета параметров энергоблока при фиксированной тепловой мощности

- из условия $t_{об}^{max} \leq [t_{об}]$ и $t_{топ}^{max} \leq [t_{топ}]$ с учетом напорной характеристики ГЦН-I рассчитываются параметры I-ого контура (температуры, расход, гидравлическое сопротивление); с учетом ограничений на диаметр корпуса и длину теплообменных трубок ПТО определяются его термическая эффективность и гидравлические характеристики;
- при заданной температуре теплоносителя II-ого контура на выходе из ПТО (T_*) с учетом термической эффективности последнего определяются параметры II-ого контура (температуры, расход, гидравлическое сопротивление); определяется рабочая точка ГЦН-II и рассчитываются затраты мощности на прокачку теплоносителя II-ого контура;
- исходя из ограничения на длину теплообменной трубки определяется количество модулей ПГ; рассчитываются теплогидравлические характеристики по трактам теплоносителя и рабочего тела;
- уточняются параметры III-его контура и к.п.д. цикла с учетом гидравлического сопротивления модуля промпароперегревателя по пару (коэффициент дросселирования).

На рисунке 1.2 приведена схема расчета теплогидравлических параметров I-ого и II-ого контуров. Для выполнения расчета все сборки центральной части реактора распределяются по зонам дросселирования, каждая из которых характеризуется числом ТВС, типом ТВС (индекс k), конструкцией модульного коллектора (индекс j), если такой имеется, и параметрами «огнивающей» поля энерговыделений: q_V^{max} , $f(z)$, $\alpha_{HTЗВ}$ и K_r^{TBC} . Последнее определяют в ходе нейтронно-физического расчета реактора в состояниях на начало и конец с учетом режима равномерно-частичных перегрузок с использованием комплексов программ: SINVAR-2 /39/, ТВК-2D /40/, РБР-80 /41/, RHEIN /42/, TRIGEX /43/, JAR и т.д. Каждому типу ТВС ставятся в соответствие геометрические размеры пучка твэлов и чехла, а также гидравлическая характеристика хвостовика с минимально возможным сопротивлением (при заданной величине расхода). В пределах одной зоны дросселирования все ТВС и модульные коллектора имеют одинаковую конструкцию и расходы теплоносителя.

Параметры I-ого контура определяются в результате итераций по температуре на входе в активную зону. На каждом шаге итераций (l) для каждой зоны дросселирования из условий $t_{об}^{max} = [t_{об}]$ и $t_{топ}^{max} = [t_{топ}]$ определяются, соответст-

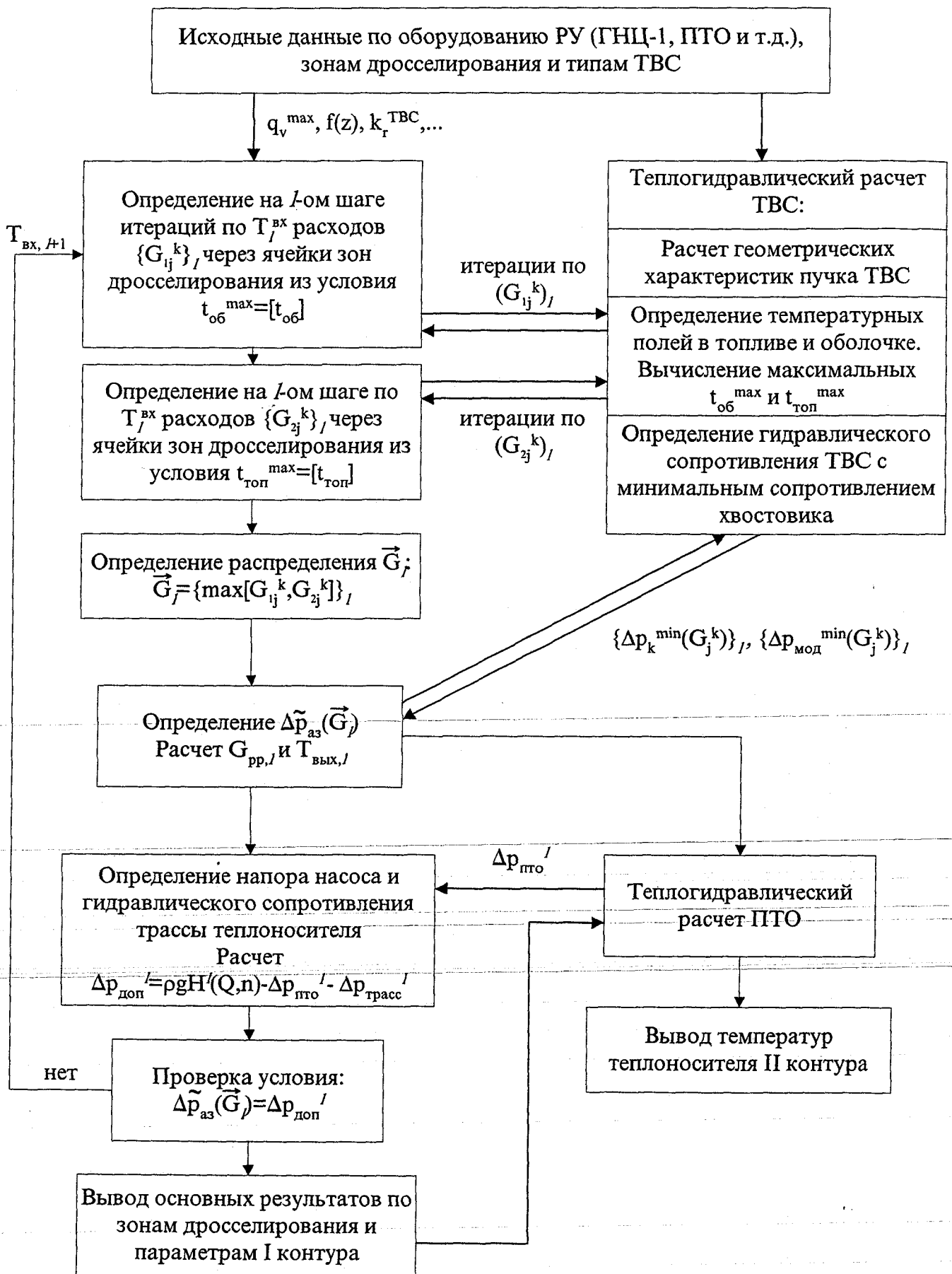


Рис. 1.2. Схема расчета теплогидравлических параметров I контура

венно, расходы $(G_{1j}^k)_l$ и $(G_{2j}^k)_l$. Величины определяются путем итераций (по расходам) с использованием модели теплогидравлического расчета ТВС, схема которого приведена на рисунке 1.3. Расход через ТВС зоны дросселирования определяется из условия:

$$(G_j^k)_l = \max_{1,2} \left\{ (G_{1j}^k)_l, (G_{2j}^k)_l \right\}.$$

Полученному распределению расходов $(G_j^k)_l$ по ТВС различных зон дросселирования (обозначается \vec{G}_l) соответствует набор минимально возможных из конструктивных соображений гидравлических сопротивлений ТВС $\{\Delta p_k^{\min}(G_j^k)\}_l$ и гидравлических сопротивлений модульных коллекторов $\{\Delta p_{\text{мод}}^{\min}(G_j^k)\}_l$. Величины гидравлических сопротивлений определяются с использованием модели теплогидравлического расчета ТВС. Величина гидравлического сопротивления активной зоны определяется по формуле:

$$\Delta p_{AZ}(\vec{G}_l) = \max_{k,j} \left\{ \Delta p_k^{\min}(G_j^k) + \Delta p_{\text{мод}}^{\min}(G_j^k) \right\}_l.$$

Суммарный расход через реактор и подогрев теплоносителя рассчитывается по следующим формулам:

$$G_{pp,l} = \sum_{jk} G_j^k \cdot n_{jk} + G_*,$$

$$\Delta T_l = \frac{N_T}{C_p \cdot G_{pp,l}} \quad \text{и} \quad T_{\text{вых},l} = T_{\text{вх},l} + \Delta T_l.$$

Величина G_* представляет собой расход теплоносителя, поступающий в активную зону в виде протечек и на охлаждение элементов, для которых расходы предварительно заданы (например, сборки СУЗ, ТВС ВРХ и т.д.).

Величина перепада давления, создаваемого ГЦН-I на участке активной зоны, определяется из соотношения:

$$\Delta p_{\text{дон},l} = \rho \cdot g \cdot H(Q_l, n) - \Delta p_{\text{ПТО}}(G_{\text{ПТО},l}) - \Delta p_{\text{трасс}}(G_{\text{тр},l}) - \Delta p_{\text{зан}},$$

$$Q_l = \frac{G_{pp,l} + G_{\text{кор}} + G_{\text{нас}}}{N_{\text{нас}} \cdot \rho}; \quad G_{\text{ПТО},l} = \frac{G_{pp,l}}{N_{\text{ПТО}}}; \quad G_{\text{тр},l} = \frac{G_{pp,l} + G_{\text{кор}}}{N_{\text{нас}}}.$$

Величина гидравлического сопротивления ПТО по тракту теплоносителя I-ого контура рассчитывается с использованием модели теплогидравлического расчета ПТО, схема которого приведена на рисунке 1.4.

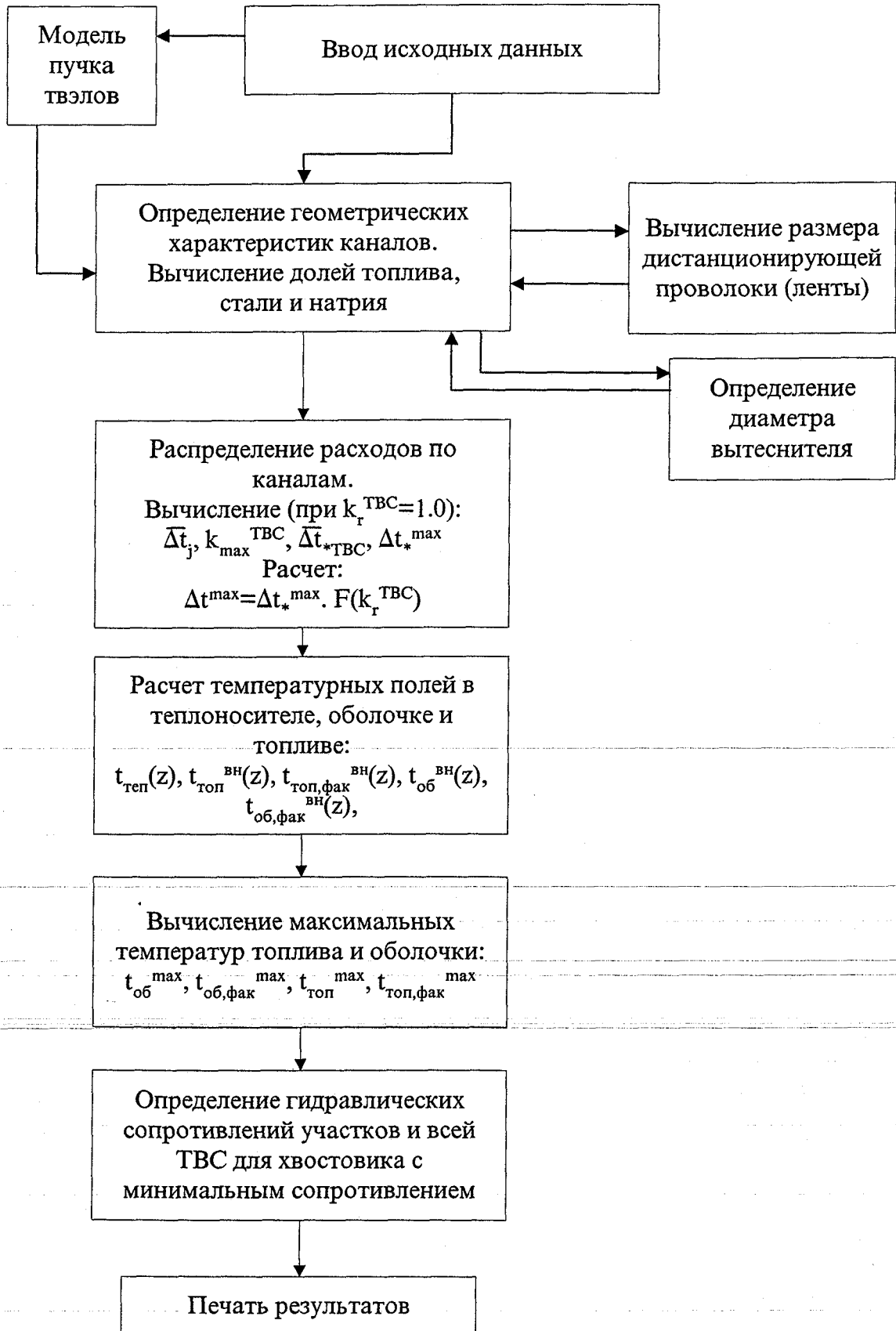


Рис. 1.3. Схема теплогидравлического расчета ТВС

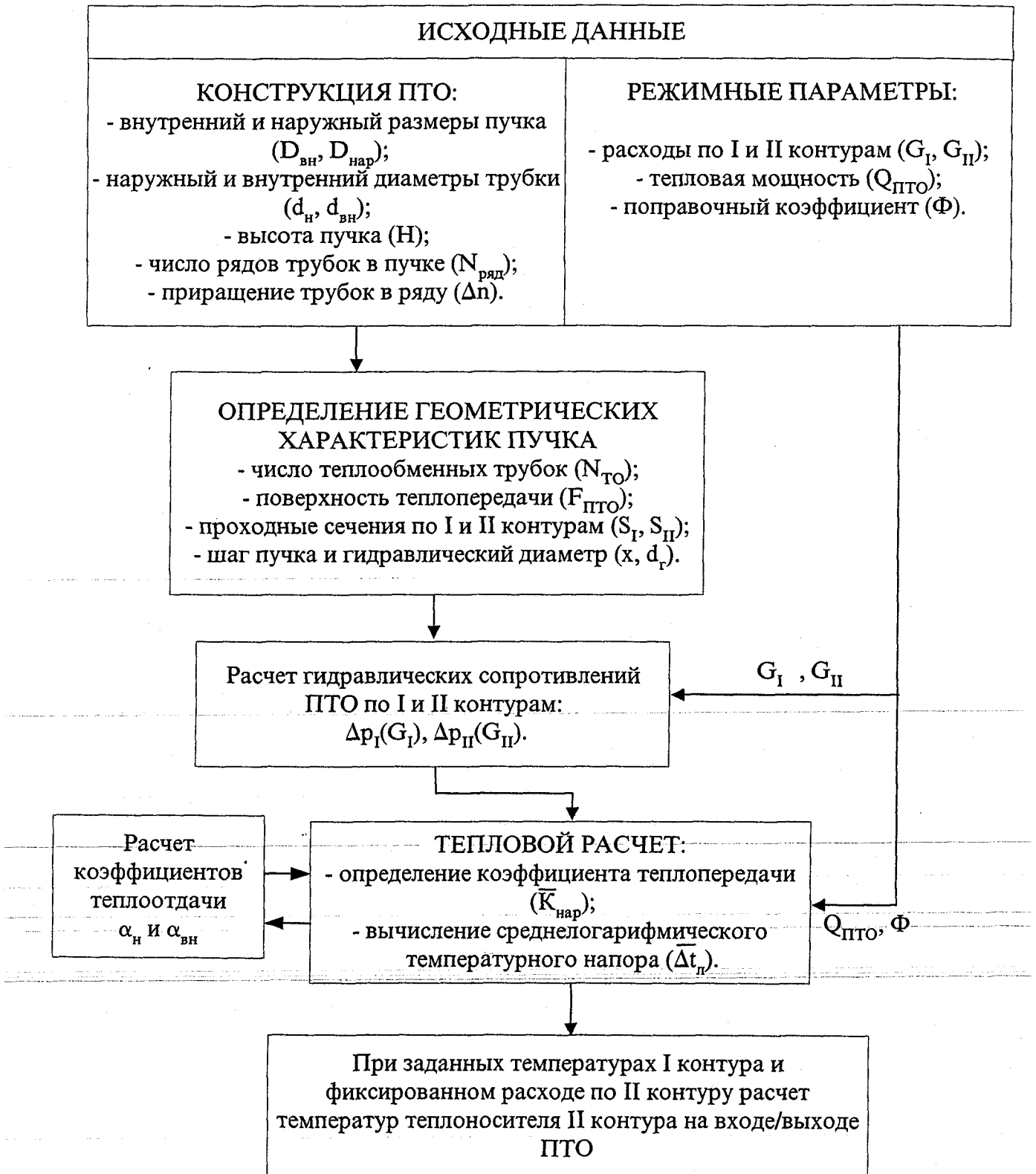


Рис. 1.4 Схема теплогидравлического расчета ПТО

Сопротивление трассы теплоносителя I-ого контура рассчитывается как сумма местных гидравлических сопротивлений различных участков трассы (подробное описание методики расчета приведено в литературе /1/). Величина $\Delta p_{зан}$ задается как доля величины $\Delta p_{дон}$ и характеризует погрешность определения сопротивления активной зоны. Помимо расчета напора насоса $H(Q, n)$ методикой предусмотрено определение минимально допустимого давления газа в баке реактора: p_r^{\min} . Величина давления определяется из условия безкавитационной работы насоса. Этим заканчивается расчет на l-ом шаге итераций по T_{ex} .

Значение температуры теплоносителя на входе в активную зону определяется из условия:

$$\Delta \tilde{p}_{AZ}(\vec{G}_{l*}) = \Delta p_{дон, l*},$$

и представляет собой максимально возможное значение, при котором выполняются перечисленные выше ограничения и условия. При расчете распределения расходов по ТВС различных зон дросселирования $\vec{G} \equiv \{G_j^k\}$ и температуры на входе в активную зону T_{ex} использовался метод деления отрезка пополам. Завершается расчет определением температуры теплоносителя 2 контура на выходе из ПТО при известных температурах T_{ex} , $T_{вых}$ и температуре $T_{ex}^{ПТ} = T_*$. При этом используется значение среднелогарифмического температурного напора ПТО $\Delta \bar{t}_л$, характеризующего термическую эффективность теплообменника.

Теплогидравлический расчет ТВС, схема которого приведена на рисунке 1.3, выполняется в несколько этапов. Тепловой и гидравлический расчеты разделены между собой. При заданном расходе через ТВС распределение расходов по элементарным каналам пучка определяется с использованием модели изобарного течения /44, 45, 46/, в соответствии с которой межтвэльное пространство представляется в виде совокупности параллельных, изолированных друг от друга на всей длине пучка элементарных каналов трех типов: центральный (ромбический), пристенный (прямоугольный) и угловой. Методикой предусмотрен расчет геометрических характеристик элементарных каналов для трех типов пучков, описание которых дано в /1/: плотно сжатый пучок («зажатый» пучок), равномерно распределенный пучок и раздвинутый пучок (твэлы отжаты до касания

с чехлом). Дистанционирование твэлов в пучке осуществляется либо решетками, либо проволокой (лентой), навитой на твэл. Для более равномерного распределения расхода теплоносителя по сечению ТВС в периферийных каналах могут размещаться вытеснители. В соответствии с принятой моделью течения распределения расходов и скоростей по элементарным каналам рассчитываются по следующим соотношениям:

$$\frac{W_j}{W_1} = \left(\frac{d_{Гj}}{d_{Г1}} \right)^\eta \quad \text{и} \quad \frac{G_j}{G_1} = \frac{F_j}{F_1} \cdot \left(\frac{d_{Гj}}{d_{Г1}} \right)^\eta, \quad \text{где}$$

$$\eta = (1+x)/(2-x),$$

x – показатель степени в зависимости $\lambda = f(\text{Re})$,

1 – центральный канал, 2 – пристенный, 3 – угловой.

Величины подогревов теплоносителя в элементарных каналах рассчитываются с использованием следующих соотношений (при $K_r^{TBC} = 1.0$):

$$\Delta \bar{t}_j = \Delta \bar{t}_{*TBC}^H \cdot k_j^{TBC},$$

$$\Delta \bar{t}_{*TBC}^H = \frac{N_{\text{твэл}} \cdot Q_{\text{твэл}}^{\max}}{G_{TBC} \cdot C_p},$$

$$Q_{\text{твэл}}^{\max} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot T^2 \cdot \frac{q_V^{\max}}{N_{\text{твэл}}} \cdot \int_{-H/2}^{+H/2} f(z) \cdot dz,$$

$$k_j^{TBC} = \bar{Q}_j \cdot \frac{\sum_k n_k \cdot F_k \cdot (d_{Гk})^\eta}{F_j \cdot N_{\text{твэл}} \cdot (d_{Гj})^\eta},$$

$$\sum_k n_k = N_{\text{твэл}} - 1.$$

Величина \bar{Q}_j – мощность (в долях от максимальной мощности твэла), выделяющаяся в канал j -того типа. Если ТВС содержит твэлы одного типа, то $\bar{Q}_1 = \bar{Q}_2 = 1.0$, а $\bar{Q}_3 = 7/6$. В противном случае в значения \bar{Q}_j необходимо внести коррективы с учетом распределения мощности по твэлам в ТВС.

Величина максимального подогрева в пучке (при $k_r^{TBC} = 1.0$) определяется по соотношению:

$$\Delta t_*^{\max} = \bar{\Delta t}_{*TBC} \cdot k_{\max}^{TBC}, \quad k_{\max}^{TBC} = \max_{j=1,3} (k_j^{TBC}).$$

В случае k_r^{TBC} отличного от 1.0 максимальный подогрев в пучке рассчитывается по формуле: $\Delta t^{\max} = \Delta t_*^{\max} \cdot F(k_r^{TBC})$. Величина $F(k_r^{TBC})$, учитывающая влияние межканального тепло- и массообмена на распределение подогревов по сечению пучка /47, 48, 49/, рассчитывается с использованием трехмерных кодов поканального теплогидравлического расчета ТВС /50, 51, 52/.

Распределение по длине активной части твэла температур теплоносителя, оболочки и топлива рассчитывается для элементарного канала с максимальным подогревом и твэла с максимальной мощностью в ТВС с использованием следующих соотношений:

$$t_{мен}(z) = T_{ex} + [\alpha_{HTЗВ} + m(z)] \cdot \Delta t_*^{\max} \cdot F(k_r^{TBC}),$$

$$m(z) = \left(\int_{\frac{H}{2}}^z f(z') \cdot dz' \right) / \left(\int_{\frac{H}{2}}^{+\frac{H}{2}} f(z') \cdot dz' \right),$$

$$t_{об}^{внут}(z) = t_{мен}(z) + \Delta t_{\alpha}(z) + \Delta t_{об}(z),$$

$$t_{топ}^{внут}(z) = t_{об}^{внут}(z) + \Delta t_{кон}(z) + \Delta t_{топ}(z).$$

Соотношения для расчета температурных перепадов Δt_{α} , $\Delta t_{об}$, $\Delta t_{кон}$ и $\Delta t_{топ}$ (в сечении с координатой z) приведены в литературе /1/. Соотношения получены при решении одномерного уравнения теплопроводности для многослойного бесконечного цилиндра (полагалось, что тепловые потоки в осевом направлении пренебрежимо малы по сравнению с потоками в радиальном направлении). Помимо номинальных значений температур оболочки и топлива, методикой предусмотрен расчет в каждом сечении по высоте температур топлива и оболочки с учетом факторов перегрева:

$$t_{об,фак}^{внут}(z) = t_{об}^{внут}(z) + \Delta t_{фак}^{об}(z),$$

$$t_{топ,фак}^{внут}(z) = t_{топ}^{внут}(z) + \Delta t_{фак}^{топ}(z).$$

Соотношения для расчета отклонений $\Delta t_{фак}^{об}$ и $\Delta t_{фак}^{топ}$ даны в /53/. При проведении теплового расчета ТВС распределение энерговыделения по высоте задается в виде табличных значений $f_j = f(z_j)$. Соответственно, результаты расчетов температур топлива и оболочки представляются в виде наборов чисел.

Методикой предусмотрено разбиение активной части твэла на 8 участков, каждый из которых может быть разбит на 20 равных частей. Данная форма представления энерговыделения позволяет рассчитывать температурные поля для распределений с разрывами, которые возникают на границе двух зон с различным содержанием делящихся изотопов. Заканчивается тепловой расчет определением следующих величин:

$$t_{об}^{max} = \max_j \{t_{об}^{внут}(z_j)\}, \quad t_{об, фак}^{max} = \max_j \{t_{об, фак}^{внут}(z_j)\},$$

$$t_{мон}^{max} = \max_j \{t_{мон}^{внут}(z_j)\}, \quad t_{об, фак}^{max} = \max_j \{t_{мон, фак}^{внут}(z_j)\}.$$

Гидравлическое сопротивление ТВС рассчитывается по следующим соотношениям:

$$\Delta p_{ТВС}(G_{ТВС}) = \Delta p_{пуч} + \sum_j \Delta p_{mj},$$

$$\Delta p_{пуч} = \sum_k \left(\lambda_k \cdot \frac{l_k}{d_{Г1}} + n_{реш}^{(k)} \cdot \xi_{реш} \right) \cdot \frac{\rho(\bar{T}_k) \cdot W_{1,k}^2}{2},$$

$$\Delta p_{mj} = \xi_{mj} \cdot \frac{G_{ТВС}^2}{2 \cdot \rho(T_j) \cdot F_j^2}, \quad \text{где}$$

j — номер участка с местным сопротивлением, k — номер участка пучка твэлов.

Соотношения, используемые при расчете λ_k , $\xi_{реш}$ и ξ_{mj} , приведены в литературе /54, 55, 56/. Гидравлическое сопротивление пучка рассчитывается по характеристикам центрального канала для модели плотно сжатого пучка: $d_{Г1}$, W_1 и т.д.

Основные положения методики теплогидравлического расчета ПТО (смотри рисунок 1.4) заимствованы из работ /57, 58/. Тепловой и гидравлический расчеты выполняются раздельно. Тепловой расчет ПТО выполняется с использованием модели чистого противотока в точечном приближении. Используются следующие соотношения для расчета величины среднелогарифмического температурного напора ($\bar{\Delta t}_л$):

$$\bar{\Delta t}_л = \frac{Q_{ПТО} \cdot \Phi}{F_{ПТО} \cdot \bar{k}_{нар}},$$

$$\bar{k}_{нар} = \frac{1}{\frac{d_n}{d_{вн}} \cdot \frac{1}{\alpha_{вн}} + \frac{1}{\alpha_n} + \frac{d_n}{2 \cdot \lambda_{ст}} \cdot \ln \left(\frac{d_n}{d_{вн}} \right)}$$

Коэффициент Φ характеризует отличие $\Delta \bar{t}_n$ в реальном ПТО от температурного напора, получаемого по модели чистого противотока при той же тепловой мощности $Q_{ПТО}$, и определяется на основе опыта проектирования и эксплуатации теплообменников подобной конструкции. Соотношения для расчета коэффициентов теплоотдачи $\alpha_{вн}$ и α_n даны в /55, 56/. С использованием $\Delta \bar{t}_n$ определяются температуры теплоносителя II контура (при заданных температурах I контура и расходе теплоносителя II контура). Гидравлическое сопротивление ПТО по I контуру складывается из сопротивления пучка теплообменных труб (продольное и поперечное обтекание) и местных сопротивлений подвода/отвода теплоносителя. Гидравлическое сопротивление ПТО по II контуру складывается из гидравлических сопротивлений подвода/отвода теплоносителя к пучку трубок и сопротивления трения теплообменной трубки (с учетом входа в нее и поворотов потока на участкегиба). Подробное описание методики гидравлического расчета ПТО дано в работах /57, 58/.

Основные положения методики стационарного теплогидравлического расчета ПГ с жидкометаллическим теплоносителем приведены в литературе /1, 2/. За основу взяты методические разработки ОКБ Гидропресс и ФЭИ /59, 60, 61/, реализованные в виде программы теплогидравлического расчета парогенератора на докритические давления рабочего тела ТРП-5 /59/. Для случая закритических давлений воды/пара автором разработана аналогичная методика, подробное описание которой приведено в работе /2/. Цель расчета — определение изменения давления и распределения температур теплоносителя и рабочего тела вдоль теплообменной трубки. В зависимости от граничных условий различают поверочный и конструкторский расчеты. Тепловой и гидравлический расчеты выполняются отдельно, причем последний проводится по результатам теплового расчета. Для проведения теплового расчета используются данные предварительных гидравлических расчетов теплообменных трубок по тракту рабочего тела. Считается, что рабочее тело находится внутри трубок, а теплоноситель в межтрубном пространстве.

Теплогидравлический расчет ПГ, схема которого приведена на рисунке 1.5, предусматривает соответствующий расчет модулей различного функционального назначения: испарителя (И), пароперегревателя (ПП) и промпароперегревателя (ППП). На рисунке рассмотрен вариант поверочного расчета ПГ. Считается, что в пределах одного модуля конструкция теплообменных трубок одинакова, и все они работают в одинаковых условиях.

При проведении теплового расчета используются температурные зависимости свойств рабочего тела при фиксированных значениях давления, полученные на основе высокоточных уравнений расчета свойств воды/пара.

На рисунке 1.6 приведена схема теплогидравлического расчета пучка теплообменных трубок одного из модулей. Для выполнения теплового расчета теплообменной трубки последняя разбивается на участки, каждому из которых ставится в соответствие давление и определенный механизм теплообмена со стороны воды/пара. В случае докритических давлений ($40 \text{ ат} \leq p \leq 215 \text{ ат}$) трубка разбивается на следующие участки (по ходу рабочего тела): подогревательный, поверхностного кипения, развитого пузырькового кипения, ухудшенного теплообмена и перегрева пара. Последний участок разбивается на два подучастка: перегрева от t_s до $(t_s + 40 \text{ }^\circ\text{C})$ и от $(t_s + 40 \text{ }^\circ\text{C})$ до t_0 . В случае закритических давлений ($p \geq 230 \text{ ат}$) с целью учета зависимости теплофизических свойств воды от давления предусматривается разбиение трубки на 10 участков (с единым механизмом теплообмена).

Для каждого участка трубки решается система одномерных дифференциальных уравнений теплового баланса и теплопередачи, записанная для сечения с координатой (l):

$$\frac{dT(l)}{dl} = \frac{k_{\text{вн}} \cdot \Pi}{G \cdot C_p} \cdot [T(l) - t(l)], \quad \frac{dt(l)}{dl} = \frac{k_{\text{вн}} \cdot \Pi}{D} \cdot [T(l) - t(l)],$$

$$k_{\text{вн}} = \frac{A}{\frac{d_{\text{вн}}}{d_n} \cdot \frac{1}{\alpha_m} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}(n)}} + \frac{d_{\text{вн}}}{2 \cdot \lambda_{\text{эфф}}} \cdot \ln \left(\frac{d_n}{d_{\text{вн}}} \right)}$$

A — поправочный коэффициент для корректировки $k_{\text{вн}}$, $\lambda_{\text{эфф}}$ — эффективная теплопроводность. В случае одностенной трубки $\lambda_{\text{эфф}} = \lambda_{\text{ст}}(t_{\text{ст}})$, а в случае двустенной трубки рассчитывается по специальной формуле с использованием контактной проводимости зазора [2]. В последнем случае допускается использование трубок из различных материалов.

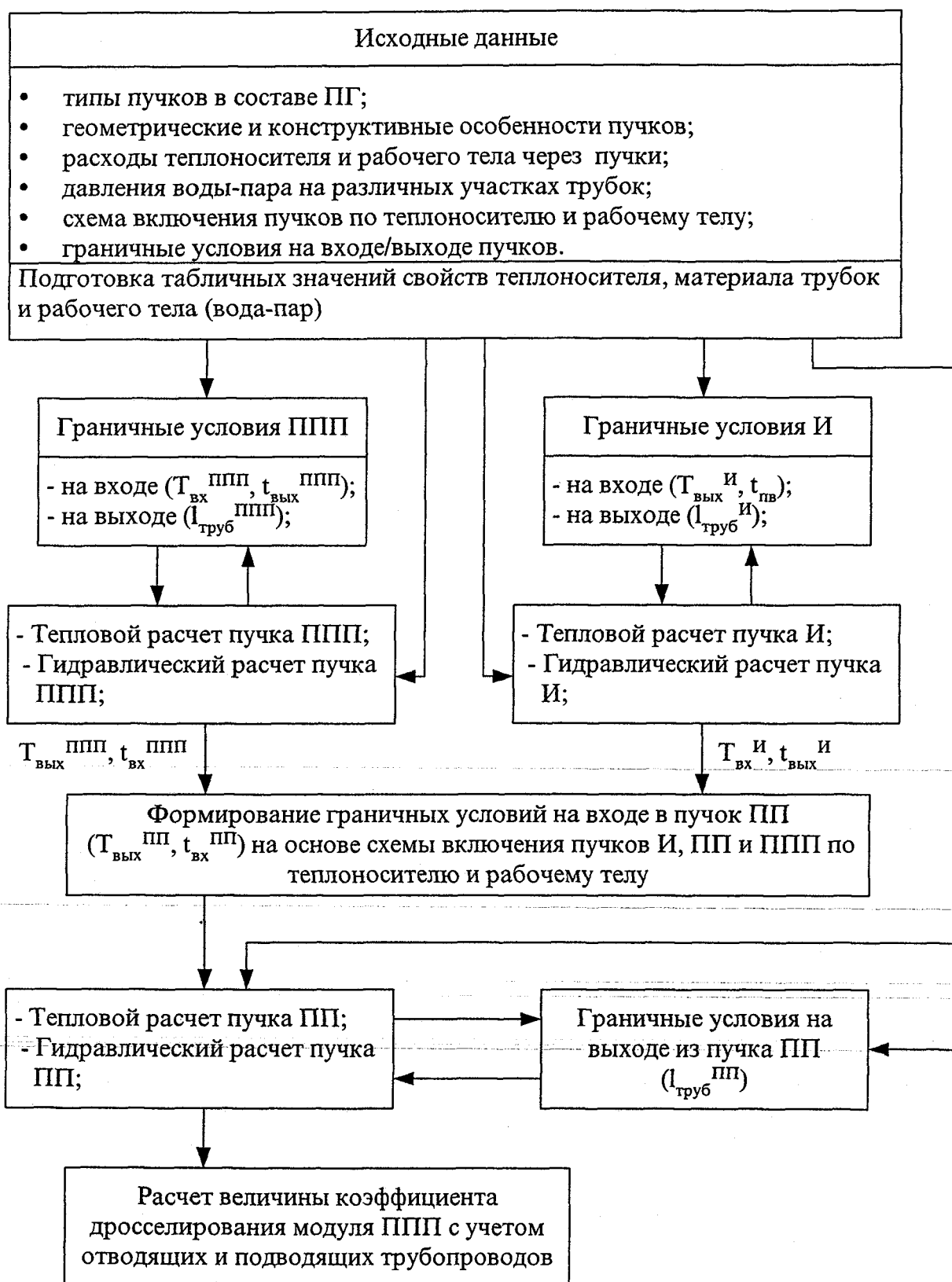


Рис. 1.5. Схема теплогидравлического расчета ПГ

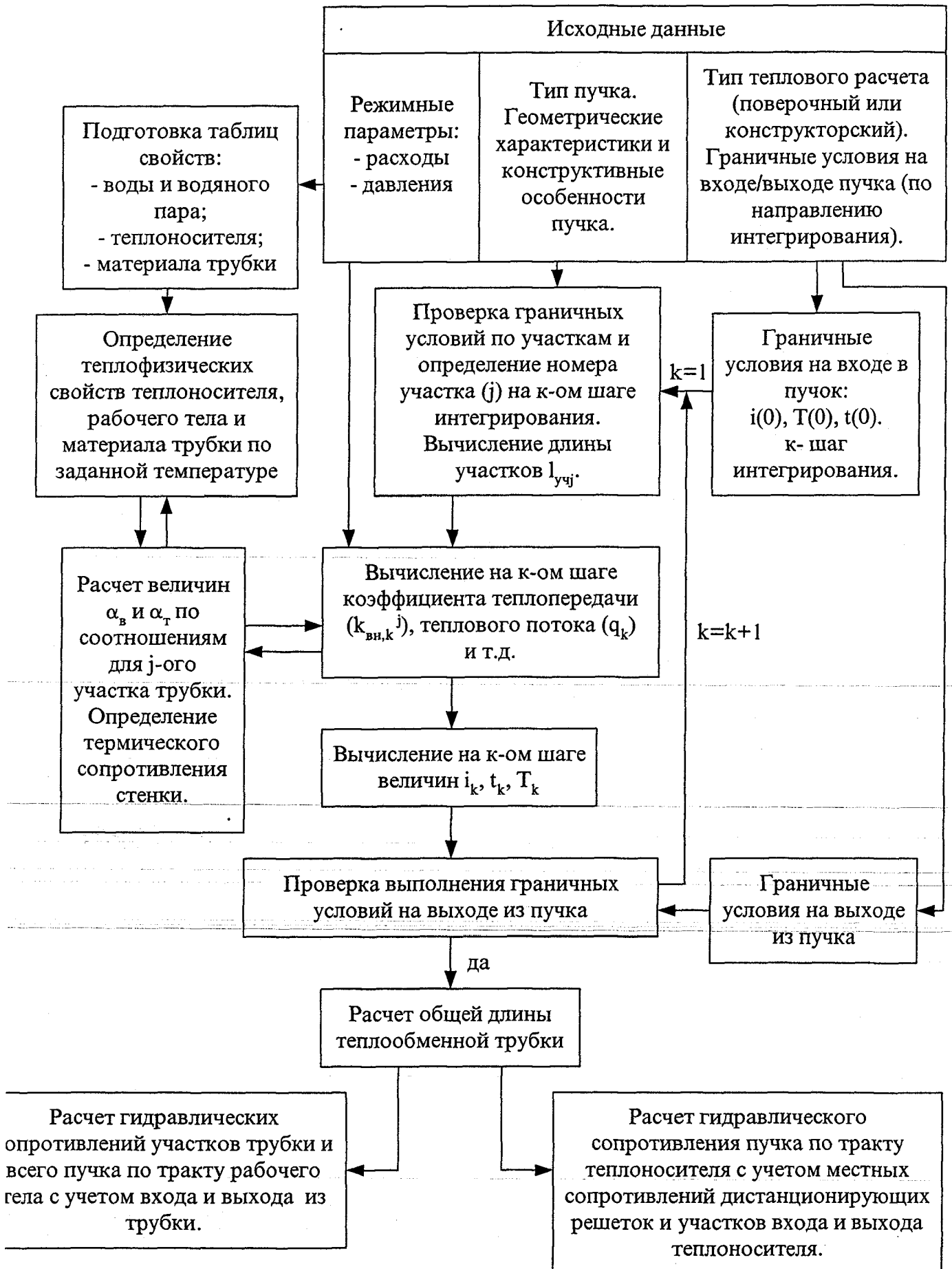


Рис. 1.6. Схема теплогидравлического расчета пучка теплообменных трубок

Подробное описание соотношений, позволяющих рассчитывать для различных участков величины $\alpha_{в(п)}$ и α_m , приведены в работах /1, 2, 59-61, 63-79, 81/. Здесь же даны основные соотношения для расчета определяющих параметров (скорость, тепловой поток, Re и т.д.) и указаны области применимости соотношений.

Предусмотрен расчет коэффициентов теплоотдачи пучков теплообменных труб следующего конструктивного исполнения: прямотрубный (размещение трубок в треугольной решетке), труба в трубе (теплоноситель в кольцевом зазоре), витой с поперечным обтеканием теплоносителя (шахматное или коридорное расположение). При решении уравнений на каждом шаге интегрирования рассчитываются значения коэффициентов $\alpha_{в(п)}$, α_m и $k_{вн}$. Интегрирование системы дифференциальных уравнений выполняется с использованием уточненного метода Эйлера с постоянным шагом /62/.

Гидравлический расчет ПГ подразумевает определение гидравлических сопротивлений по трактам рабочего тела и теплоносителя следующих элементов: пучка теплообменных труб (с учетом входных и выходных участков), трубопроводов обвязки на раздающей и собирающей линиях (с учетом входа/выхода в корпус модуля, регулирующей и запорной арматуры) и буферной емкости (если она не совмещена с корпусом ПГ). Подробно методика гидравлического расчета изложена в литературе /60, 61/; соотношения для расчета местных коэффициентов и коэффициентов трения даны в /55, 56/.

Завершается гидравлический расчет ПГ определением величины коэффициента дросселирования пара в модуле промпароперегревателя с учетом подводящих и отводящих трубопроводов:

$$\mu_{др} = R_{ЦСД}^{вх} / R_{ЦВД}^{вых},$$

$$R_{ЦСД}^{вх} = R_{ЦВД}^{вых} - \Delta p_{ППП} - \Delta p_{трубоп}.$$

При определении параметров третьего контура и к.п.д. цикла использованы методические разработки ЦКТИ и ЛМЗ /80/, реализованные в виде программного комплекса расчета тепловой схемы турбоустановки. Тепловая схема III-его контура представляется в виде многоточечной модели. Для моделирования стационарных процессов расширения пара в проточной части турбоустановки и процессов теплопередачи в конденсаторе, сепараторе-пароперегревателе и системе регенеративного подогрева питательной воды предусмотрены следующие типовые

элементы: отсек, конденсатор, подогреватель. Различают 11 видов отсеков и 21 вид подогревателей, что позволяет достаточно детально моделировать процессы в третьем контуре.

Для каждого элемента модели, характеризующегося входящими и выходящими потоками рабочего тела с соответствующими термодинамическими параметрами, записываются уравнения баланса тепла, массы и закон преобразования энергии. Система уравнений баланса дополняется уравнениями теплопередачи в конденсаторе и подогревателях, а также формулами расчета термической эффективности и гидравлических характеристик в соответствии с функциональным назначением элементов. Система уравнений решается с использованием методов простых итераций и деления отрезка пополам. Последовательность расчета следующая – при заданном расходе питательной воды и параметрах пара перед турбиной на каждом шаге итерации рассчитывается процесс расширения пара в проточной части основной турбины и турбины ПН, процессы конденсации в конденсаторе и изменения параметров воды в системе регенеративного подогрева. Итерации продолжаются до полной сходимости по расходам и термодинамическим параметрам каждого элемента.

Отсек моделирует одну или несколько ступеней проточной части турбины; несколько последовательно включенных отсеков позволяют моделировать цилиндр с отборами пара на подогреватели. Подробное описание видов отсеков приведено в литературе [1, 80], среди которых необходимо особо выделить следующие отсеки: расширения, дросселирования и последней ступени ЦНД. На рисунке 1.7 в координатах $i - s$ представлен процесс изменения параметров пара в отсеке расширения. Состояние (p_2, i_2) рассчитывается с использованием следующих соотношений:

$$i_2 = i_1 - (i_1 - i_2') \cdot \eta_{0i},$$

$$\eta_{0i} = \eta_{0i}^{cyx} \cdot (1 - A \cdot \gamma).$$

Коэффициент A , учитывающий влияние на относительный к.п.д. отсека (η_{0i}) , при влажности пара на выходе из него (γ) , а также относительный к.п.д. отсека η_{0i}^{cyx} при $\gamma=0$, определяются на основе опыта разработки и эксплуатации отсеков расширения. Величина η_{0i}^{cyx} задается в виде функции либо от отношения ρ_2 / ρ_1 , либо от объемного расхода пара через отсек.

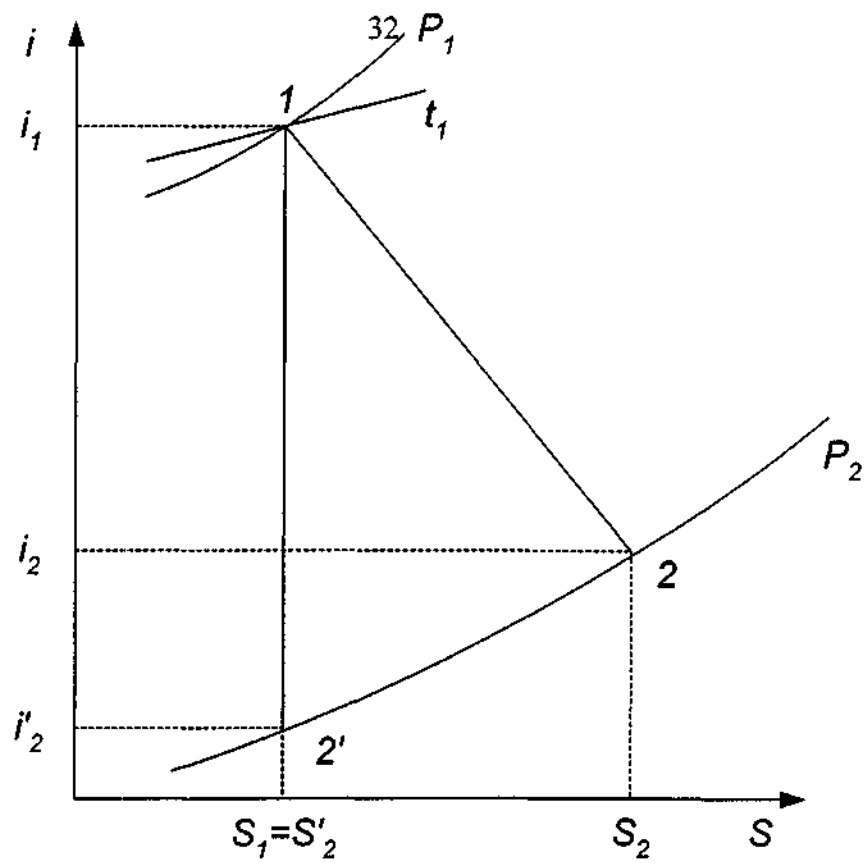


Рис 1.7. Процесс изменения параметров пара в отсеке расширения.

P_1 и P_2 - соответственно, давления пара на входе и выходе из отсека

i_1 и i_2 - соответственно, энтальпии пара на входе и выходе из отсека.

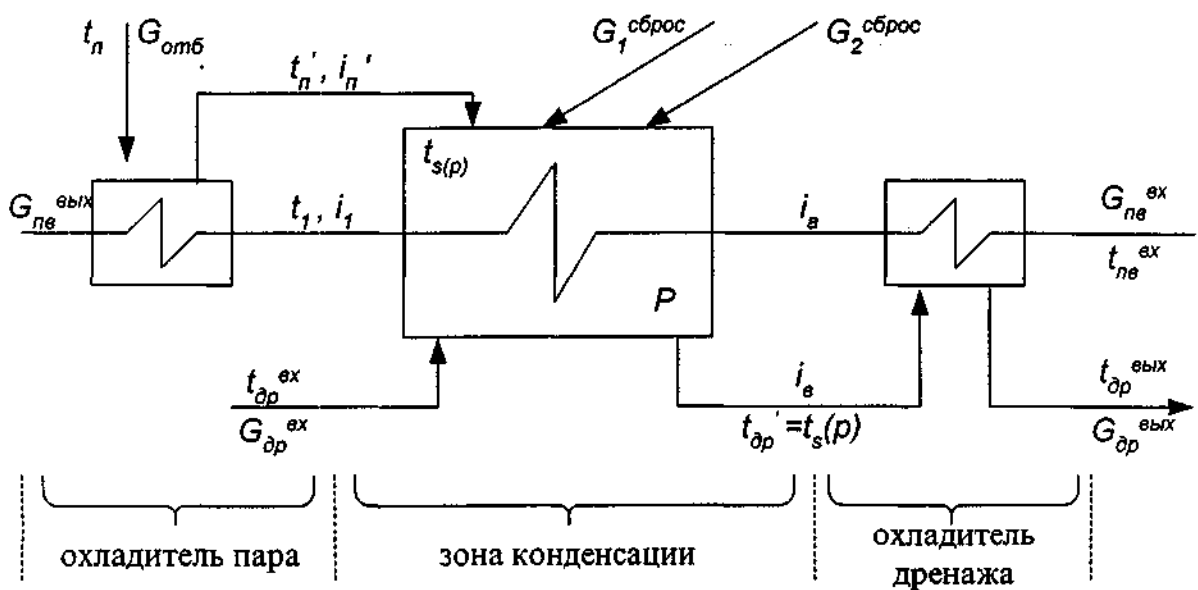


Рис. 1.8. Схема движения сред в подогревателе поверхностного типа.

Перепад давления на отсеке в зависимости от массового расхода пара через него определяется по формуле Флюгеля /80/. Для последних ступеней ЦНД дополнительно вводится расходная характеристика $GV=f(p_2/p_1)$ и универсальная зависимость $\eta_{0i}^{cyx}=f(GV/GV^*)$, GV - объемный расход пара. Отсек дросселирования представляет частный случай отсека расширения с $\eta_{0i}^{cyx}=0$. Изменение давления в отсеках сепарации и перегрева пара рассчитывается с использованием коэффициента дросселирования $\mu_{др}$.

На рисунке 1.8 приведена схема движения сред для подогревателя поверхностного типа. Моделируются следующие зоны: конденсации, охладитель пара, охладитель дренажа. В подогревателе моделируются процессы теплообмена с целью определения величины отбора греющего пара, необходимого для нагрева питательной воды до заданных параметров. Давление пара в подогревателе рассчитывается с учетом потерь давления при движении пара от отбора.

Конденсатор представляется в виде нескольких секций, в каждую из которых поступает пар из одного или нескольких потоков низкого давления. Различают несколько схем включения секций по охлаждающей воде и конденсату: параллельное или последовательное. Кроме пара и конденсата в секции может поступать вода из конденсаторов турбоприводов, протечки из уплотнений, конденсат из ПНД, вода после химводоочистки и т.д. Для каждой секции решаются уравнения теплопередачи и баланса тепла и массы. Величина коэффициента теплопередачи K_* при конденсации определена на основе экспериментальных данных по методике ЛМЗ /80/ и представлена в виде зависимости от скорости и средней температуры охлаждающей воды, степени загрязнения поверхности и диаметра теплообменной трубки.

Методика расчета процессов расширения пара в проточной части и конденсации пара в конденсаторе турбопривода питательного насоса аналогична методике расчета указанных процессов в основной турбине. Расчет турбопривода позволяет определить величину отбора пара, необходимого для обеспечения заданной мощности на валу насоса. Одновременно могут быть рассчитаны два турбопривода. Различают турбоприводы конденсационные и противоаварийные со сбросом пара в основную турбину или подогреватель.

1.3. Характеристика комплекса программ

В соответствии с приведенными выше методикой и алгоритмами разработан комплекс расчетных программ ССАПС-85, подробное описание которого приведено в работе /1/. За основу взяты программы теплогидравлического расчета отдельных узлов и оборудования энергоблока с реактором БН, разработанные в ФЭИ, ОКБМ, ОКБ Гидропресс, ПО ЛМЗ и ЦКТИ. При создании комплекса автором выполнен следующий цикл работ:

- поставлены и сданы в эксплуатацию в вычислительном центре ФЭИ программа расчета тепловой схемы III-его контура (разработка ЛМЗ – ЦКТИ) и программа теплогидравлического расчета ПГ с жидкометаллическим теплоносителем на докритические давления рабочего тела ТРП-5 (разработка ОКБ Гидропресс);
- программа ТРП-5 перенесена с ЭВМ БЭСМ-6 на ЭВМ ЕС и дополнена программными модулями расчета гидравлического сопротивления ПГ по трактам теплоносителя и рабочего тела и модулем расчета термического сопротивления двустенной трубки;
- разработан программный модуль теплогидравлического расчета ПГ на закритические давления воды;
- созданы программные модули теплогидравлического расчета ТВС, ПТО, трассы теплоносителя 1 контура; разработан программный модуль расчета распределения расходов теплоносителя по зонам дросселирования и определения параметров 1 контура с учетом напорной характеристики ГЦН-I и ограничений на рабочие характеристики и габариты оборудования;
- разработана программа-диспетчер, в которой сведены вместе входные и выходные параметры алгоритмов теплогидравлического расчета различных узлов и оборудования и тепловой схемы турбоустановки.

Организационно комплекс программ ССАПС-85 оформлен в виде трех библиотек:

- библиотеки исходных модулей теплогидравлического расчета отдельных узлов (библиотека пакетов);
- библиотеки файлов исходных данных;
- библиотеки заданий, формирующих различные последовательности и сочетания теплогидравлического расчета оборудования (библиотека вариантов программы-диспетчера).

Комплекс программ написан на алгоритмическом языке FORTRAN-IV и включает более 60 программных единиц общим объемом примерно в 6000 операторов. Программные единицы, используемые при теплогидравлическом расчете отдельного узла или оборудования, объединяются в пакет, который оформляется в виде SUBROUTINE с соответствующим именем. Различают пакеты теплогидравлического расчета следующих узлов: ТВС, активной зоны, ПТО, ПГ, напора ГЦН-I с учетом сопротивления трассы теплоносителя I-ого контура, а также пакет расчета параметров тепловой схемы турбоустановки. Каждый пакет имеет подпрограммы ввода исходных данных и печати результатов и может использоваться для проведения теплогидравлического расчета оборудования как отдельно, так и в комплексе с другими пакетами. В последнем случае передача необходимой информации между пакетами осуществляется через COMMON области. Управление режимами работы пакета осуществляется через формальные параметры SUBROUTINE.

В соответствии с поставленной задачей средствами программы-диспетчера оформляются связи между различными пакетами, и определяется последовательность выполнения теплогидравлических расчетов отдельных узлов установки. Каждой постановке задачи ставится в соответствие вариант задания, т.е. вариант программы-диспетчера.

Первоначально комплекс программ эксплуатировался на ЭВМ ЕС-1060, а затем на РС IBM. Ниже приведена характеристика запрашиваемых ресурсов и времен счета (для ЕС-1060):

- объем оперативной памяти	400 Кбайт
- временные затраты при расчете:	
*тепловой схемы турбоустановки	20÷30 с;
*свойств рабочего тела (при расчете ПГ)	~120 с;
*одного модуля ПГ ($l_{тр}=16$ м)	~20 с;
*параметров I, II контуров и теплогидравлики АЗ, ПТО и ТВС	180÷240 с.

Использование оверлейной структуры комплекса позволяет сократить необходимую оперативную память до ~190 Кбайт. Общее время счета задачи, представленной на рисунке 1.1, не превышает 12 минут.

ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ГЛАВЫ

1. Сформулирована задача и разработаны математическая модель, методика и алгоритм, а также комплекс расчетных программ определения параметров натриевых и пароводяного контуров, к.п.д. паросилового цикла и теплогидравлических характеристик активной зоны и основного технологического оборудования энергоблока с реактором БН с учетом ограничений на рабочие характеристики и габариты оборудования при фиксированной тепловой или электрической мощности.
2. Комплекс программ SCAPS-85 организован таким образом, что допускается работа модулей теплогидравлического расчета конкретного оборудования как отдельно, так и вместе с другими модулями. Разработаны специальные программные средства, позволяющие формировать различные последовательности и сочетания теплогидравлического расчета оборудования.
3. Разработаны методика, алгоритм и программа теплогидравлического расчета ПГ с жидкометаллическим теплоносителем на закритические давления рабочего тела ($p \geq 230$ ат).

ГЛАВА 2

ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО УЛУЧШЕНИЮ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГОБЛОКА СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ С РУ ТИПА БН-800 ЗА СЧЕТ УВЕЛИЧЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ И ПОВЫШЕНИЯ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА

В начале 90-ых годов проект Южно-Уральской АЭС (ЮАС), включающий три энергоблока с РУ БН-800 на быстрых нейтронах, успешно прошел техническую и экологическую экспертизу.

Несмотря на положительные результаты экспертизы, разработчики РБН отдают отчет в том, что проект РУ БН-800 не лишен недостатков: высокая стоимость строительства, высокая удельная металло- и материалоемкость. По этой причине с середины 80-ых годов обсуждается вопрос о модернизации проекта энергоблока с РУ БН-800. При этом реализацию модернизированного варианта связывают со строительством 2-ого и 3-его энергоблоков ЮАС.

Вопросу выбора и обоснования возможных путей модернизации проекта РУ БН-800 посвящено достаточно много работ /36, 37, 83, 34/, выполненных в разное время в ФЭИ, ОКБМ и СПб АЭП. В качестве целей модернизации рассматривается улучшение технико-экономических показателей энергоблока и повышение безопасности установки.

В данной главе представлены результаты выполненных автором оптимизационных исследований по улучшению технико-экономических показателей энергоблока с РУ типа БН-800 за счет повышения электрической мощности и увеличения выгорания топлива. В первом подразделе сформулирована цель исследований и дано описание вариантов энергоблока, а также характеристика основных технических и проектных решений, заимствованных из проекта РУ БН-800 и являющихся общими для выбранных вариантов энергоблока с различной тепловой мощностью. Приведено описание варьируемых параметров и характеристик. В следующих двух подразделах представлены результаты исследований по выбору оптимальных параметров РУ и характеристик активной зоны для двух вариантов энергоблока: с увеличенным выгоранием топлива и увеличенной тепловой мощностью. Оптимизировались конструкция и характеристики ТВС и значение температуры питательной воды. Сравнение

экономических показателей рассмотренных вариантов энергоблока с оптимальными параметрами дано в последнем подразделе главы.

Основные результаты исследований изложены в работах /30, 82, 84, 85, 92, 99+103/. При проведении исследований расчет параметров контуров, теплогидравлических характеристик активной зоны, температурного состояния ТВЭЛОВ, к.п.д. цикла и режимных параметров ПГ выполнялся в соответствии с методикой, разработанной автором и изложенной в главе 1, с использованием комплекса программ ССАПС-85.

2.1. Постановка задачи. Исходные данные и ограничения

Цель исследований – определение наиболее эффективного с точки зрения улучшения технико-экономических показателей пути усовершенствования энергоблока с РУ типа БН-800: повышение мощности или увеличение выгорания топлива.

В связи с этим рассмотрены следующие варианты энергоблока с модернизированной РУ БН-800М:

- БН-800М(І) – энергоблок тепловой мощностью 2100 МВт (как в проекте РУ БН-800) с пониженными температурами оболочек и увеличенным выгоранием топлива за счет использования в качестве материала оболочек ТВЭЛОВ радиационно-стойких ферритно-мартенситных сталей (типа ЭП-450);
- БН-800М(ІІ) – энергоблок с увеличенной тепловой мощностью (2350 МВт), температурами оболочек $\sim 700^{\circ}\text{C}$ и максимальным выгоранием оксидного топлива 10-12% т.а. при использовании в качестве материала оболочек аустенитных сталей типа ЭП-172 х.д., ЧС-68 х.д.

При формировании вариантов за основу взяты проектные и технические решения РУ БН-800. Так, рассмотрен энергоблок с тремя теплоотводящими петлями І-ого контура, тремя петлями ІІ-ого контура и одной турбоустановкой. Компоновка основного оборудования первого контура – интегральная.

Система аварийного расхолаживания строится по типу САРХ РУ БН-800, в которой аварийное расхолаживание установки осуществляется через основные ПТО, соединенные промежуточным натриевым нерадиоактивным контуром с воздушными теплообменниками (ВТО) САРХ. В состав теплоотводящей петли І контура входят два ПТО и один ГЦН-І, в состав петли ІІ контура: два ПТО, один

ПГ и один ГЦН-II. Рассматривается выносной вариант системы очистки теплоносителя I контура (по типу аналогичной системы РУ БН-800), размещенной в специально предусмотренных помещениях.

По сравнению с проектом РУ БН-800 сохранена неизменной конструкция следующих узлов и систем реактора:

- бака реактора (включая коническую крышу с патрубками для размещения ГЦН-I и ПТО), поворотных пробок, колонны СУЗ и механизма перегрузки ТВС;
- центральной части реактора, включающей напорную камеру с модульными коллекторами, напорные трубопроводы (от ГЦН-I к напорной камере) и нейтронную подпорку, формирующую выемную часть РУ;
- транспортно-технологического тракта (в пределах корпуса реактора);
- опорного пояса и внутрикорпусных конструкций (обечаек, перегородок), формирующих зоны горячего и холодного теплоносителя в объеме бака реактора.

Принята гидравлическая схема циркуляции натрия I контура с отдельным всасом ГЦН-I (предполагается использование обратного клапана, встроенного в ГЦН-I).

В составе I контура РУ БН-800М(I) и БН-800М(II) применены ПТО и ГЦН-I, разработанные для реактора БН-600М.

Технические характеристики и рабочие параметры ГЦН-I и ПТО реактора БН-600М приведены в работе /86/.

Конструктивно транспортно-технологический тракт (внеакторная часть) и вспомогательные системы I и II контуров выполнены так же как в проекте РУ БН-800.

Принципиальным моментом для обоих вариантов модернизации РУ БН-800 является организация повышенного по отношению к проектному варианту РУ БН-800 расхода теплоносителя в I контуре.

В целях увеличения расхода теплоносителя I контура в РУ БН-800М(I) и БН-800М(II) помимо применения нового ГЦН-I с увеличенной производительностью предполагается увеличить число рабочих ТВС до 703 штук.

Увеличение числа рабочих ТВС на 138 штук (с 565 штук в проекте РУ БН-800 до 703 штук в вариантах РУ БН-800М(I) и БН-800М(II)) достигается за счет полного исключения боковой зоны воспроизводства (90 сборок) и размещения части рабочих ТВС (48 штук) в ячейках, предназначенных под шестигранники

первичной защиты ВРХ. Исключение боковой зоны воспроизводства (БЗВ) сопровождается увеличением доли мощности, выделяющейся в рабочих ТВС, на ~2.5%.

В таблице 2.1 представлено распределение ячеек центральной части по зонам реактора для активных зон РУ БН-800М(І) и БН-800М(ІІ) и проектного варианта активной зоны РУ БН-800. Сетка СУЗ соответствует проектному варианту активной зоны РУ БН-800. Функциональное назначение органов СУЗ и их количество приведено в работе /87/.

Принят вариант сменной нейтронной защиты, состоящей из трех рядов сборок с V_4C . Это позволяет организовать ВРХ объемом примерно в два ряда (177 ячеек) на периферии выемной части РУ.

Расчетные исследования /24, 84/ показывают, что при мощности реактора 2350 МВт и сроке службы 60 лет принятый вариант сменной нейтронной защиты позволяет обеспечить величину флюенса нейтронов на несменяемые конструкции ниже значения, принятого в проекте РУ БН-800.

Активная зона собирается из ТВС, конструктивно выполненных по типу рабочих сборок РУ БН-800. По отношению к проектному варианту сохранены неизменными следующие элементы ТВС:

- конструкция и размеры головки и хвостовика;
- габариты ТВС по высоте (3500 мм);
- конструкция и размеры пучка пэлов (верхний торцевой экран);
- размер натриевой полости между пучком твэлов и пучком пэлов верхнего поглощающего экрана;
- узел крепления пучка твэлов в ТВС;
- длина твэла, активной части и нижней торцевой зоны воспроизводства;
- размеры верхнего и нижнего газосборников;
- число твэлов в пучке.

Рассмотрены три варианта ТВС, различающиеся размерами чехла, оболочек твэлов и дистанционирующих элементов:

- вариант с чехлом 94.5x2.5 мм и 127 твэлами $\varnothing 6.6 \times 0.40$ мм (проект РУ БН-800);
- вариант с увеличенными размерами чехла (96x2.0 мм) и неизменными размерами оболочек твэлов ($\varnothing 6.6 \times 0.40$ мм);
- вариант с чехлом 96x2.0 мм и 127 твэлами размером $\varnothing 6.9 \times 0.55$ мм.

Геометрические характеристики вариантов ТВС приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.1

Распределение ячеек центральной части РУ по зонам реактора для вариантов активных зон с различным числом рабочих ТВС

Тип реакторной установки	БН-800	БН-800М(I,II)
Число рабочих ТВС, шт.	565	703
Количество органов СУЗ, шт.	30	30
Боковая зона воспроизводства (БЗВ), шт.	90	-
Сменные шестигранники первичной защиты ВРХ (стальные шестигранники и шестигранники с карбидом бора), шт.	360	325
Ячейки ВРХ	188	175
Общее число ячеек центральной части РУ, шт.	1233	

Таблица 2.2

Основные геометрические характеристики рабочих ТВС активных зон РУ БН-800М(I) и БН-800М(II)

Вариант ТВС	1	2	3	
Габариты ТВС по высоте, мм	3500			
Длина твэла, мм	2000			
в том числе, активная часть, мм	880			
нижняя торцевая зона воспроизводства, мм	350			
общая длина газосборника, мм	717			
Размер чехла, мм	94.5x2.5	96x2.0	96x2.0	
Число твэлов в ТВС, шт	127			
Размеры оболочки твэла, мм	6.6x0.40	6.6x0.40	6.9x0.55	
Диаметр дистанционирующей проволоки, мм	1.15	1.35	1.05	
Размеры дистанционирующей ленты, мм	0.6x1.30			
Шаг размещения твэлов в пучке, мм	7.75	7.95	7.95	
Относительный шаг пучка, отн. ед.	1.174	1.205	1.152	
Состав ТВС:	доля топлива	0.388		
	доля стали	0.219	0.206	0.247
	доля натрия	0.393	0.406	0.365

При выборе размеров оболочек ТВЭЛов доля топлива сохранялась неизменной и равной 0.388. Последнее позволяет в первом приближении сохранить неизменными нейтронно-физические характеристики активной зоны.

В качестве материала оболочек ТВЭЛов рассматривались улучшенные аустенитные стали и ферритно-мартенситные стали (типа ЭП-450).

Для всех вариантов ТВС чехол выполнен из слабораспухающей стали ЭП-450.

Конструкция органов СУЗ и сборок с V_4C РУ БН-800М(I) и БН-800М(II) совпадает с конструкцией соответствующих элементов РУ БН-800.

Рассматривается вариант активной зоны с оксидным уран-плутониевым топливом с выравниванием распределения энерговыделения тремя зонами обогащения. Для обеспечения отрицательного значения пустотного эффекта реактивности высота активной части ТВЭЛА ограничена величиной 88 см (проект РУ БН-800 /87/). Расстояние между центрами соседних ТВС принималось как в проекте РУ БН-800: 100 мм.

В соответствии с принятыми характеристиками ГЦН-I, габаритами и конструкцией активной зоны и ее элементов для различных вариантов ТВС определены значения расхода теплоносителя I контура, гидравлическое сопротивление активной зоны и рабочие параметры ГЦН-I реакторов БН-800М(I) и БН-800М(II) (таблица 2.3). Под гидравлическим сопротивлением активной зоны понимают суммарное сопротивление ТВС и модульного коллектора.

Таблица 2.3

Расход теплоносителя в I контуре, гидравлическое сопротивление активной зоны и характеристики ГЦН-I (номинал) для варианта активной зоны с 703 рабочими ТВС различного конструктивного исполнения

Вариант ТВС		1	2	3
Геометрия ТВС	чехол, мм	94.5x2.5	96x2.0	96x2.0
	оболочка ТВЭЛА, мм	6.6x0.40	6.6x0.40	6.9x0.55
Суммарный расход теплоносителя через ПТО, кг/сек		9769	10285	9769
Гидравлическое сопротивление активной зоны, 10^5 Па		6.32	6.02	6.32
Номинальные параметры ГЦН-I	производительность, $м^3/сек$	3.963	4.162	3.963
	напор, м.ст.жидкости	81.1	78.2	81.1

При проведении расчетов сделаны следующие предположения.

а). Гидравлические характеристики несменных участков трассы теплоносителя I контура (внутрикорпусная защита, опора ПТО, участок ПТО-ГЦН, напорный трубопровод) принимались в соответствии с данными /88/. Гидравлическая характеристика ПТО (по I контуру) принималась согласно данным /86/.

б). Гидравлические характеристики отдельных участков ТВС (хвостовик, вход в пучок, пучок пэлов, выход ТВС), а также модульного коллектора приняты согласно данным /89/.

в). Принято следующее распределение расхода теплоносителя по элементам и узлам РУ:

- на охлаждение корпуса реактора и опор ГЦН-I - 470 кг/с;
- на охлаждение шестигранников сменной нейтронной защиты и ТВС ВРХ - 400 кг/сек;
- на охлаждение органов СУЗ - 110 кг/сек.
- протечки через уплотнения - 430 кг/сек.

В составе энергоблоков с РУ БН-800М(I) и БН-800М(II) предусмотрено использование (в количестве трех штук) парогенераторов секционнно-модульного типа, спроектированных для РУ БН-800 /90/. Передача увеличенной мощности при различных значениях температуры питательной воды (210 и 250°C) обеспечивается за счет повышения расхода теплоносителя II контура, и соответственно, температуры теплоносителя на выходе из парогенератора при сохранении теплообменной поверхности.

Температура теплоносителя на входе в парогенератор принималась равной 505°C, что обусловлено выбором в качестве материала теплопередающих трубок модуля пароперегревателя стали IX2M. Параметры пара на выходе из парогенератора принимались в соответствии с проектом РУ БН-800: давление 140 ата, температура 490°C.

В таблице 2.4 приведены результаты расчетов параметров II контура в зависимости от мощности установки и температуры питательной воды. В таблице 2.5 приведены диапазоны изменения основных режимных параметров парогенератора.

Таблица 2.4

Параметры теплоносителя II контура вариантов РУ БН-800М(I) и БН-800М(II)

Вариант энергоблока		БН-800М(I)	БН-800М(II)
Тепловая мощность, МВт		2100	2350
Температура питательной воды, °С	210	309/505	316/505
	250	323/505	331/505

Таблица 2.5

Диапазон изменения
основных режимных параметров ПГ

Характеристика	Диапазон
Тепловая мощность ПГ, МВт	700÷783
Массовая скорость воды, кг/м ² сек	882÷1069
Граничное паросодержание, отн. ед.	0.346÷0.382
Перегрев пара в модуле испарителя, °С	28÷34
Максимальный тепловой поток в начале зоны ухудшенного теплообмена испарителя, Вт/м ²	773000÷829000
Расход теплоносителя II контура (за единицу принят расход в проектном варианте параметров II контура РУ БН-800)	1.0÷1.26

С увеличением единичной мощности петли и повышением температуры питательной воды возрастает расход теплоносителя во II контуре. Оценки показывают, что для варианта РУ БН-800М(II) с тепловой мощностью 2350 МВт и температурой питательной воды 250°С расход теплоносителя во II контуре на ~26% выше соответствующей величины в проекте РУ БН-800. Несмотря на увеличение скорости теплоносителя размеры трубопроводов II контура - диаметр и толщина стенки - сохранены такими же, как в проекте РУ БН-800. При этом максимальная скорость теплоносителя не превысит ~8.3 м/сек. Для сравнения максимальная скорость теплоносителя в трубопроводах II контура реактора EFR составляет ~8 м/сек /91/.

Компенсация тепловых расширений трубопроводов II контура энергоблоков с РУ БН-800М(I) и БН-800М(II) обеспечивается за счет самокомпенсации (компенсация гибоми).

В составе петли II контура энергоблоков с РУ БН-800М(I) и БН-800М(II) предполагается использовать ГЦН-II РУ БН-800, прошедший предварительную модернизацию, что обусловлено увеличением расхода теплоносителя и гидравлического сопротивления II контура. Модернизация затрагивает проточную часть насоса (рабочее колесо, узел подвода теплоносителя) и электродвигатель с системой регулирования числа оборотов.

В составе энергоблоков с РУ БН-800М(I) и БН-800М(II) предполагается использовать модернизированную турбоустановку К-800-130/3000. Модернизация турбо-установки, имеющая целью увеличение мощности турбины за счет повышения к.п.д. цикла и увеличения расхода пара, предусматривает следующую доработку проекта турбоустановки К-800-130/3000 /26/:

- увеличение количества ЦНД с 2-х до 3-х штук;
- повышение температуры питательной воды с 210-215°С до 240-250°С за счет установки второго ПВД с запиткой его греющим паром из камеры поворота потока в ЦВД;
- изменение конструкции проточной части ЦВД с целью пропуска увеличенного расхода пара.

Расчеты показывают, что реализация перечисленных выше мер позволяет увеличить к.п.д. (нетто) машзала - отношение электрической мощности на клеммах генератора к отпускаемой тепловой мощности на турбоустановку - с ~39.7% до ~40.8%, обеспечить приемлемые условия работы последних ступеней ЦНД и оптимальное значение вакуума в конденсаторе при увеличенных расходах пара.

Обсуждение вопроса модернизации турбоустановки К-800-130/3000 с представителями ЛМЗ /93/ показало следующее:

- использование существующего вспомогательного оборудования в составе модернизированной турбоустановки с увеличенной электрической мощностью возможно, но требует детального рассмотрения и согласования с поставщиками;
- по стоимости турбоустановка практически не будет отличаться от турбоустановки для головного энергоблока с РУ БН-800.

На основе принятых исходных данных и ограничений ставилась задача определить характеристики активных зон с различными вариантами ТВС, ресурс твэлов с оболочками из ферритно-мартенситных и аустенитных сталей и параметры контуров энергоблоков с РУ БН-800М(I) и БН-800М(II) с различной тепловой мощностью. В частности, была поставлена задача определить максимальную

тепловую мощность энергоблока, при которой максимальные температуры оболочек твэлов не превышают величины 700-710°C. На основе выполненных расчетных исследований максимальная тепловая мощность составила 2350 МВт.

2.2. Характеристики энергоблока с РУ БН-800М(И) тепловой мощностью 2100 МВт

В таблице 2.6 приведены параметры I, II контуров и тепловые характеристики твэлов РУ БН-800М(И) тепловой мощностью 2100 МВт для варианта активной зоны с 703 рабочими ТВС различного конструктивного исполнения.

Таблица 2.6

Параметры контуров и тепловые характеристики твэлов РУ БН-800М(И)
тепловой мощностью 2100 МВт для варианта активной зоны
с 703 рабочими ТВС различного конструктивного исполнения

		Вариант ТВС	1	2	3
Геометрия	чехол, мм		94.5x2.5	96x2.0	96x2.0
ТВС	размер оболочки, мм		6.6x0.40	6.6x0.40	6.9x0.55
Максимальная линейная мощность твэла, кВт/м			39.8		
Максимальная мощность ТВС, выделяющаяся в активной части твэлов, МВт			3.54		
Подогрев теплоносителя I контура, °C			169	160	169
Максимальный расход через ТВС, кг/сек			13.8	14.6	13.8
Гидравлическое сопротивление активной зоны, 10 ⁵ Па			6.32	6.02	6.32
Температура питательной воды 210°C	Параметры II контура, °C		309/505		
	Параметры I контура, °C		358/527	363/523	358/527
	Максимальная температура оболочки твэла (с учетом факторов перегрева), °C		664	656	675
Температура питательной воды 250°C	Параметры II контура, °C		323/505		
	Параметры I контура, °C		363/532	368/528	363/532
	Максимальная температура оболочки твэла (с учетом факторов перегрева), °C		670	661	681

Рассмотрены варианты параметров III-го контура с температурой питательной воды 210°C и 250°C. Из представленных в таблице данных видно, что для всех рассмотренных вариантов конструктивного исполнения ТВС и значений температуры питательной воды максимальная температура оболочек твэлов не превышает 680°C. Это позволяет использовать в качестве материала оболочек твэлов как аустенитные, так и ферритно-мартенситные стали (типа ЭП-450).

Для обоснования целесообразности использования в качестве конструкционного материала оболочек твэлов аустенитных или ферритно-мартенситных сталей для каждого из перечисленных в таблице 2.6 вариантов активных зон были рассчитаны значения ресурсов твэлов. Результаты расчетов приведены в таблице 2.7. При определении ресурса были сделаны следующие предположения.

а). В случае ферритно-мартенситных сталей ресурс твэла определялся по критерию длительной прочности. Для твэлов с оболочками из аустенитных сталей ресурс определялся по двум критериям - длительной прочности и допустимого формоизменения. (Из двух значений ресурса твэла, полученных по различным критериям работоспособности, выбиралось минимальное значение).

б). Считалось, что по критерию допустимого формоизменения облучение ТВС с оболочками твэлов из отечественных аустенитных сталей (ЧС-68 х.д., ЭП-172 х.д.) и чехлом из стали ЭП-450 возможно до доз 110 с.н.а.

в). При определении ресурса твэлов по критерию длительной прочности учитывалось, что максимальная температура оболочки твэла уменьшается в процессе выгорания топлива: 36°C на 10% т.а. При этом считалось, что для ограничения скорости коррозии максимальная температура (с учетом факторов перегрева) оболочки твэла из ферритно-мартенситной стали не должна превышать величины 690°C.

г). В случае аустенитных сталей использовались соотношения /94, 95, 96/, описывающие свойства длительной прочности облученной стали ЭП-172 х.д.. Свойства получены по итогам облучения в реакторе БН-350 газонаполненных трубок до доз ~60 с.н.а. В случае ферритно-мартенситных сталей использовались соотношения /94, 95, 96/, описывающие свойства длительной прочности облученной стали ЭП-450. Свойства получены по итогам облучения в реакторе БН-350 газонаполненных трубчатых образцов до доз 55-59 с.н.а. при температурах 630÷700°C.

Таблица 2.7

Ресурс твэлов с оболочками из аустенитных и ферритно-мартенситных сталей РУ БН-800М(1) тепловой мощностью 2100 МВт для варианта активной зоны с 703 рабочими ТВС различного конструктивного исполнения

		Вариант ТВС					
		1	2	3			
Геометрия ТВС	чехол, мм	94.5x2.5	96x2.0	96x2.0			
	размер оболочки, мм	6.6x0.40	6.6x0.40	6.9x0.55			
Температура питательной воды 210°C	Ресурс твэла, эфф. сут.	материал оболочки ЭП-450	критерий длительной прочности	641	656	806	
		аустенитные стали	длительная прочность	более 2470	более 2470	более 1300	
			допустимое формоизменение (повреждающая доза 110 с.н.а.)	634	634	634	
			минимальное значение ресурса	634	634	634	
	Рекомендуемый материал оболочки твэла		ферритно-мартенситная сталь				
	Расчетный ресурс твэла, эфф. суток		641	656	806		
	Максимальное выгорание топлива, % т.а.		12.6	12.9	15.8		
	Повреждающая доза, с.н.а		111	114	140		
	Температура питательной воды 250°C	Ресурс твэла, эфф. сут.	материал оболочки ЭП-450	критерий длительной прочности	631	646	793
			аустенитные стали	длительная прочность	2470	более 2470	более 1300
допустимое формоизменение (повреждающая доза 110 с.н.а.)				634	634	634	
минимальное значение ресурса				634	634	634	
Рекомендуемый материал оболочки твэла		Аустенитная сталь или ЭП-450	Ферритно-мартенситная сталь	Ферритно-мартенситная сталь			
Расчетный ресурс твэла, эфф. суток		634	646	793			
Максимальное выгорание топлива, % т.а.		12.4	12.7	15.6			
Повреждающая доза, с.н.а		110	112	138			

Из представленных в таблице 2.7 данных видно, что при использовании аустенитных сталей ресурс твэлов составит 634 эфф. суток, чему соответствует выгорание топлива 12.4% т.а. Применение ферритно-мартенситных сталей в качестве материала оболочек позволяет увеличить ресурс твэла. При этом необходимо отметить, что для твэла с оболочкой $\varnothing 6.6 \times 0.40$ мм, несмотря на относительно низкие температуры оболочек, увеличение ресурса составит $\sim 2.0-3.5\%$ относительных (в зависимости от геометрических характеристик чехла ТВС и значения температуры питательной воды). При фиксированном внутреннем диаметре оболочки увеличение ее толщины, несмотря на увеличение максимальной температуры, позволяет существенно увеличить ресурс твэла. Так, при размерах оболочки $\varnothing 6.9 \times 0.55$ мм ресурс твэла составит 806 эфф. суток и 793 эфф. суток, соответственно, при температуре питательной воды 210°C и 250°C . Увеличение температуры питательной воды с 210°C до 250°C помимо снижения ресурса твэла с оболочкой из ЭП-450 и увеличения затрат мощности на прокачку теплоносителя II контура с ~ 4.0 МВт до 5.0 МВт позволяет увеличить мощность на клеммах генератора с 848 до 858 МВт. (При определении затрат на прокачку теплоносителя II-ого контура предполагалось, что гидравлическое сопротивление контура при расходе 8420 кг/сек составляет 0.25 МПа.)

Выполненные исследования показывают, что увеличение температуры питательной воды с 210°C до 250°C позволяет получить экономический эффект ~ 1.70 млн. долларов США/год при коэффициенте нагрузки 0.8. При проведении расчетов принималось, что стоимость одной ТВС составляет 67600 долларов США /97/, стоимость 1 кВт-час — 3.14×10^{-2} долларов США (себестоимость электроэнергии блока № 4 БАЭС с реактором БН-800 /98/.

Затраты мощности на прокачку рабочего тела учтены при определении мощности на клеммах генераторов. Для всех рассмотренных вариантов активных зон затраты мощности на прокачку теплоносителя I-ого контура одинаковы.

На основе полученных результатов для последующих исследований в качестве основного принят вариант РУ с температурой питательной воды 250°C и активной зоной, содержащей 703 рабочих ТВС с чехлом 96×2 мм и 127 твэлами $\varnothing 6.9 \times 0.55$ мм. Характеристики указанного варианта РУ приведены в таблице 2.9.

Необходимо отметить, что одним из возможных вариантов повышения ресурса твэла с оболочкой из ферритно-мартенситной стали является увеличение толщины последней при фиксированном наружном диаметре твэла. Достоинством данного варианта является сохранение фактически неизменной максимальной

температуры оболочки при увеличении толщины последней. Расчеты показывают, что при переходе с оболочки $\varnothing 6.8 \times 0.50$ мм на $\varnothing 6.8 \times 0.60$ мм для варианта с температурой питательной воды 250°C расчетный ресурс твэла может быть увеличен с 752 эфф. суток до 847 эфф. суток. При этом уменьшается доля топлива (с 0.388 до 0.362), что влечет за собой изменение нейтронно-физических характеристик активной зоны (критические обогащения, НПЭР, изменение реактивности при выгорании топлива, мощностной и температурный эффекты реактивности и т.д.). Возможность изменения данных характеристик активной зоны требует специального обоснования, и поэтому этот путь увеличения ресурса твэла в дальнейших исследованиях не рассматривался.

2.3. Характеристики энергоблока с РУ БН-800М(II) с увеличенной тепловой мощностью

В таблице 2.8 приведены параметры I и II контуров и тепловые характеристики твэлов РУ БН-800М(II) тепловой мощностью 2350 МВт с активной зоной, состоящей из 703 рабочих ТВС различного конструктивного исполнения.

Из таблицы видно, что в зависимости от варианта ТВС и значения температуры питательной воды максимальная температура оболочки твэла изменяется в диапазоне $686-716^\circ\text{C}$. Это позволяет использовать в качестве материала оболочек твэлов только аустенитные стали. Расчеты показывают, что при использовании аустенитных сталей ресурс твэла составит 566 эфф. суток (повреждающая доза 110 с.н.а., выгорание топлива 12.4% т.а.).

Для последующих исследований в качестве основного принят вариант РУ с температурой питательной воды 250°C и активной зоной, состоящей из 703 рабочих ТВС с чехлом 96×2.0 мм и 127 твэлами $\varnothing 6.6 \times 0.40$ мм. Выбор данного варианта ТВС обусловлен более низкими значениями максимальных температур оболочек твэлов. Характеристики указанного варианта РУ приведены в таблице 2.9.

Параметры контуров и тепловые характеристики твэлов РУ БН-800М(II)
тепловой мощностью 2350 МВт для варианта активной зоны
с 703 рабочими ТВС различного конструктивного исполнения

Вариант ТВС		1	2	3
Геометрия	чехол, мм	94.5x2.5	96x2.0	96x2.0
ТВС	размер оболочки, мм	6.6x0.40	6.6x0.40	6.9x0.55
Максимальная линейная мощность твэла, кВт/м		44.6		
Максимальная мощность ТВС, выделяющаяся в активной части твэлов, МВт		3.96		
Подогрев теплоносителя I контура, °C		189	180	189
Максимальный расход через ТВС, кг/сек		13.8	14.6	13.8
Гидравлическое сопротивление активной зоны, 10 ⁵ Па		6.32	6.02	6.32
Температура питательной воды 210°C	Параметры II контура, °C	316/505		
	Параметры I контура, °C	353/542	358/538	353/542
	Максимальная температура оболочки твэла (с учетом факторов перегрева), °C	696	686	708
Температура питательной воды 250°C	Параметры II контура, °C	331/505		
	Параметры I контура, °C	361/550	365/545	361/550
	Максимальная температура оболочки твэла (с учетом факторов перегрева), °C	704	694	716

Основные характеристики вариантов РУ БН-800М(I) и БН-800М(II)
с различной тепловой мощностью

Характеристика		Вариант РУ	БН-800М(I)	БН-800М(II)
Тепловая мощность энергоблока, МВт			2100	2350
Параметры I контура, °С			363/532	365/545
Параметры II контура, °С			323/505	331/505
Параметры пара перед турбиной	давление, ат		130	130
	температура, °С		485	485
Температура питательной воды, °С			250	250
Количество рабочих ТВС в активной зоне, шт			703	703
Высота активной зоны, см			88	88
Геометрические характеристики ТВС	размеры чехла, мм		96x2.0	96x2.0
	число твэлов в ТВС, шт		127	127
	размеры оболочки твэла, мм		6.9x0.55	6.6x0.40
	диаметр дистанционирующей проволоки, мм		1.05	1.35
Материал оболочки твэла			ферритно-мартенситная сталь	Аустенитная сталь
Материал чехла ТВС			ферритная сталь ЭП-450	
Максимальная линейная мощность твэла, кВт/м			39.8	44.6
Максимальная температура оболочки (с учетом факторов перегрева), °С			681	694
Ресурс твэла, эфф. суток			793	566
Максимальная повреждающая доза, с.н.а.			138	110
Максимальное выгорание топлива, % т.а.			15.6	12.4
Гидравлическое сопротивление активной зоны, 10 ⁵ Па			6.32	6.02
Мощность на клеммах генератора, МВт			858	960
Мощность на прокачку теплоносителя II контура, МВт			5.0	8.0

2.4. Технико-экономические показатели вариантов энергоблока с РУ БН-800М(I) и БН-800М(II) с различной тепловой мощностью

Экономическая эффективность рассмотренных вариантов оценивалась по величине дохода от производства электроэнергии. Доход (D) определялся следующим образом:

$$D = Ц \cdot N_{эл}^* \cdot \tau - \Theta - T - K \cdot E,$$

где

$Ц$ - цена электроэнергии;

$N_{эл}^*$ - мощность на клеммах генератора за вычетом затрат на собственные нужды энергоблока;

$\tau = 7000$ час/год - время работы энергоблока на номинальной мощности в году;

Θ, T - соответственно, ежегодные эксплуатационные расходы и затраты на топливо;

$K \cdot E$ - ежегодные отчисления с капитальных затрат (включая стоимость первой загрузки).

Эксплуатационные расходы (Θ) и отчисления с капитальных затрат ($K \cdot E$) принимались одинаковыми для рассматриваемых вариантов энергоблока. В связи с этим разность доходов от производства электроэнергии БН-800М(I) и БН-800М(II) может быть записана в следующем виде:

$$D_2 - D_1 = Ц \cdot \tau \cdot [(N_{кл2} - N_{кл1}) - (W_{II}^{(2)} - W_{II}^{(1)})] - (T_2 - T_1),$$

где

$N_{клj}, W_{II}^{(j)}$ - соответственно, мощность на клеммах генератора и мощность на прокачку теплоносителя II-ого контура варианта j ($j=1$ - БН-800М(I), $j=2$ - БН-800М(II)).

Для принятых в разделе 2.2 значений стоимости одной ТВС и стоимости 1 кВт·час электроэнергии различие в доходах от производства электроэнергии для рассмотренных вариантов составит: $D_2 - D_1 = +14.74$ млн. долл. США/год. Таким образом, рассмотренное увеличение тепловой мощности является более эффективным способом улучшения технико-экономических показателей энергоблока с РУ типа БН-800 по сравнению с увеличением выгорания топлива за счет снижения температур оболочек и применения ферритно-мартенситной стали типа ЭП-450.

Выполненные исследования позволили в качестве основного варианта энергоблока с РУ БН-800М рекомендовать энергоблок с тепловой мощностью 2350 МВт и оболочками твэлов из улучшенных аустенитных сталей.

ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ГЛАВЫ

1. На основе единых проектных и технических решений по реактору и основному технологическому оборудованию рассчитаны технические характеристики двух вариантов энергоблока:

- с РУ БН-800М(I) с тепловой мощностью 2100 МВт, сниженными до 660-670°C значениями максимальных температур оболочек твэлов и увеличенным выгоранием топлива;

- с РУ БН-800М(II) с тепловой мощностью 2350 МВт и уровнем максимальных температур оболочек твэлов 690-700°C.

Для каждого варианта на основе оптимизационных исследований определены параметры контуров, рабочие характеристики активной зоны, турбоустановки, ПТО, ПГ, ГЦН-I; рассчитаны величины ресурсов твэлов с оболочками из различных материалов и максимальное выгорание топлива; выбрана конструкция ТВС и ее элементов.

Показано, что в первом случае при использовании в качестве материала оболочек ферритно-мартенситной стали типа ЭП-450 максимальное выгорание топлива составит ~15.6% т.а. при ресурсе твэла ~790 эфф. суток. При этом за счет оптимизации параметров III контура и модернизации турбоустановки К-800-130/3000 обеспечивается мощность на клеммах генератора ~858 МВт(эл).

Во втором случае при использовании на оболочках аустенитных сталей типа ЭП-172 х.д., ЧС-68 х.д. максимальное выгорание топлива составит ~12.4% т.а. (предельная повреждающая доза 110 с.н.а.) при ресурсе ~570 эфф. суток. При этом на клеммах генератора обеспечивается мощность ~960 МВт(эл), что достигается как за счет увеличения тепловой мощности, так и повышения к.п.д. цикла.

2. Выполнено сравнение двух путей улучшения технико-экономических показателей энергоблока с реактором средней мощности типа БН-800. Показано, что увеличение электрической мощности является более эффективным способом улучшения технико-экономических характеристик энергоблока.

ГЛАВА 3

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОБЛОКА С РЕАКТОРОМ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ ТИПА БН-1600М ИСХОДЯ ИЗ ДОСТИЖЕНИЯ ВЫСОКИХ ВЫГОРАНИЙ ТОПЛИВА

К середине 80-х годов был завершен технический проект энергоблока с РУ большой мощности БН-1600, в основу которого были положены принципиальные технические решения БН-600 и БН-800. Анализ проектных решений показал, что по технико-экономическим показателям проект не соответствует современным требованиям и для создания перспективного РБН большой мощности требуется поиск и разработка принципиально новых технических решений, повышающих безопасность и улучшающих экономические показатели энергоблока. В связи с этим было принято решение о создании нового проекта энергоблока с реактором большой мощности БН-1600М. Перед проектом были поставлены следующие цели:

- достижение высокого уровня безопасности;
- обеспечение конкурентоспособности по сравнению с перспективными энергоисточниками, и в первую очередь с перспективными легководными реакторами (LWR).

Решение проблемы обеспечения конкурентоспособности РБН типа БН-1600М видится в следующих направлениях:

а). снижение удельных капитальных затрат (за счет снижения металлоемкости основного и вспомогательного оборудования, использования дешевых конструкционных материалов, укрупнения технологического оборудования, упрощения конструкции узлов и систем и т.д.);

б). уменьшение эксплуатационных расходов;

в). уменьшение топливной составляющей производства электроэнергии (за счет увеличения выгорания топлива, увеличения производительности установок по переработке и изготовлению топлива и т.д.).

В настоящей главе изложены результаты выполненных автором исследований по оптимизации параметров натриевых контуров, характеристик и вида тепловой схемы энергоблока большой мощности с РУ типа БН-1600М, обеспечивающих низкую удельную металлоемкость РУ и достижение высоких выгораний топлива: 15÷20% т.а. Исследования выполнены с использованием комплекса программ

ССАПС-85. Основные результаты исследований изложены в литературе /1, 2, 10, 20, 21, 26, 27, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117/.

Оптимизация параметров выполнена в несколько этапов. На первом этапе при фиксированной электрической мощности энергоблока, фиксированной температуре острого пара (перед турбиной) 500-505°C и заданных высоких параметрах II-ого контура (345/530°C) исследовалось влияние на технико-экономические показатели парогенератора и турбоустановки вида тепловой схемы и давления острого пара в III-ем контуре. При этом для всех рассмотренных вариантов энергоблока максимальная температура оболочек твэлов (с учетом факторов перегрева) была ограничена величиной 700-710°C. Исходя из снижения суммарной металлоемкости ПГ и турбоустановок, определены оптимальные давление острого пара и вид тепловой схемы III-его контура энергоблока с РУ типа БН-1600М.

На втором этапе для выбранных давления острого пара и тепловой схемы пароводяного контура при фиксированной электрической мощности энергоблока исследовалось влияние на максимальную температуру оболочки и ресурс твэлов параметров натриевых контуров и температуры острого пара. Исследования выполнены для оболочек твэлов из перспективных конструкционных материалов: улучшенные аустенитные и ферритно-мартенситные стали. На основе выполненных исследований для каждого типа конструкционного материала оболочки твэла, исходя из снижения затрат на производство электроэнергии (за счет увеличения выгорания топлива, снижения затрат на прокачку теплоносителя I, II контура и рабочего тела), определены оптимальные значения параметров контуров и конструктивные особенности активной зоны и ее элементов (твэл, ТВС).

На третьем этапе определены оптимальные параметры контуров и конструктивные особенности активной зоны РУ типа БН-1600М, которые позволяют обеспечить достижение высоких выгораний топлива в случае использования в качестве материала оболочек твэлов как аустенитных, так и ферритно-мартенситных сталей (при минимальных затратах мощности на прокачку теплоносителя и рабочего тела).

3.1. Влияние давления острого пара и вида тепловой схемы пароводяного контура на технико-экономические показатели парогенератора и турбоустановки

Рассмотрен вариант РУ типа БН-1600М, имеющий в своем составе следующее основное технологическое оборудование - три ГЦН-I, шесть ПТО и шесть технологических петель II контура, каждая из которых включает по одному ПТО, ГНЦ-II, ПГ (с буферной емкостью) и трубопроводы. Аварийное расхолаживание реактора осуществляется через встроенные в корпус реактора ТО САРХ, что позволяет проектировать машзал энергоблока по обычным правилам и нормам и открывает перспективы для использования стандартных машзалов турбоустановок на различные параметры рабочего тела.

Исследовалось влияние на технико-экономические показатели ПГ и турбоустановки величины давления острого пара и вида промежуточного перегрева. С этой целью рассмотрено несколько вариантов энергоблока с РУ типа БН-1600М, в составе которого применены турбоустановки с натриевым или паровым промежуточным перегревом пара на различные давления острого пара. Опыт разработки турбоустановок, в частности турбоустановки К-800-130/3000 с паровым промперегревом, показывает, что освоение новой ступени параметров или типа промежуточного перегрева требует значительных средств и времени. В связи с этим при формировании вариантов энергоблока с различными параметрами III контура ориентировались на освоенные отечественным энергомашиностроением параметры рабочего тела. При этом допускалась модернизация серийных турбоустановок в целях использования последних на пониженные или повышенные температуры острого (перегретого) пара и питательной воды.

Отечественное энергомашиностроение представляет достаточно широкие возможности с точки зрения единичных мощностей серийных установок, их параметров и к.п.д. паросилового цикла: от цикла на насыщенном паре до цикла на сверхкритические давления (СКД).

Так, для АЭС с тепловыми реакторами разработаны и выпускаются серийные турбоустановки на насыщенном паре (~65 ат, 280°C) единичной мощностью 500, 750 и 1000 МВт(эл), для которых принята схема с паровым промежуточным перегревом пара. В обычной энергетике используются серийные турбины на сверхкритические давления (СКД): 240 ат, 535÷540°C с промежуточным огневым перегревом пара до 540°C (при ~40 ат). На данные параметры

спроектированы и выпускаются серийные турбоустановки единичной мощностью 300, 500, 800 и 1200 МВт(эл), что позволяет набрать фактически любую мощность энергоблока.

Специально для АЭС с реактором БН-800 спроектирована турбоустановка К-800-130/3000 на умеренные параметры пара (130 ат, 485°C) с промежуточным паровым перегревом пара. В таблице 3.1 приведены основные характеристики отечественных серийных турбоустановок единичной мощностью 750÷800 МВт (эл) на различные параметры рабочего тела.

Для энергоблока с РУ типа БН-1600М цикл на насыщенном паре с давлением ~70 ат не рассматривался, поскольку в этом случае обеспечивается низкий к.п.д. цикла (не более 33%), и необходимо отказаться от конструкции прямоточного парогенератора “натрий-вода” (предполагается применить схему с многократной принудительной циркуляцией, что отразится на металлоемкости парогенератора).

Вариант параметров III контура с давлением ~180 ат (по типу параметров европейских реакторов EFR, СФ-1) был исключен по следующим соображениям. Само по себе увеличение давления острого пара со 130 ат до 180 ат повышает к.п.д. (нетто) машзала на величину всего 0.4÷0.45% абсолютных. С другой стороны, как и в случае СКД, переход на давления 180 ат ставит проблему разработки новых коррозионно-стойких и жаропрочных материалов для ПГ. При этом переход на давления 180 ат означает освоение отечественным энергомашиностроением новой ступени параметров, т.е. развертывание проектно-конструкционных работ по созданию турбоустановки, основного и вспомогательного оборудования машзала на нестандартные давления рабочего тела. С этой точки зрения использование цикла на СКД смотрится привлекательнее. Таким образом, из представленных ступеней параметров для энергоблока с РУ типа БН-1600М были рассмотрены варианты параметров III контура с умеренными давлениями (~130 ат) и сверхкритическими давлениями (~240 ат).

При формировании вариантов энергоблока с различными параметрами III контура были сделаны следующие предположения.

а). Для надежной работы РУ в течение всего срока службы среднесмешанная температура теплоносителя на выходе из реактора ограничена величиной 550°C.

Основные характеристики серийных турбоустановок
на различные параметры пара

Обозначение		К-750- -65/3000	К-800- -130/3000	К-800- -240/3000
Характеристики	Параметры пара перед турбиной	65	130	240
	давление, ат температура, °С	230	485	540
Температура питательной воды, °С		190	210 ÷ 215	274
Параметры пара после промперегрева	давление, ат	5	7.1	34.1
	температура, °С	263	250	540
Тип промежуточного перегрева пара		паровой	паровой	огневой
Расчетное давление в конденсаторе, ат		0.045	0.039	0.035
Температура охлаждающей воды, °С		15	15	12
Схема турбоустановки		2ЦНД+ЦВД +2ЦНД	ЦВД+2ЦНД	ЦВД+ЦСД+ +3ЦНД
Формула схемы регенеративного подогрева питательной воды		ПВД+Д+ +4ПНД	ПВД+Д+ +5ПНД	3ПВД+Д+ +4ПНД
К.П.Д. (брутто) цикла, % *)		32.7	40.8	46.7÷47.1
Удельный расход тепла (брутто), ккал/кВт час *)		2630	2109	1825÷1840

*) Рассчитано с учетом внутренней мощности приводной турбины питательного насоса.

б). В качестве конструкционного материала теплообменных трубок ПГ на умеренные давления пара рассмотрена хромистая сталь 05X12H2M-ВИ, находящаяся в стадии промышленного освоения и имеющая приемлемые длительные свойства при температурах вплоть до 530°С. Для трубок ПГ на СКД применен высоконикелевый сплав 03X21H32M3Б, имеющий хорошие длительные свойства и высокую сопротивляемость общей коррозии вплоть до 550°С. Как для варианта СКД, так и для умеренных давлений пара (по мере освоения промышленностью ферритных сталей) может быть рекомендована сталь 9%Cr+2%Mo+Nb+V (типа французской стали ЕМ-12), имеющая приемлемую коррозионную стойкость и обладающая хорошими длительными свойствами до 525÷550°С. В связи с вышесказанным температура теплоносителя на входе в ПГ ограничена величиной 530°С. Соответственно, температура острого пара на выходе из ПГ принималась не более 510°С.

в). Конструктивное исполнение активной зоны и центральной части реактора (напорной камеры, внутриреакторной защиты, колонны СУЗ и т.д.), основного технологического оборудования петель I и II контуров (ПТО, ГЦН-I, ГЦН-II и т.д., за исключением ПГ и трубопроводов обвязки по теплоносителю и рабочему телу), а также самой РУ (бака реактора, трасс теплоносителя I и II контуров, поворотных пробок, внутриреакторных систем и обечаек и т.д.) одинаково для всех вариантов.

г). Максимальная температура оболочки твэлов (с учетом факторов перегрева) ограничена величиной $700 \div 710^\circ\text{C}$. Оценка максимальных температур оболочек твэлов и теплогидравлических характеристик I контура выполнена для варианта активной зоны со смешанным оксидным топливом, основные конструктивные характеристики которой приведены в таблицах 3.2÷3.4. В таблице 3.5 для мощности 3850 МВт и параметров I контура $395/550^\circ\text{C}$ приведены основные теплогидравлические и нейтронно-физические характеристики активной зоны с отрицательным $\text{НПЭР}_{\text{АЗ+верх}} /112, 113/$. Расчеты выполнены с применением разработанной автором программы теплогидравлического расчета активной зоны и ТВС, которая используется в составе комплекса CCAPS-85. Расчет нейтронно-физических характеристик выполнен с использованием программ SINVAR-2 /39/ и ТВК-2D /40/.

Таблица 3.2.

Распределение ячеек по зонам реактора

Зона	Количество ячеек, шт.
Рабочие ТВС (ЗМО + ЗБО)	684
Органы СУЗ, шт.	43
в том числе:	
АЗ	12
КС - АЗ	12
КС	
(на основе естественного карбида бора)	19
Боковая зона воспроизводства (БЗВ)	210
Защита ВРХ (на основе стали и $\text{В}_4\text{С}$)	372
ВРХ	468
Сборки первичной защиты	156
Итого по реактору:	1933

Таблица 3.3.

Размеры элементов ТВС и твэла по высоте

Характеристика	Величина
Общая длина ТВС, мм	4500
в том числе:	
- головка ТВС	205
- экран на основе В ₄ С и стали	635
- натриевая прослойка	450
- хвостовик с переходником	800
Общая длина твэла, мм	2410
в том числе:	
- верхний газосборник	100
- активная часть твэла	800
- нижний газосборник	1100
- нижняя торцевая зона воспроизводства	350

Таблица 3.4.

Геометрические характеристики твэлов и ТВС

Характеристика	Величина	
Размер ячейки, мм	160	
Размер чехла, мм	156 x 2.5	
Межпакетный зазор, мм	4.0	
Количество твэлов в ТВС, шт.	271	
Размеры оболочки твэла, мм	7.4 x 0.45	
Диаметр дистанционирующей проволоки, мм	1.60	
Размер дистанционирующей ленты, мм	0.7 x 1.30	
Расстояние между центрами соседних твэлов (плотно сжатый пучок), мм	9.0	
Относительный шаг плотно сжатого пучка твэлов, отн. ед.	1.216	
Номинальный зазор между чехлом и сжатым пучком твэлов, мм	1.908	
Состав ТВС	доля топлива	0.405
	доля стали	0.201
	доля натрия	0.394
Количество ПЭЛ верхнего торцевого экрана, шт.	61	
Размеры оболочки ПЭЛ, мм	14 x 0.40	
Принцип дистанционирования ПЭЛ в пучке	решеточное	

Таблица 3.5.

Теплогидравлические и нейтронно-физические характеристики
традиционной оксидной активной зоны РУ типа БН-1600М

Параметр		Величина
Тепловая мощность активной зоны, МВт (т)		3850
Параметры теплоносителя I контура, °С		395/550
Подогрев теплоносителя в I контуре, °С		155
Расход теплоносителя I контура через реактор, кг/сек		19560
Характеристики наиболее напряженной рабочей ТВС *)	мощность, МВт	~6.9
	расход через ТВС, кг/сек	28.2
	максимальная линейная мощность твэла, кВт/м	39.8
	коэффициент неравномерности энерговыведения по высоте активной зоны	1.20
Гидравлическое сопротивление активной зоны, 10^5 Па		~2.40
Максимальная температура оболочки твэла (с учетом факторов перегрева), °С		688
Максимальная температура оксидного топлива (с учетом факторов перегрев), °С		≤ 2150
Критзагрузка плутония ($Pu^{239} + Pu^{240}$), кг		~4560
Характеристики воспроизводства	КВА	0.80
	BR_{p-p}	1.08
НПЭР _{АЗ+верх} , %Δk/k (состояние перед перегрузкой)		-0.56
Изменение реактивности за 330 эфф. суток (без непуниевого эффекта), %Δk/k		-3.07

*) Рассмотрен режим четырехкратной перегрузки топлива активной зоны с интервалом 330 эфф. суток (максимальное выгорание топлива 14.6 % т.а.).

д). Тепловая мощность энергоблока определялась из условия, что суммарная мощность на клеммах генераторов равна 1675 МВт (эл).

е). Полагалось, что для всех рассматриваемых вариантов расходы теплоносителя в I и II контурах не превышают величин 20630 и 17285 кг/сек, соответственно, т.е. величин, соответствующих номинальной производительности вновь разрабатываемых ГЦН-I и ГЦН-II РУ БН-1600М.

С учетом приведенных выше ограничений в качестве основных рассмотрены варианты энергоблоков с модернизированными турбоустановками К-800-130/3000 с паровым промперегревом и К-800-240/3000 с натриевым перегревом: по две турбоустановки на энергоблок. Расчеты характеристик модернизированных турбоустановок на различные давления пара выполнены с применением программы расчета тепловой схемы турбоустановки, разработанной сотрудниками ЦКТИ и ЛМЗ /80/ и используемой в составе комплекса ССАПС-85. В случае умеренных давлений острого пара модернизация направлена на улучшение показателей К-800-130/3000 и предполагает реализацию следующих мер /26/:

- применить схему турбоустановки с тремя ЦНД (вместо двух);
- увеличить температуру питательной воды до 240÷250°С за счет добавления еще одного ПВД и организации отбора пара (на подогреватель) из места поворота потока пара в ЦВД (~60 ат);
- повысить температуру острого пара перед турбиной до 500÷505°С (вместо 485°С).

В таблице 3.6 показано влияние предлагаемых мер на эффективность паросилового цикла модернизированной турбоустановки К-800-130/3000. Под к.п.д. (нетто) машзала понимают отношение электрической мощности на клеммах генераторов к тепловой мощности энергоблока; к.п.д. (брутто) машзала рассчитывается с учетом мощности турбопривода питательного насоса (ТПН). В случае СКД модернизация турбоустановки вызвана снижением температуры острого/перегретого пара с 535÷540°С до 500÷505 °С перед турбиной. В этом случае влажность пара на последних ступенях ЦНД возрастает на 1.5÷1.8% абсол. и достигает значений ~8.5%. Для обеспечения необходимого ресурса ЦНД предполагается заменить лопатки последних ступеней ЦНД на титановые, для которых имеется положительный опыт работы при влажности вплоть до 9÷10%, и усовершенствовать систему влагоудаления в ЦНД.

Таблица 3.6

Показатели модернизированной турбоустановки К-800-130/3000. (Тепловая мощность на турбоустановку 2100 МВт)

Вариант	Характеристика	Мощность на клеммах генератора, МВт(эл)	Внутренняя мощность приводной турбины*), МВт(эл)	К.п.д. машзала, %		Увеличение мощности на клеммах генераторов, МВт(эл)		
				брутто	нетто	На одну турбоустановку	На блок БН-1600М	
	Турбоустановка К-800-130/3000 с ЦНД в составе энергоблока с РУ БН-1600	833	23.2	40.76	39.67	0	0	
	Добавлен третий ЦНД	848.5	23.2	41.51	40.40	+15.5	+31.0	
	Температура питательной воды увеличена с 210 до 250°C (схема турбоустановки: ЦВД+3ЦНД)	862	25.0	42.24	41.05	+13.5	+27.0	
	Температура острого пара повышена, соответственно, до 500°C и 505°C, (схема: ЦВД+3ЦНД, $t_{пв}=250^\circ\text{C}$)	$t_0=505^\circ\text{C}$	868	24.5	42.50	41.33	+6.0	+12.0
		$t_0=500^\circ\text{C}$	866.5	24.6	42.43	41.26	+4.5	+9.0

В таблице 3.7 приведены основные результаты расчетных исследований по определению характеристик вариантов энергоблока с РУ типа БН-1600М с циклами на умеренные и закритические давления пара в III контуре. Исследования выполнялись с использованием разработанных автором методики и алгоритмов расчета параметров натриевых и пароводяного контуров энергоблока с РБН, подробное описание которых дано в главе 1. В случае умеренных давлений пара выделены два варианта параметров III контура, отличающиеся температурой острого пара: 485°C и 500°C перед турбиной. Здесь же для сравнения приведен вариант параметров энергоблока с РУ типа БН-1600М с проектным вариантом турбоустановки К-800-130/3000 с двумя ЦНД. Для случая СКД рассмотрены варианты энергоблока, различающиеся параметрами натриевых контуров. Оптимизация параметров выполнялась с целью минимизации затрат на прокачку теплоносителя I и II контуров. (Для случая СКД в силу меньшей тепловой мощности энергоблока имеется возможность увеличить подогревы в I и II контурах при условии сохранения максимальной температуры оболочек ТВЭЛов не более 705°C).

Сопоставление технико-экономических показателей ПГ и турбоустановки с различными давлениями пара выполнено на основе вариантов 3 и 6 таблицы 3.7.

Указанные варианты имеют близкие значения электрической мощности блока (с учетом затрат на собственные нужды), одинаковые температуры натриевых контуров и близкие температуры оболочек ТВЭЛов из сталей аустенитного класса, что позволяет в обоих случаях обеспечить близкие значения ресурсов ТВЭЛов и выгораний топлива. Отличаются варианты энергоблоков конструкцией и технико-экономическими характеристиками турбоустановок и парогенераторов, что обусловлено различием в давлениях острого пара и использованием различных схем промперегрева.

В таблице 3.8 приведены технические характеристики турбоустановок и парогенераторов рассмотренных вариантов энергоблока. Здесь же, с целью определения зависимости технико-экономических показателей энергоблока от схемы промперегрева, приведены характеристики турбоустановок и ПГ на умеренные давления с натриевым промперегревом и закритические давления с паровым промперегревом. В таблице 3.9 представлены результаты расчетов удельной металлоемкости и стоимостных характеристик парогенераторов на различные параметры III контура (параметры II контура приняты 345/530°C, мощность на клеммах генераторов 1675 МВт(эл)).

Таблица 3.7

Характеристики энергоблока с РУ типа БН-1600М при различных параметрах рабочего тела

Параметры	Вариант	Умеренные давления острого пара (130 ат)			СКД		
		Проект К-800-130/3000	Модернизированная турбоустановка К-800-130/3000		Модернизированная турбоустановка К-800-240/3000		
		1	2	3	4	5	6
ЗАДАНИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭНЕРГОБЛОКА							
Давление острого пара, ат *)		130	130	130	240		
Температура острого пара, оС *)		485	485	500	505		
Температура питательной воды, оС		210-215	250	250	280		
Температура перегретого пара, оС		250	250	250	505		
Вид промежуточного перегрева пара		Паром из отбора турбины			Натриевый		
Схема турбоустановки		ЦВД+2ЦНД	ЦВД+3ЦНД	ЦВД+3ЦНД	ЦВД+ЦСД+3ЦНД		
Расход теплоносителя через реактор, кг/сек		20630	20630	20630	20630	20630	19560
Расход теплоносителя в петлях II контура, кг/сек		17285	17285	17285	17285	16390	16390
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ							
К.п.д. (нетто) машзала, %		39.67	41.05	41.26	43.50		
Тепловая мощность энергоблока, МВт		4220	4080	4060	3850		
К.п.д. (нетто) энергоблока, % **)		39.05	40.41	40.62	42.83	42.88	42.94
Электрическая мощность на клеммах генератора, МВт		1674	1675	1675	1675	1675	1675
Электрическая мощность за вычетом затрат на прокачку теплоносителя I и II контуров, МВт		1648	1649	1649	1649	1651	1653
Температура теплоносителя I контура, оС		371/532	392/548	395/550	402/549	399/546	395/550
Температура теплоносителя II контура, оС		319/511	341/527	345/530	355/530	345/530	345/530
Максимальная температура оболочки твэла (с учетом фактора перегрева), оС		704	704	704	682	679	688

*) Перед турбиной; температура пара на выходе из ПГ на 5оС выше.

**) К.п.д. (нетто) энергоблока учитывает затраты на прокачку теплоносителя I, II контуров и рабочего тела.

Технические характеристики турбоустановок и ПГ вариантов энергоблока с РУ типа БН-1600М на закритические и умеренные параметры рабочего тела для различных схем промперегрева пара

Показатель		Вариант	Умеренные параметры		Закритические параметры	
ЗАДАНИЕ ПАРАМЕТРЫ						
Тип промперегрева пара			Натриевый	паровой	натриевый	паровой
Количество парогенераторов на блок, шт.			6	6	6	6
Количество турбоустановок на энергоблок, шт.			2	2	2	2
Тип турбоустановки			Новая *) разработка	Модернизированная К-800-130/3000	Модернизированная серийная К-800-240/3000	Новая разработка
Схема турбоустановки			ЦВД+ЦСД+3ЦНД	ЦВД+3ЦНД	ЦВД+ЦСД+3ЦНД	ЦВД+3ЦНД
Параметры пара перед турбиной	Давление, ат		130	130	240	240
	Температура, °С		500	500	505	505
Температура питательной воды, °С			250	250	280	280
Параметры натриевого промперегрева пара	на выходе из ЦВД	Давление, ат	27	-	40	-
		Температура, °С	290	-	260	-
на входе ЦСД		Давление, ат	23	-	36	-
		Температура, °С	500	-	505	-
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ						
Тепловая мощность энергоблока, МВт			3970	4060	3850	3960
Тепловая мощность ПГ, МВт			661.7	676.7	641.7	660
Удельный расход тепла (нетто) машзала, ккал/кВт час			2037.1	2083.9	1976.7	2032.7
К.п.д. (нетто) машзала, %			42.21	41.26	43.5	42.3
Расход теплоносителя через парогенератор, т/час			10115	10344	9825.5	10107
Паропроизводительность ПГ, т/час			897.3	1088.6	946.5	1233.2
Расход пара на натриевый промперегрев, т/час			766.2	-	779	-

*) Используются эскизные проработки варианта К-800-130/3000 с натриевым промперегревом пара.

Таблица 3.9.

Технико-экономические показатели различных вариантов
парогенераторов РУ типа БН-1600М

Вариант ПГ**)	I	II	III	IV	V	VI
ЗАДАННЫЕ ПАРАМЕТРЫ						
Степень параметров рабочего тела	закритические				умеренные	
Схема промперегрева	паровой		натриевый		паровой	натриевый
Тип пучка трубок модуля ИП	прямо- трубный	витой	прямо- трубный	витой	прямотрубный	
Количество модулей ИП на ПГ, шт.	2	1	2	1	1	1
Количество модулей ППП на ПГ, шт.	-	-	1	1	-	1
Тепловая мощность ПГ, МВт	660.0		641.7		676.7	661.7
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ						
Общая поверхность теплообмена парогенератора, м ² *)	4383	4384.5	6275.1	5958.3	2555.6	4755.9
Общая масса трубного пучка ПГ, тонн	65.56	107.32	102.91	131.3	46.02	86.68
Общая масса ПГ, тонн	183.42	201.22	253.67	250.24	159.20	230.83
Удельная металлоемкость в расчете на электрическую мощность ПГ, т/МВт(эл)	0.657	0.721	0.909	0.896	0.570	0.827
Ориентировочная стоимость ПГ, млн. долл. США	5.50	6.04	7.61	7.51	4.78	6.92

*) Приведена к наружному диаметру трубки.

***) Номера вариантов соответствуют номерам вариантов в таблице П1.4.

Рассмотрены варианты корпусных парогенераторов с пучками теплообменных трубок различного конструктивного исполнения: прямые и витые трубки, оформленные в одном или нескольких корпусах. Размеры теплообменных трубок выбирались с учетом прочностных свойств материалов и коррозионного износа со стороны натрия и воды/пара, а также с учетом ограничений на габариты ПГ. Для всех вариантов конструкция ПГ выбиралась на основе одних и тех же технологических ограничений, требований по обеспечению ресурса и технических решений по основным узлам и элементам: пучок труб, трубные доски, пароводяные камеры, корпус ПГ и т.д. Так, для всех вариантов рассматривался вариант размещения буферной емкости в верхней части корпуса испарителя-перегревателя. В случае прямотрубного пучка для всех вариантов ПГ рассматривались цельнотянутые теплообменные трубки, сферические пароводяные камеры и линзовые трубные доски. В случае витого пучка рассмотрены сварные витые теплообменные трубки, цилиндрические пароводяные камеры и трубные доски в виде цилиндрической призмы. Результаты расчетных исследований в обоснование конструкции и рабочих параметров модулей испарителя-перегревателя и промпароперегревателя, а также парогенератора в целом на различные давления пара приведены в приложении 1. При проведении исследований в случае умеренных давлений пара теплогидравлические характеристики ПГ рассчитывались с использованием программы ТРП-5 /59/, разработанной в ОКБ «Гидропресс». В случае критических давлений пара использованы разработанные автором методика и инженерная программа теплогидравлического расчета ПГ на СКД /2/. (Обе программы включены в состав комплекса программ ССАПС-85).

Стоимостные характеристики парогенератора рассчитывались по его металлоемкости из расчета 30 долларов США за 1 кг изделия. При этом стоимость одной тонны ПГ на умеренные давления, изготовленного с использованием хромистой стали, принималась равной стоимости одной тонны ПГ, изготовленного из стали аустенитного класса. (По оценкам французских специалистов цена одной тонны трубного пучка из перспективной стали EM-12 составляет 0.9 цены одной тонны трубного пучка из высоконикелевого сплава Incoloy 800 /122/). Из представленных в таблице 3.9 данных видно, что в зависимости от давления острого пара и типа пучка теплообменных трубок переход от парового к натриевому промперегреву ведет к ухудшению технико-экономических показателей собственно ПГ: металлоемкость всех шести ПГ энергоблока с РУ типа БН-1600М возрастает на ~295÷430 тонн. Одновременно изменяется схема турбоустановки

(добавляется ЦСД, исключаются СПП) и возрастает длина машзала. Оценки показывают, что, например, для случая умеренных давлений пара добавление двух ЦСД приводит к увеличению металлоемкости машзала на $\sim 700\div 800$ тонн, а с учетом увеличения длины машзала: на $\sim 1000\div 1100$ тонн. Исключение 8-ми СПП, изготовленных из аустенитной стали, уменьшает металлоемкость машзала на ~ 1220 тонн. Таким образом, с точки зрения металлоемкости и стоимостных показателей III контура (включая ПГ) можно утверждать, что схема с паровым промперегревом несколько эффективнее схемы с натриевым промперегревом. Аналогичный вывод был сделан по результатам сравнения технико-экономических показателей различных схем промперегрева для случая секционно-модульного ПГ на умеренные параметры пара РУ типа БН-1600 /1, 20/.

Далее, при одинаковых схемах промперегрева пара и конструкциях пучков труб парогенератор на СКД имеет на 10-15% большую металлоемкость, чем ПГ на умеренные давления (сравниваются варианты ПГ I и V табл.3.9 для схем с паровым промперегревом и варианты III и VI табл.3.9 для схем с натриевым промперегревом). Экономические оценки показывают, что при выбранных стоимостных характеристиках в случае цикла на СКД капитальные вложения в парогенераторы энергоблока с РУ типа БН-1600М будут на 4.14-4.32 млн. долл. США выше (в зависимости от схемы промперегрева пара), чем в случае цикла на умеренные давления острого пара. Таким образом, можно утверждать, что цикл на умеренные давления пара с паровым промперегревом имеет наименьшие суммарные капитальные затраты на турбоустановки и ПГ по сравнению с другими рассмотренными вариантами тепловой схемы III контура.

Дополнительно необходимо отметить следующие достоинства и недостатки циклов на закритические и умеренные давления пара. Так, к достоинствам варианта на умеренные давления пара можно отнести его высокую технологическую освоенность: спроектирована турбоустановка, намечены пути её модернизации; накоплен положительный опыт эксплуатации парогенераторов на данные параметры рабочего тела, разработаны и осваиваются промышленностью конструкционные материалы ПГ, позволяющие обеспечить высокий ресурс работы. К достоинствам СКД следует отнести меньшую тепловую мощность энергоблока и, как следствие, примерно на 10% меньшие тепловые сбросы по сравнению с вариантом на умеренные давления. Кроме того, имеется возможность после незначительной модернизации использовать в составе энергоблока серийные

турбоустановки на СКД. С другой стороны, отсутствует опыт разработки, создания и эксплуатации ПГ натрий-вода на закритические давления; стоит проблема создания принципиально новых жаропрочных и коррозионно-стойких конструкционных материалов парогенератора. Сопоставление перечисленных достоинств и недостатков циклов с различными давлениями рабочего тела позволило рекомендовать для энергоблока с РУ типа БН-1600М в качестве основного варианта цикл с умеренным давлением пара и паровым промпрегревом.

3.2. Зависимость максимальной температуры оболочек, ресурса твэлов и металлоемкости РУ типа БН-1600М от параметров натриевых контуров и температуры острого пара

Достижение высоких выгораний топлива в активной зоне РУ типа БН-1600М предполагается обеспечить за счет применения конструкционных материалов с улучшенными прочностными и радиационными свойствами и соответствующей оптимизации условий облучения (уровень температур, интенсивность облучения и т.д.) и конструкции твэлов. Анализ материаловедческих программ разных стран позволил определить следующий список наиболее перспективных материалов оболочек твэлов: оптимизированные аустенитные стали в х.д. состоянии, легированные титаном (типа 15-15, Ti CW; D9 20% CW); высоконикелевые сплавы (типа PE-16); ферритно-мартенситные стали (типа НТ-9, ЭП-450) и дисперсно-упрочненные окислами Y_2O_3 ферритные стали (типа МА 957). В качестве перспективных оболочечных материалов отечественные специалисты рассматривают оптимизированную аустенитную сталь X16H15M3 в х.д. состоянии, легированную 1% Ti, и ферритно-мартенситную сталь 12X13M2БФР (ЭП-450). Стали ферритно-мартенситного класса имеют худшие свойства длительной прочности по сравнению с аустенитными сталями, но более высокую стойкость к распуханию под облучением. В связи с этим для достижения высоких выгораний топлива в твэлах с оболочками из ферритных сталей требуется значительно снизить температуры оболочек. Ниже приведены результаты исследований по определению зависимости выгорания топлива в активной зоне РУ типа БН-1600М от условий облучения при использовании в качестве материала оболочки твэла стали типа ЭП-450, либо улучшенной аустенитной стали.

Рассмотрен энергоблок тепловой мощности 4060 МВт, подробная характеристика которого дана в разделе 3.1. Приняты умеренные давления пара и схема с паровым промперегревом. В качестве основных рассмотрены варианты активных зон с нитридным уран-плутониевым топливом (UPuN), обогащенным по изотопу N^{15} , высокой долей топлива (более 0.47), большим уплощением и натриевой прослойкой над активной частью, реализующих концепцию активной зоны с нулевым или отрицательным $НПЭР_{АЗ+верх}$ и нулевым изменением реактивности при выгорании топлива за микрокампанию: $\Delta k_{выг} \cong 0$. Под величиной $НПЭР_{АЗ+верх}$ понимают изменение величины $K_{эфф}$ при удалении натрия из всех топливных сборок на высоте активной части твэла и над ней вплоть до головок ТВС. Рассматривались варианты гомогенной (традиционной) активной зоны и гетерогенной с аксиальной воспроизводящей прослойкой; выравнивание полей энерговыделений по радиусу осуществлялось двумя зонами обогащения. Дополнительно, в качестве возможных первых загрузок РУ типа БН-1600М, были рассмотрены варианты активных зон с МОХ-топливом, которые реализуют концепцию активной зоны с отрицательным или нулевым $НПЭР_{АЗ+верх}$. При этом, с целью обеспечения единых условий работы основного технологического оборудования I контура, доля топлива в активной зоне с МОХ-топливом была сохранена на уровне 0.47.

Исследование перспектив достижения высоких выгораний топлива выполнено для оболочек твэлов разной толщины (внутренний диаметр оболочки оставался неизменным). Рассмотрены варианты ТВС с 271 твэлом, что позволяет при высоте активной части твэла 800 мм ограничить максимальную линейную мощность величиной 44 кВт/м. В таблицах 3.10 и 3.11 приведены геометрические характеристики вариантов ТВС, соответственно, для случая проволочного дистанционирования всех твэлов в пучке и для случая дистанционирования центральных твэлов проволокой, а периферийных - лентой. Здесь же даны гидравлические характеристики ТВС и активной зоны при расходе через реактор 20630 кг/сек. Размеры элементов ТВС по высоте для базового варианта с газосборником 1200 мм даны в таблице 3.3, распределение ячеек по реактору в таблице 3.2. Шаг между центрами соседних ТВС принят 160 мм. В качестве материала чехла ТВС используется малораспухающая ферритно-мартенситная сталь ЭП-450. В таблице 3.12 приведены условия облучения твэлов и ТВС в активной зоне РУ типа БН-1600М: зависимость повреждающей дозы, максимального выгорания топлива, изменения максимальной линейной мощности

Таблица 3.10.

Геометрические и гидравлические характеристики ТВС с различными диаметрами твэлов. (Проволочное дистанционирование всех твэлов в пучке)

Характеристика		Вариант	1	2	3	4
ЗАДАННЫЕ ПАРАМЕТРЫ						
Размер чехла, мм			157 x 2.5			
Число твэлов в ТВС, шт.			271			
Размер оболочки, мм			7.9 x 0.45	8.0 x 0.50	8.1 x 0.55	8.2 x 0.60
Диаметр проволоки, мм			1.10	1.00	0.90	0.80
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ						
Относительный шаг пучка твэлов			1.139	1.125	1.111	1.098
Номинальный зазор между сжатым пучком и чехлом, мм			1.61	1.71	1.81	1.91
Состав Ячейки Под ТВС	доля топлива		0.470	0.470	0.470	0.470
	доля стали		0.200	0.213	0.227	0.241
	доля натрия		0.33	0.317	0.303	0.289
Гидравлическое сопротивление при расходе через реактор 20630 кг/сек, 10 ⁵ Па	ТВС		3.17	3.38	3.72	4.14
	активная зона		3.43	3.64	3.98	4.400

Таблица 3.11.

Геометрические и гидравлические характеристика ТВС с различными диаметрами твэлов. (Дистанционирование центральных твэлов в пучке осуществляется проволокой, периферийных - лентой)

Характеристика		Вариант	1	2	3	4
ЗАДАННЫЕ ПАРАМЕТРЫ						
Размер чехла, мм			157 x 2.5			
Число твэлов в ТВС, шт.			271			
Размер дистанционирующей ленты, мм			0.6 x 1.30			
Диаметр твэла, мм			7.9	8.0	8.1	8.2
Диаметр проволоки, мм			1.15	1.05	0.95	0.85
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ						
Относительный шаг пучка			1.146	1.131	1.117	1.104
Номинальный зазор между сжатым пучком и чехлом, мм			1.83	1.73	1.63	1.53
Состав ячейки под ТВС	доля топлива		0.470			
	доля стали		0.200	0.214	0.228	0.242
	доля натрия		0.330	0.316	0.302	0.288
Гидравлическое сопротивление при расходе через реактор 20630 кг/сек, 10 ⁵ Па	ТВС		3.24	3.49	3.88	4.35
	активная зона		3.50	3.75	4.14	4.61

Таблица 3.12

Условия облучения ТВЭЛов традиционной активной зоны РУ типа БН-1600М с оксидным и нитридным топливом

Количество интервалов облучения рабочих ТВС (интервал по 330 эфф. сут.), шт.		3	4	5	6
Оксидное топливо	Максимальная глубина выгорания топлива, % т.а.	11.50	15.40	19.20	23.00
	Максимальная повреждающая доза, с.н.а.	122	163	204	245
	Изменение максимальной линейной мощности ТВЭЛ за время облучения (начало/конец), кВт/м	40.9/34.4	42.0/33.3	43.0/32.3	44.1/31.2
	Изменение максимальной температуры оболочки ТВЭЛ за время облучения, оС	45	58	68	79
Нитридное топливо	Максимальная глубина выгорания топлива, % т.а.	7.95	10.6	13.3	15.9
	Максимальная повреждающая доза, с.н.а.	104.5	139	174	209
	Изменение максимальной линейной мощности ТВЭЛ за время облучения (начало/конец), кВт/м	39.2/37.9	39.4/37.7	39.6/37.4	39.8/37.2
	Спад максимальной температуры оболочки ТВЭЛ за время облучения, оС	9.7	12.7	15.8	18.5

твэла и спада максимальной температуры оболочки от количества интервалов облучения.

Необходимо отметить, что в случае нитридного топлива при тех же временах облучения ТВС в активной зоне повреждающая доза на ~17% меньше по сравнению с оксидным топливом. В таблицах 3.13 и 3.14 приведены значения максимальных температур оболочек твэлов (с учетом факторов перегрева) для гомогенных активных зон с оксидным и нитридным топливами, соответственно, для случая проволочного дистанционирования всех твэлов в пучке и для случая дистанционирования периферийных твэлов лентой. Температуры рассчитаны для параметров в первом контуре: 395/550°C. При определении гидравлических характеристик активной зоны и ТВС, а также температур оболочек твэлов использовалась разработанная автором программа теплогидравлического расчета активной зоны и ТВС, входящая в состав комплекса программ SCAPS-85. Введение аксиальной воспроизводящей прослойки (в случае нитридной зоны используется моонитрид обедненного урана, для оксидной - двуокись обедненного урана) приводит к увеличению температуры оболочки на 9÷10°C и снижению повреждающей дозы (при сохранении времени облучения). Исследования отечественных и зарубежных специалистов показывают, что в зависимости от формы и размеров аксиальной прослойки повреждающая доза снижается на 13÷20%. В связи с вышесказанным с целью снижения уровня температур в активной зоне при проведении исследований в качестве основных рассматривались варианты ТВС с дистанционированием периферийных твэлов лентой. Это позволяет на 20÷30°C снизить максимальные температуры оболочек твэлов. Дополнительно, была понижена на 15°C температура острого пара и, соответственно, снижены параметры II контура до уровня 340/515°C. В таблице 3.15 приведены параметры контуров и характеристики ПГ варианта энергоблока с РУ типа БН-1600М с температурой пара перед турбиной 485°C. Здесь же для сравнения даны параметры энергоблока при температуре острого пара (перед турбиной) 500°C (см. раздел 3.1). При определении параметров I контура предполагалось, что среднелогарифмический температурный напор в ПТО неизменный для всех вариантов и составляет при выбранной тепловой мощности ~33°C. Снижение температуры острого пара привело к уменьшению к.п.д. паросилового цикла, и мощность на клеммах генератора снизилась с 1675 до 1667 МВт(эл).

Таблица 3.13.

Максимальные температуры оболочек твэлов*) (с учетом факторов перегрева)
гомогенных активных зон с оксидным и нитридным топливом
(Проволочное дистанционирование всех твэлов в пучке)

Тип топлива		Оксидное топливо				Нитридное топливо				
Диаметр твэла, мм		7.9	8.0	8.1	8.2	7.9	8.0	8.1	8.2	
Длина кампании	3·Δτ**)	Температура оболочек твэла, °С	714	720	726	734	701	706	712	720
	4·Δτ		723	729	735	743	702	708	714	722
	5·Δτ		731	736	743	752	704	709	716	723
	6·Δτ		739	745	752	761	705	711	717	725

*) Параметры I контура: 395/550 °С; тепловая мощность 4060 МВт;

максимальный расход через ТВС 29.7 кг/сек.

**) Δτ = 330 эфф. суток - длительность микрокампании.

Таблица 3.14.

Максимальные температуры оболочек твэлов*) (с учетом факторов перегрева)
гомогенных активных зон с оксидным и нитридным топливом
(Дистанционирование центральных твэлов в пучке - проволокой,
периферийных - лентой)

Тип топлива		Оксидное топливо				Нитридное топливо				
Диаметр твэла, мм		7.9	8.0	8.1	8.2	7.9	8.0	8.1	8.2	
Длина кампании	3·Δτ**)	Температура оболочек твэла, °С	694	697	701	705	682	685	688	692
	4·Δτ		702	705	709	713	683	686	689	693
	5·Δτ		710	713	716	721	685	688	691	695
	6·Δτ		718	721	725	729	686	689	692	696

*) Параметры I контура: 395/550 °С; тепловая мощность 4060 МВт;

максимальный расход через ТВС 29.7 кг/сек.

**) Δτ = 330 эфф. суток - длительность микрокампании.

Таблица 3.15.

Зависимость максимальной температуры оболочки твэлов и конструкции парогенератора от параметров III контура

Вариант энергоблока	1	2	
ЗАДАННЫЕ ПАРАМЕТРЫ			
Тепловая мощность, МВт	4060	4060	
Подогрев теплоносителя I контура, °С	155	155	
Параметры II контура, °С	345/530	340/515	
Параметры рабочего тела перед турбиной:			
- давление, ат	130	130	
- температура, °С	500	485	
Температура питательной воды, °С	250	250	
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ			
Параметры I контура, °С	395/550	384/539	
Максимальная температура*) оболочки твэла (с учетом факторов перегрева), °С	694	683	
Электрическая мощность на клеммах генераторов, МВт	1675	1667	
Электрическая мощность за вычетом затрат на прокачку теплоносителя I и II контура, МВт	1646	1636	
Конструкция корпусного парогенератора	количество труб, шт.	1639	1945
	размер трубок, мм	16 x 2.5	16 x 2.5
	длина трубки, м	31.02	30.07
	масса трубного пучка, тонн	46.02	53.31
	масса модуля, тонн	159.20	187.21
Рабочие характеристики ПГ	массовая скорость, кг/м ² · с	1941.3	1668.2
	граничное паросодержание	0.239	0.258
	максимальный тепловой поток (внутренняя поверхность), Вт/м ²	683000	545000

*) Рассмотрен вариант оксидной гомогенной активной зоны с трехкратным режимом перегрузки. Конструкция ТВС соответствует варианту 1 в таблице 3.11.

Исследования выполнены с использованием разработанной автором и изложенной в главе 1 методики расчета параметров натриевых и пароводяного контуров с РБН.

3.2.1. Характеристики активных зон с оболочками твэлов из аустенитных сталей

Ресурс твэлов с оболочками из аустенитных сталей определялся с использованием двух критериев: допустимого формоизменения и длительной прочности. В таблице 3.16 приведены выгорание топлива и ресурс твэлов с оболочками из улучшенных отечественных аустенитных сталей, рассчитанные по критерию допустимого формоизменения. Здесь же для сравнения приведены значения ресурса твэла с оболочками из освоенных отечественных аустенитных сталей типа ЧС-68 х.д. и ЭП-172 х.д.. При проведении расчетов предполагалось, что по критерию допустимого формоизменения улучшенные аустенитные стали могут облучаться до дозы 160 с.н.а., т.е. величины, которую планируют достичь за рубежом на сталях данного класса. Для сталей типа ЧС-68 х.д., ЭП-172 х.д. предельная доза облучения принималась 110 с.н.а. Из таблицы видно, что применение на оболочках твэлов улучшенных аустенитных сталей (типа 15-15, Ti CW) позволяет в рамках традиционной оксидной активной зоны достичь выгораний $\sim 15.1\%$ т.а. при ресурсе ~ 1300 эфф. суток. Переход на нитридное топливо и применение аксиальной воспроизводящей прослойки позволяет увеличить ресурс твэла до $1720 \div 1820$ эфф. суток и достичь выгораний нитридного топлива $13.8 \div 14,7\%$ т.а., что по накоплению осколков деления эквивалентно выгоранию оксидного топлива $19.9 \div 21.2\%$ т.а.

В таблице 3.17 приведена зависимость ресурса твэла с оксидным топливом и оболочкой из аустенитной стали от температуры оболочки. Ресурс твэла определен по критерию длительной прочности. Рассмотрен вариант оболочки с наименьшей толщиной стенки: $\varnothing 7.9 \times 0.45$ мм. Зависимость ресурса твэла от температуры оболочки для случая нитридного топлива и оболочек различной толщины приведены в таблице 3.18. Расчеты выполнены для базового варианта ТВС с длиной активной части твэла 800 мм и длиной газосборника 1200 мм.

Таблица 3.16.

Допустимые выгорания топлива в активных зонах различного типа при использовании на оболочках твэлов аустенитных сталей.

Топливо		Оксидное топливо		Нитридное топливо		
		традиционная АЗ	аксиальная ГАЗ	традиционная АЗ	аксиальная ГАЗ	
Тип активной зоны						
Повреждающая доза при различных временах*) облучения, с.н.а.	3·Δτ	122	102÷108	104.5	87÷92	
	4·Δτ	163	136÷144	139	116÷123	
	5·Δτ	204	170÷181	174	145÷154	
	6·Δτ	245	204÷217	209	175÷185	
Максимальное выгорание (V^{\max}), и кампания ТВС (T_{AZ})	Стали типа ЭП-172 х.д.,	V^{\max} , %	10.4	11.8÷12.5	8.40	9.5÷10.1
	ЧС-68 х.д. (Доза 110 с.н.а.)	T_{AZ} , эфф.сут.	891	1008÷1068	1044	1180÷1252
	Улучшенные аустенитные стали типа 15-15, Ti CW. (Доза 160 с.н.а.)	V^{\max} , %	15.1	17.1÷18.1	12.2	13.8÷14.7
		T_{AZ} , эфф.сут.	1296	1465÷1555	1520	1716÷1824

*) $\Delta\tau=330$ эфф. суток.

Таблица 3.17.

Зависимость ресурса твэла с оксидным топливом и оболочкой $\varnothing 7.9 \times 0.45$ мм из аустенитной стали от уровня максимальных температур оболочек твэлов

Максимальная температура оболочки твэла (с учетом факторов перегрева), °С	690	700	710
Ресурс твэла, эфф. суток	~2410	~1880	~1550

Таблица 3.18.

Зависимость ресурса твэла традиционной нитридной активной зоны от уровня максимальных температур оболочек

Максимальная температура оболочки твэла (с учетом факторов перегрева), °С		680	690	700	710	
Ресурс твэла, эфф. суток	Размер оболочки, мм	$\varnothing 7.9 \times 0.45$	1470	1320	1190	1075
		$\varnothing 8.0 \times 0.50$	1638	1471	1324	1196
		$\varnothing 8.1 \times 0.55$	1802	1617	1455	1314
		$\varnothing 8.2 \times 0.60$	1963	1759	1583	1428

Из представленных данных видно, что в случае оксидного топлива при принятых размерах оболочки для достижения высоких выгораний целесообразно по критерию длительной прочности ограничить температуру оболочки величиной $\sim 710^{\circ}\text{C}$. С увеличением толщины оболочки и/или длины газосборника имеется возможность увеличить максимальные температуры оболочки (при сохранении ресурса твэла). При этом основным критерием, определяющим ресурс твэла, является критерий допустимого формоизменения. В случае твэла с нитридным топливом и оболочкой $\varnothing 7.9 \times 0.45$ мм для достижения ресурса 1520 эфф. суток, при котором в гомогенной активной зоне достигается повреждающая доза 160 с.н.а., необходимо максимальную температуру оболочки твэла ограничить 675°C . С увеличением толщины оболочки максимальная температура может быть увеличена и при $\varnothing 8.2 \times 0.60$ мм составит $\sim 700^{\circ}\text{C}$. Для достижения более высоких ресурсов 1720÷1820 эфф. суток необходимо либо снижать максимальные температуры оболочек до $680\text{--}690^{\circ}\text{C}$ (в зависимости от толщины оболочки), либо увеличивать длину газосборника.

На основе представленных данных выполнены оптимизационные исследования по определению характеристик активных зон РУ типа БН-1600М с высоким выгоранием топлива при использовании на оболочках твэлов улучшенных аустенитных сталей. Результаты исследований приведены в таблице 3.19 (при проведении исследований величина газосборника оставалась неизменной и равной 1200 мм). Из представленных в таблице данных видно, что в случае традиционной активной зоны как с оксидным (вар.2, табл. 3.19), так и нитридным топливом (вар.4, табл. 3.19), а также оксидной активной зоны с аксиальной гетерогенностью (вар.3, табл. 3.19) достигаются предельные по критерию допустимого формоизменения ресурсы твэлов с оболочкой $\varnothing 7.9 \times 0.45$ мм. При этом для обеспечения работоспособности твэлов не требуется снижение температур I контура и увеличение длины газосборника: достаточно применить ленточное дистанционирование периферийных твэлов. (Более того, в случае традиционной оксидной активной зоны (вар.1, табл. 3.19) возможно применение проволочного дистанционирования периферийных твэлов, что позволяет уменьшить гидравлическое сопротивление активной зоны).

Основные характеристики активных зон с оболочками из аустенитных сталей*)

Вариант активной зоны	1	2	3	4	5	6
ЗАДАННЫЕ ПАРАМЕТРЫ						
Тип топлива	Оксидное			Нитридное		
Компоновка активной зоны	гомогенная АЗ	гомогенная АЗ	аксиальная ГАЗ	гомогенная АЗ	аксиальная ГАЗ	аксиальная ГАЗ
Размер твэла, мм	7.9x0.45	7.9x0.45	7.9x0.45	7.9x0.45	8.2x0.60	8.2x0.60
Тип дистанционирования периферийных твэлов	провода	лента	лента	лента	лента	лента
Подогрев в реакторе, °С	155	155	155	155	155	150
Параметры I контура	$\frac{384}{539}$	$\frac{384}{539}$	$\frac{384}{539}$	$\frac{384}{539}$	$\frac{384}{539}$	$\frac{387}{537}$
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ						
Максимальная температура оболочки твэла (с учетом факторов перегрева), °С	712	691	704	675	693	688
Гидравлическое сопротивление активной зоны, 10^5 Па	3.43	3.50	3.50	3.50	4.58	4.89
Ресурс твэла, эфф. суток	1300	1300	1470÷1560	1520	~1705	1800
Повреждающая доза, с.н.а.	160	160	160	160	150÷159	158÷167
Максимальное выгорание топлива, % т.а.	15.1	15.1	17.1÷18.1	12.2	13.7	13.8÷14.7
Электрическая мощность за вычетом затрат на прокачку теплоносителя I и II контуров, МВт	1636	1636	1636	1636	1632	1630

*) Параметры II контура: 340/515°С.

В случае нитридной активной зоны с аксиальной гетерогенностью при принятых параметрах I контура и длине газосборника предельное значение ресурса твэла с оболочкой $\varnothing 8.2 \times 0.60$ мм (по критерию длительной прочности) составит ~ 1705 эфф. суток, чему соответствует повреждающая доза $150 \div 159$ с.н.а. (вар.5, табл. 3.19). Для данного варианта активной зоны за счет увеличения расхода в I контуре на $\sim 3.3\%$ ресурс твэла может быть увеличен (по критерию длительной прочности) до 1800 эфф.суток, чему соответствует повреждающая доза $158 \div 167$ с.н.а. (см. вар.6, табл. 3.19).

3.2.2. Характеристики активных зон с оболочками твэлов из ферритно-мартенситных сталей

Ресурс твэлов с оболочками из стали ферритно-мартенситного класса (типа ЭП-450) определялся по критерию длительной прочности. На рисунке 3.1 приведена зависимость ресурса твэла с оксидным топливом и оболочкой из стали ЭП-450 от уровня температур и размеров оболочки: изменялись толщина оболочки и длина газосборника. На рисунках 3.2÷3.4 для твэлов с оксидным и нитридным топливом представлена зависимость максимально допустимой температуры оболочки из стали ЭП-450 от размеров последней (толщина стенки, длина газосборника) и ресурса твэла: расчеты выполнены для трех значений ресурса — 1320, 1650 и 1980 эфф. суток. Из представленных рисунков видно, что для достижения высоких ресурсов твэлов с оболочками из стали ЭП-450 необходимо существенно снизить температуры оболочек и увеличить длину газосборника. Так, при длине газосборника 1200 мм для достижения ресурса 1320 эфф. суток необходимо снизить максимальные температуры оболочек (в зависимости от ее толщины) до $600 \div 670^\circ\text{C}$ для оксидного топлива и $570 \div 650^\circ\text{C}$ для нитридного топлива. С увеличением длины газосборника допустимый уровень температур оболочек возрастает.

На основе зависимостей, приведенных на рисунках 3.1÷3.4, выполнены оптимизационные исследования по определению характеристик активных зон РУ типа БН-1600М с высоким выгоранием топлива при использовании оболочек из стали типа ЭП-450. Результаты исследований приведены в таблице 3.20. Рассматривались ТВС с ленточным дистанционированием периферийных твэлов и увеличенной длиной газосборника. Для базового варианта активной зоны РУ типа БН-1600М общая длина ТВС составляет 4500 мм, что позволяет при общей длине

твэла 2410 мм организовать газосборник длиной 1200 мм. При проведении исследований рассмотрен вариант ТВС с длиной близкой к размерам по высоте ТВС реактора SUPER-PHENIX: 5300 мм. Это позволило увеличить длину газосборника до 2000 мм (общая длина твэла составила 3210 мм). Одновременно с увеличением длины ТВС возрастают габариты и металлоемкость бака реактора: оценки показывают, что при увеличении длины ТВС на 800 мм высота бака возрастает на ~1600 мм. В таблице 3.21 приведены оценки изменения металлоемкости РУ при изменении длины газосборника (изменение металлоемкости во внереакторном тракте системы перегрузки ТВС не учитывалось). Видно, что при увеличении газосборника на 800 мм металлоемкость бака реактора с оборудованием I контура возросла на 88 т, т.е. на ~2.2%.

С целью ограничения скорости коррозионного повреждения (со стороны топлива) оболочки из стали ЭП-450 максимальная температура оболочки была ограничена величиной 690°C. Снижение уровня температур в активной зоне обеспечивалось за счет увеличения расхода теплоносителя I контура и снижения температур во II контуре. В таблице 3.22 приведены характеристики энергоблока с пониженными температурами II контура: 340/472°C. С этой целью снижена температура острого пара до 450°C, температура питательной воды до 240°C, увеличена теплообменная поверхность парогенератора (увеличено число теплообменных трубок в модуле при сохранении длины последних) и увеличен расход теплоносителя во II контуре. Для обеспечения на клеммах генераторов мощности 1667 МВт (эл) тепловая мощность энергоблока увеличена до 4150 МВт.

При определении затрат на прокачку теплоносителя II контура предполагалось, что при увеличении расхода теплоносителя гидравлическое сопротивление контура сохраняется прежним за счет увеличения диаметра трубопроводов. Оценки показывают, что в этом случае металлоемкость трубопроводов возрастает на ~100 тонн (рассмотрен вариант трубопроводов с линзовыми компенсаторами температурных расширений).

Увеличение теплообменной поверхности парогенератора привело к увеличению металлоемкости энергоблока на 345 тонн. Перечисленные выше меры по снижению температуры оболочки помимо увеличения ресурса твэла приводят к увеличению затрат на прокачку теплоносителя I и II контуров. В таблице 3.20 приведена оценка изменения затрат на производство электроэнергии, рассчитанная по отношению к варианту активной зоны с твэлом $\varnothing 7.9$ мм и ресурсом 1320 эфф. суток (вариант 1, табл. 3.20). Изменение затрат на производство электроэнергии

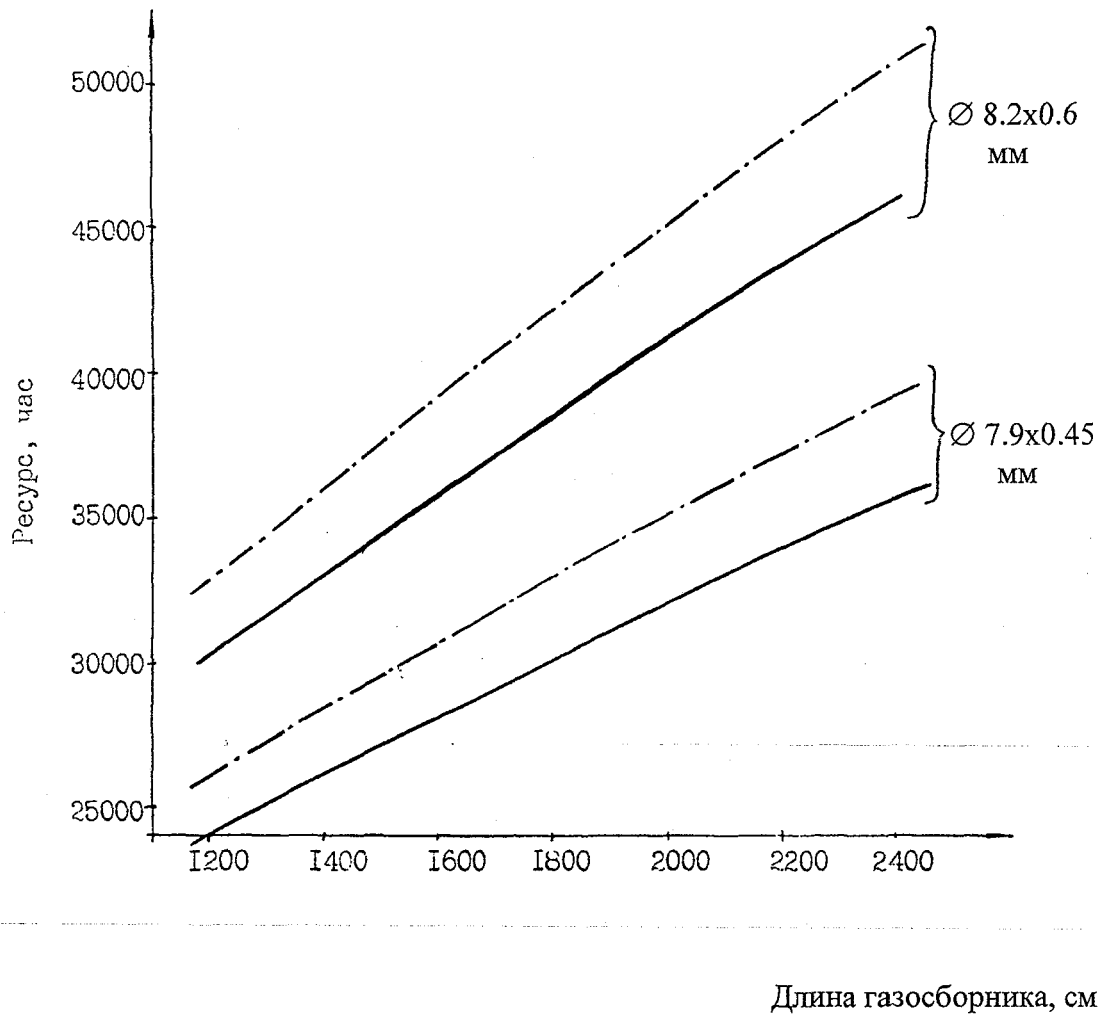


Рис. 3.1. Ресурс твэла с оксидным топливом в зависимости от размеров оболочки, длины газосборника и уровня температуры.

- - - - - максимальная температура оболочки твэла 660 °С;
- — — — — максимальная температура оболочки твэла 690 °С;

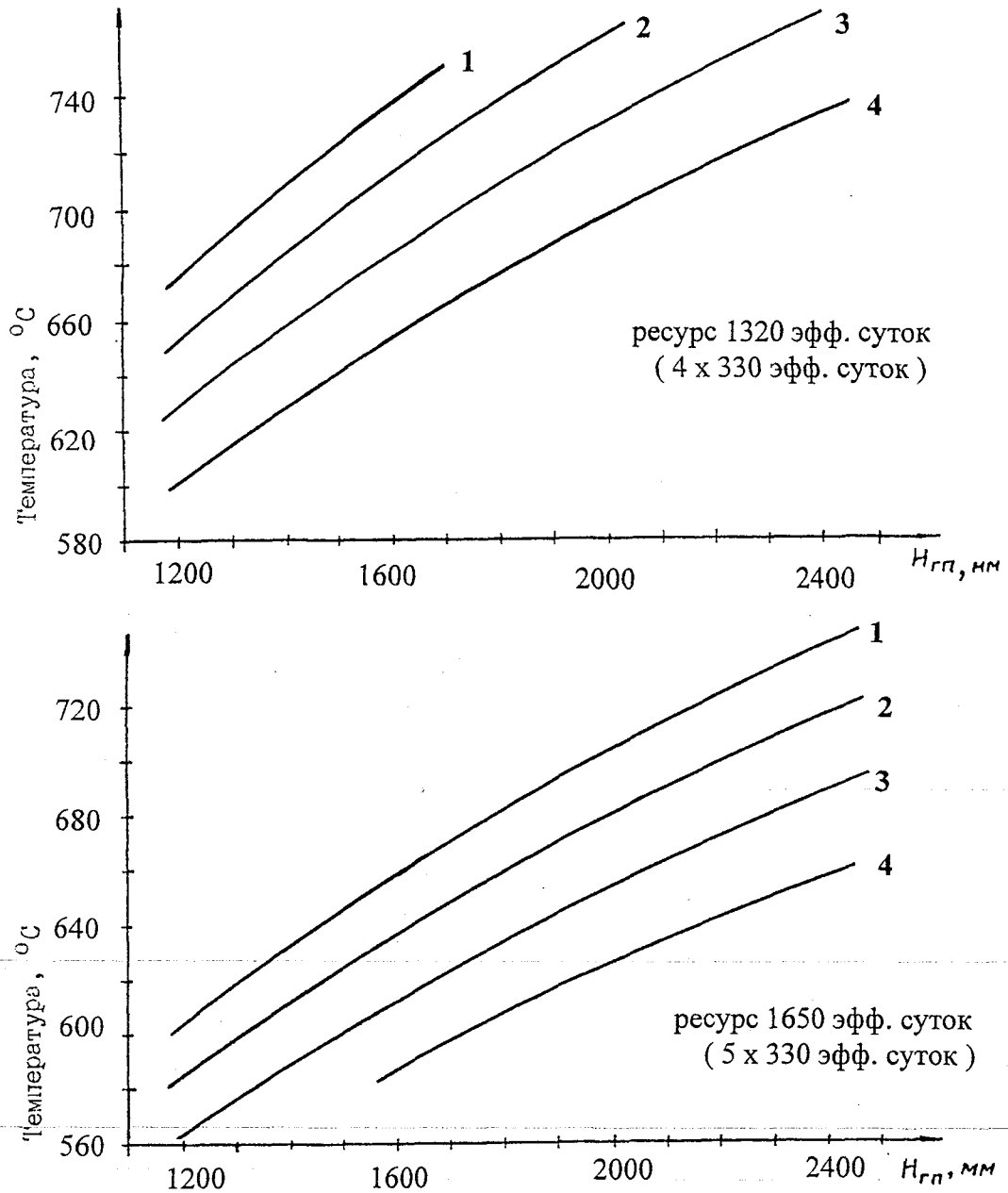


Рис. 3.2. Допустимая температура оболочки твэла с оксидным топливом в зависимости от ресурса и размеров оболочки (диаметр, толщина, длина газосборника).

1 - \varnothing 8.2 x 0.6 мм; 2 - \varnothing 8.1 x 0.55 мм;
3 - \varnothing 8.0 x 0.50 мм; 4 - \varnothing 7.9 x 0.45 мм;

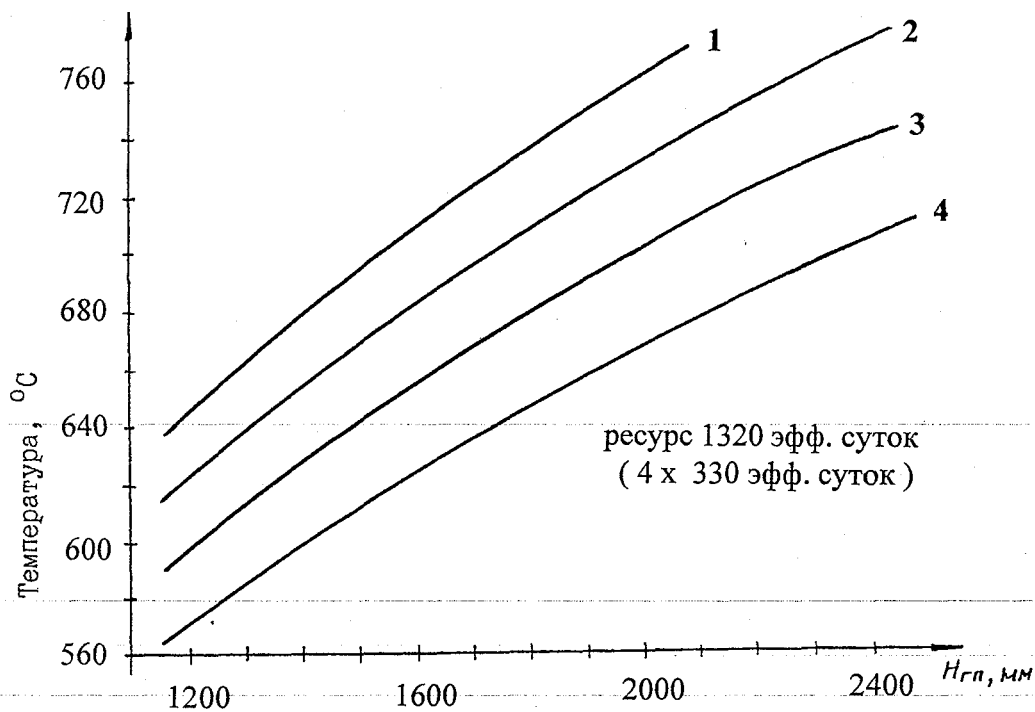
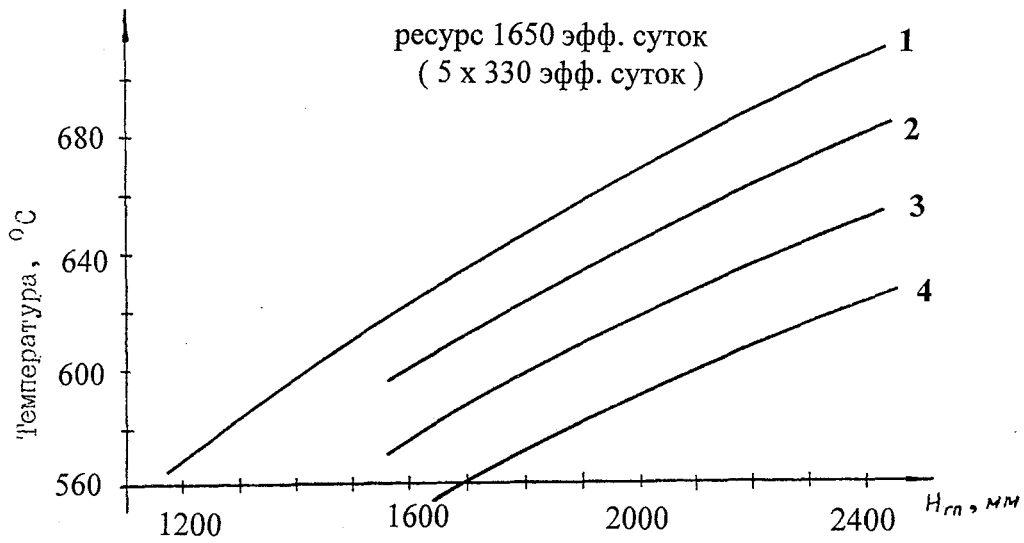


Рис.3.3. Допустимая температура оболочки ТВЭЛ с нитридным топливом в зависимости от ресурса и размеров оболочки.

1 - ∅ 8.2 x 0.60 мм;
3 - ∅ 8.0 x 0.50 мм;

2 - ∅ 8.1 x 0.55 мм;
4 - ∅ 7.9 x 0.45 мм;

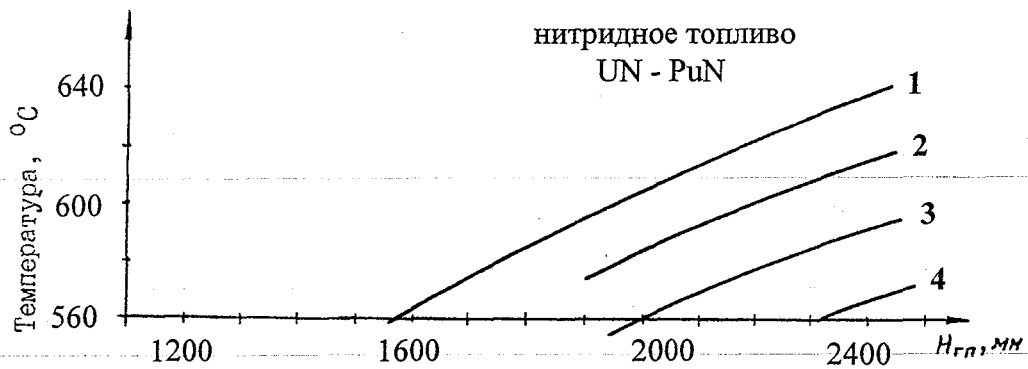
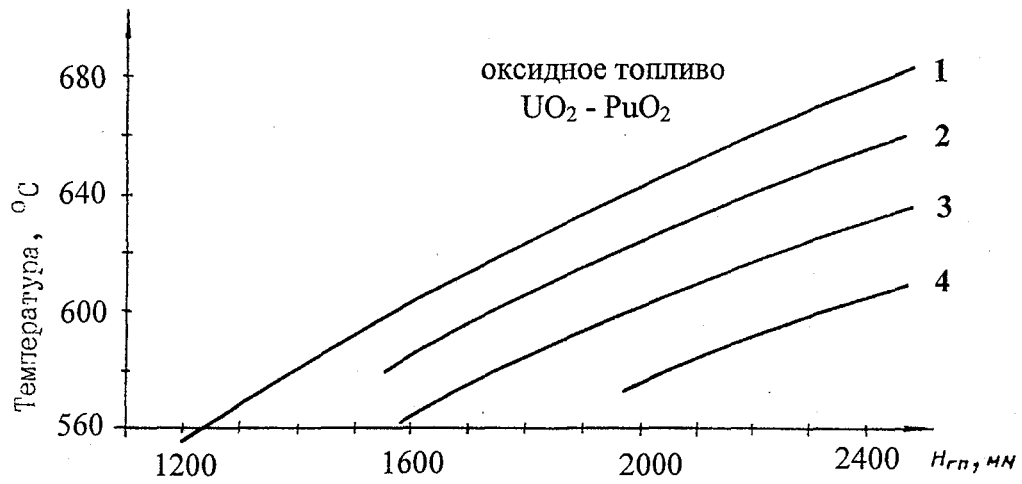


Рис. 3.4. Допустимая температура оболочки твэла в зависимости от вида топлива и геометрии при ресурсе 1980 эфф. суток (6 x 330 эфф. суток).

1 - \varnothing 8.2 x 0.60 мм;

2 - \varnothing 8.1 x 0.55 мм;

3 - \varnothing 8.0 x 0.50 мм;

4 - \varnothing 7.9 x 0.45 мм;

Таблица 3.20

Основные характеристики активных зон с оболочками ТВЭЛов из стали ЭП-450.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ЗАДАНИЕ ПАРАМЕТРЫ									
Топливо	Оксидное топливо					Нитридное топливо			
Компоновка активной зоны	Гомогенная АЗ				акси- альная ГАЗ	гомогенная АЗ			
Размер ТВЭЛ, мм	7.9x0.45	8.2x0.60	8.2x0.60	7.4x0.55	7.4x0.55	8.2x0.60	8.2x0.60	8.2x0.60	7.9x0.45
Подогрев в реакторе, °С	155	140	140	140	140	155	140	140	155
Параметры I контура, °С	384/539	393/533	370/510	393/533	393/533	384/539	393/533	370/510	384/539
Параметры II контура, °С	340/515		340/472	340/515		340/515		340/472	340/515
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ									
Максимальная температура оболочки ТВЭЛ (с учетом факторов перегрева), °С	691	691	669	669	678	684	668	645	672
Гидравлическое сопротивление активной зоны, 10 ⁵ Па	4.27	7.07	7.39	3.89	3.89	5.75	7.07	7.39	4.27
Ресурс ТВЭЛ, эфф. суток	1320	1710	1830	1600	1560	1585	1650	1735	1305
Повреждающая доза, сна	163	211	226	218	177-188	166	174	183	137
Максимальное выгорание топлива, % т.а.	15.4	19.9	21.3	23.0	22.4	12.7	13.2	13.9	10.5
Электрическая мощность за вычетом затрат на прокачку теплоносителя I и II контура, МВт	1633	1620	1612	1632	1632	1628	1620	1612	1633
Изменение затрат на производство электроэнергии, млн. долл. США/год	0	+0.423	-1.275	+3.470	+3.010	+1.898	-0.190	-2.138	-0.251

Таблица 3.21

Изменение металлоемкости бака реактора и внутрибаковых конструкций при увеличении длины газовой полости твэла

№	Наименование	Основные размеры	Увеличение веса элементов реактора БН-1600М при изменении длины ТВС, тонн		
			Увеличение длины газовой полости на 300 мм	Увеличение длины газовой полости на 500 мм	Увеличение газовой полости на 800 мм
1	Корпус страховочный	Ø17.45 м, $\sigma=0.025$ м	6.6	11.0	17.6
2	Корпус реактора	Ø17 м, $\sigma=0.025$ м	6.3	10.5	16.8
3	Термостабилизирующий экран	Ø16.7м, $\sigma=0.02$ м	5.1	8.5	13.6
4	"Горячий" короб	Ø10 м, $\sigma=0.02$ м	3.0	5.0	8.0
5	Напорные трубопроводы ГЦН-I (3 шт.)	Ø1.7 м, $\sigma=0.03$ м	2.4	4.0	6.4
6	Центральная колонна (обечайка, трубы и штанги СУЗ, термопары, механизмы перегрузки и пр.)	Ø3.7 м, доля стали 0.2	5.1	8.5	13.6
7	Отражатель	Ø8.6 м, $\sigma=0.03$ м	3.6	6.0	9.6
8	Сборки защиты (397 шт.)	S=188 мм, Доля стали 0.25	0.9	1.5	2.4
	Итого:		33.0	55.0	88.0

Характеристики энергоблока с увеличенным расходом теплоносителя II контура и пониженными температурами воды/пара в III контуре

Вариант энергоблока		1	2
ЗАДАННЫЕ ПАРАМЕТРЫ			
Расход теплоносителя II контура, кг/сек		18225	24700
Параметры II контура, °С		340/515	340/472
Параметры пара перед турбиной			
давление, ат		130	130
температура, °С		485	450
Температура питательной воды, °С		250	240
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ			
Тепловая мощность, МВт		4060	4150
Электрическая мощность на клеммах генераторов, МВт		1667	1667
Затраты на прокачку теплоносителя II контура, МВт		15.3	20.8
Конструкция корпусного парогенератора	количество трубок, шт.	1945	2515
	размер трубок, мм	16x2.5	16x2.5
	длина трубок, м	30.07	29.94
	наружный диаметр корпуса, мм	1720	1935
	масса трубного пучка, тонн	53.31	69.22
	масса модуля (III), тонн	187.21	244.67

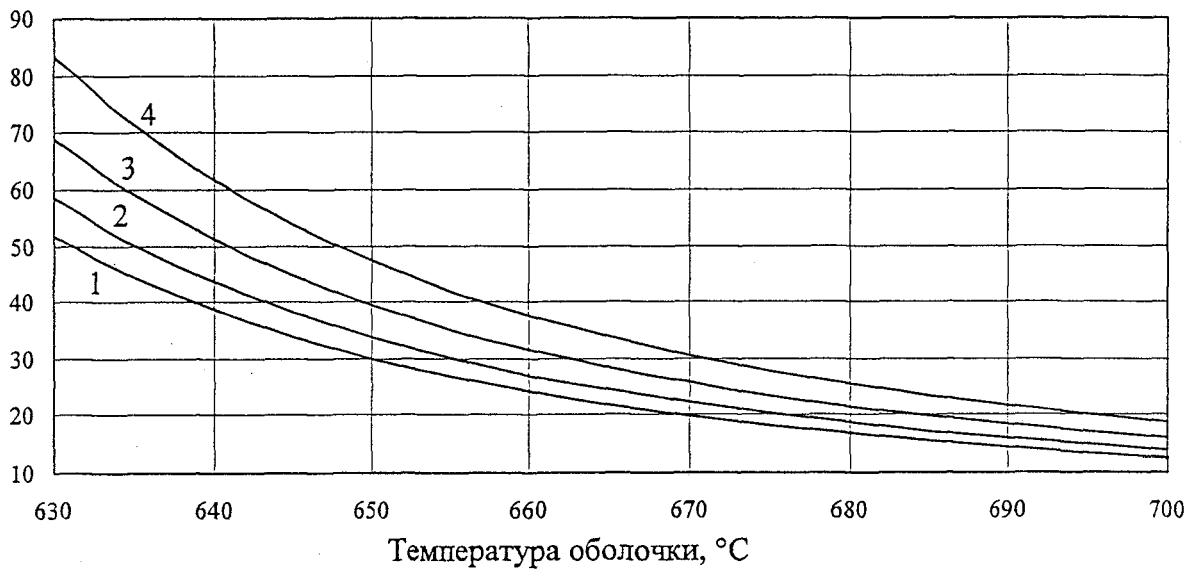
определялось как доход от снижения потребления ТВС за вычетом издержек от недовыработки электроэнергии. При проведении расчетов предполагалось, что недовыработка электроэнергии компенсируется другим источником энергии, производящим электроэнергию по цене 5 центов/кВт·час. Стоимость одной ТВС рассчитывалась из расчета 532 долл. США/ТВЭЛ, т.е. 144.250 тыс. долл. США за одну ТВС (стоимость одного ТВЭЛА рассчитана на основе данных работы /97/).

Из представленных в таблице 3.20 данных видно, что наиболее эффективное средство повышения ресурса ТВЭЛА - это увеличение толщины оболочки (смотри варианты 6 и 9 табл. 3.20 - активная зона с нитридным топливом с ТВЭЛАМИ $\varnothing 7.9$ мм и $\varnothing 8.2$ мм). Увеличение расхода в I контуре с целью снижения максимальных температур оболочек и увеличения ресурса приводит к заметному увеличению затрат на прокачку теплоносителя I контура (смотри варианты 6 и 7 табл. 3.20). Дополнительно на рисунках 3.5 и 3.6 представлены зависимости ресурса ТВЭЛА и затрат на прокачку теплоносителя I контура от температуры оболочки для нитридных активных зон с разными диаметрами ТВЭЛОВ, соответственно, для параметров II контура 340/515°C и 340/472°C. Таким образом, при принятых стоимостных характеристиках увеличение расхода I контура приводит к ухудшению экономических показателей энергоблока. Снижение параметров II контура также нецелесообразно, т.к. приводит к ухудшению технико-экономических показателей энергоблока: возрастают затраты на производство электроэнергии (варианты 7 и 8 табл. 3.20) и увеличивается металлоемкость ПГ (табл. 3.22) и трубопроводов II контура.

Вышесказанное верно и для случая использования оксидного топлива (варианты 1÷3 табл. 3.20). Необходимо отметить, что для оксидной активной зоны с ТВЭЛОМ $\varnothing 8.2$ мм (вариант 2 табл. 3.20) увеличение расхода в I контуре обусловлено ограничением температуры оболочки величиной 690°C. В этом случае ресурс ТВЭЛА $\varnothing 8.2$ составит 1710 эфф. суток, однако экономический эффект по сравнению с вариантом активной зоны с ТВЭЛОМ $\varnothing 7.9$ мм незначительный из-за вынужденного увеличения расхода теплоносителя в I контуре.

Заметного экономического эффекта в случае оксидного топлива можно добиться, если использовать ТВЭЛЫ меньшего диаметра с увеличенной толщиной оболочки. Так, переход с ТВЭЛОВ $\varnothing 8.2 \times 0.60$ мм на ТВЭЛЫ $\varnothing 7.4 \times 0.55$ мм приводит к уменьшению ресурса до 1600 эфф. суток при одновременном сокращении затрат на

Затраты мощности на прокачку
теплоносителя I контура, МВт



Ресурс твэла,
эфф. суток

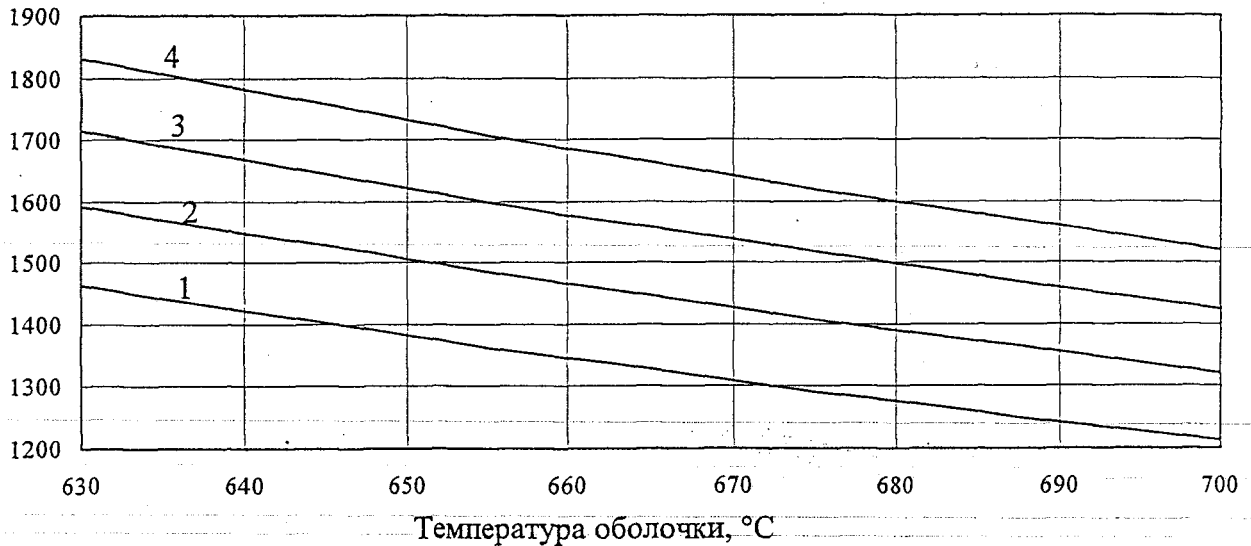


Рис. 3.5. Зависимость ресурса твэла с оболочкой из стали ЭП-450 и затрат мощности на прокачку теплоносителя I контура от уровня температур оболочек при параметрах II контура 340/515 °C (нитридная активная зона).

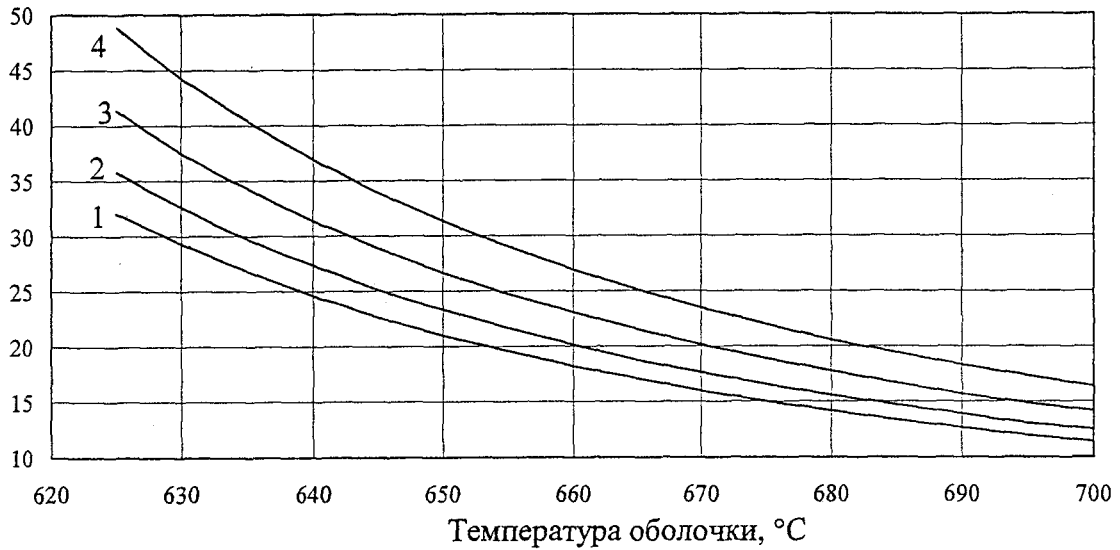
1 - Ø 7.9 x 0.45 мм;

2 - Ø 8.0 x 0.50 мм;

3 - Ø 8.1 x 0.55 мм;

4 - Ø 8.2 x 0.60 мм;

Затраты мощности на прокачку
теплоносителя I^{ого} контура, МВт



Ресурс твэла,
эфф. суток

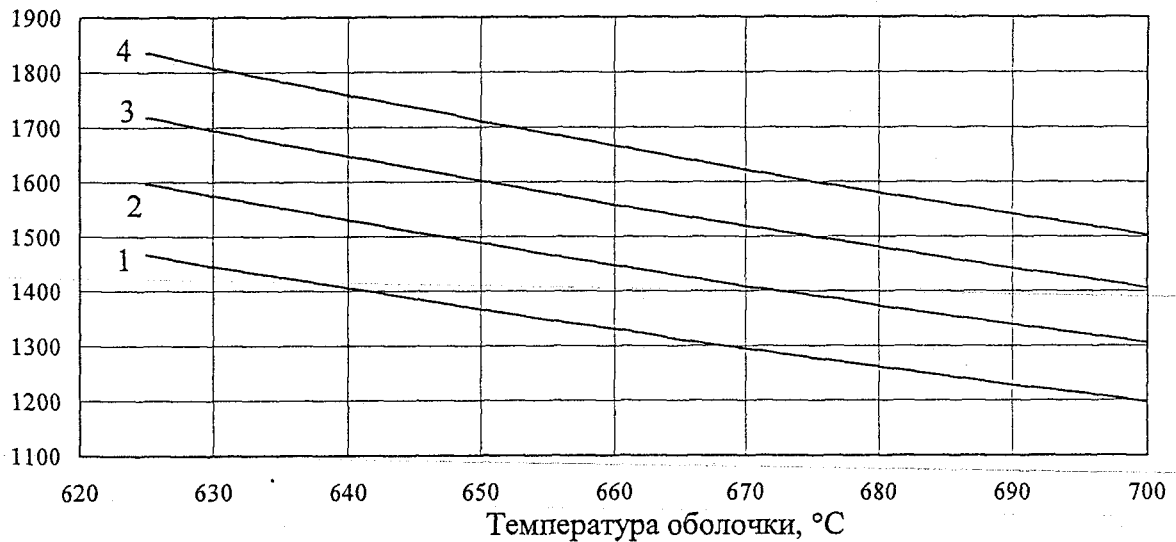


Рис. 3.6. Зависимость ресурса твэла с оболочкой из стали ЭП-450 и затрат мощности на прокачку теплоносителя I контура от уровня температур оболочек при параметрах II контура 340/472 °C (нитридная активная зона).

1 - Ø 7.9 x 0.45 мм;

2 - Ø 8.0 x 0.50 мм;

3 - Ø 8.1 x 0.55 мм;

4 - Ø 8.2 x 0.60 мм;

прокачку теплоносителя I контура (варианты 2 и 4 табл. 3.20). При этом максимальное выгорание топлива составит 23% т.а., а повреждающая доза ~ 218 с.н.а. Необходимо отметить, что указанное изменение размеров оболочки возможно только в случае оксидных активных зон, реализующих концепцию активной зоны с нулевым или отрицательным $\text{НПЭР}_{\text{АЗ+верх}}$. В случае нитридного топлива для реализации концепции активной зоны с нулевым или отрицательным $\text{НПЭР}_{\text{АЗ+верх}}$ и нулевым $\Delta k_{\text{выгор}}$ доля топлива должна быть больше или равна 0.47.

В случае оксидной активной зоны целесообразно применить воспроизводящую прослойку для снижения повреждающей дозы. При этом наблюдается незначительное снижение ресурса твэла из-за увеличения температуры оболочки (вариант 5 табл. 3.20).

3.2.3. Параметры активной зоны и РУ типа БН-1600М с высоким

выгоранием топлива

В настоящее время трудно отдать предпочтение какому-либо из рассмотренных отечественных материалов оболочек твэлов: ферритно-мартенситным или улучшенным аустенитным сталям. По этой причине была поставлена задача определить параметры и конструктивные особенности активной зоны и РУ типа БН-1600М с высоким выгоранием топлива при использовании в качестве материала оболочек твэлов как аустенитных, так и ферритно-мартенситных сталей (типа ЭП-450). На основе выполненных расчетных исследований в качестве основного рекомендован вариант энергоблока с увеличенной до 5300 мм длиной ТВС (длина газосборника 2000 мм при длине твэла 3210 мм) и параметрами контуров, представленными в таблице 3.22 (вариант 1). Дистанционирование периферийных твэлов в ТВС осуществляется лентой. В таблице 3.23 представлены характеристики активных зон с оксидным и нитридным топливом с высоким выгоранием топлива. Рассмотрены варианты традиционных активных зон с оболочками из ферритно-мартенситных сталей и активных зон с аксиальной гетерогенностью с улучшенными аустенитными сталями. Для реализации перечисленных вариантов активных зон необходимо разработать ГЦН-I, обеспечивающий при номинальном числе оборотов $n_{\text{ном}}$ следующие параметры: при суммарной производительности трех ГЦН-I 22840 кг/сек ($26.3 \text{ м}^3/\text{сек}$) перепад давления на активной зоне $5.23 \cdot 10^5$ Па. На рисунке 3.7 приведены гидравлические характеристики активных зон с диаметрами твэлов 8.2; 7.9 и 7.4 мм и напорные характеристики ГЦН-I при номинальном числе оборотов $n_{\text{ном}}$ и числе $n_1 = n_{\text{ном}}/1.107$.

Таблица 3.23.

Характеристики активных зон РУ типа БН-1600М с высоким выгоранием топлива*)

Параметр \ Вариант	1	2	3	4	5	6
ЗАДАНИЕ ПАРАМЕТРЫ						
Тип топлива	Оксидное			Нитридное		
Компоновка активной зоны	Аксиальная ГАЗ		Традиц. АЗ	Аксиальная ГАЗ		Традиц. АЗ
Материал оболочки твэла	Улучшенная аустенитная сталь		ЭП-450	Улучшенная аустенитная сталь		ЭП-450
Размеры оболочки, мм	7.9x0.45	7.4x0.30	7.4x0.55	7.9x0.45	8.2x0.45	8.2x0.60
Доля топлива	0.470	0.444	0.381	0.470	0.512	0.470
Параметры I контура, °С	384/539	393/533	393/533	384/539		
Подогрев в реакторе, °С	155	140	140	155		
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ						
Максимальная температура оболочки, °С	704	677	669	683	693	684
Гидравлическое сопротивление активной зоны, 10 ⁵ Па	4.27	3.89	3.89	4.27	5.75	5.75
Повреждающая доза, сна	160	160	218	160	160	166
Ресурс твэла, эфф.суток	1470÷1560	1430÷1520	1600	1720÷1820	1790÷1890	1585
Максимальное выгорание топлива, % т.а.	17.1÷18.1	17.6÷18.7	23.0	13.8÷14.6	13.2÷14.0	12.7
Электрическая мощность за вычетом затрат на прокачку теплоносителя I и II контуров, МВт	1633	1632	1632	1633	1628	1628

*) Параметры II контура: 340/515°С.

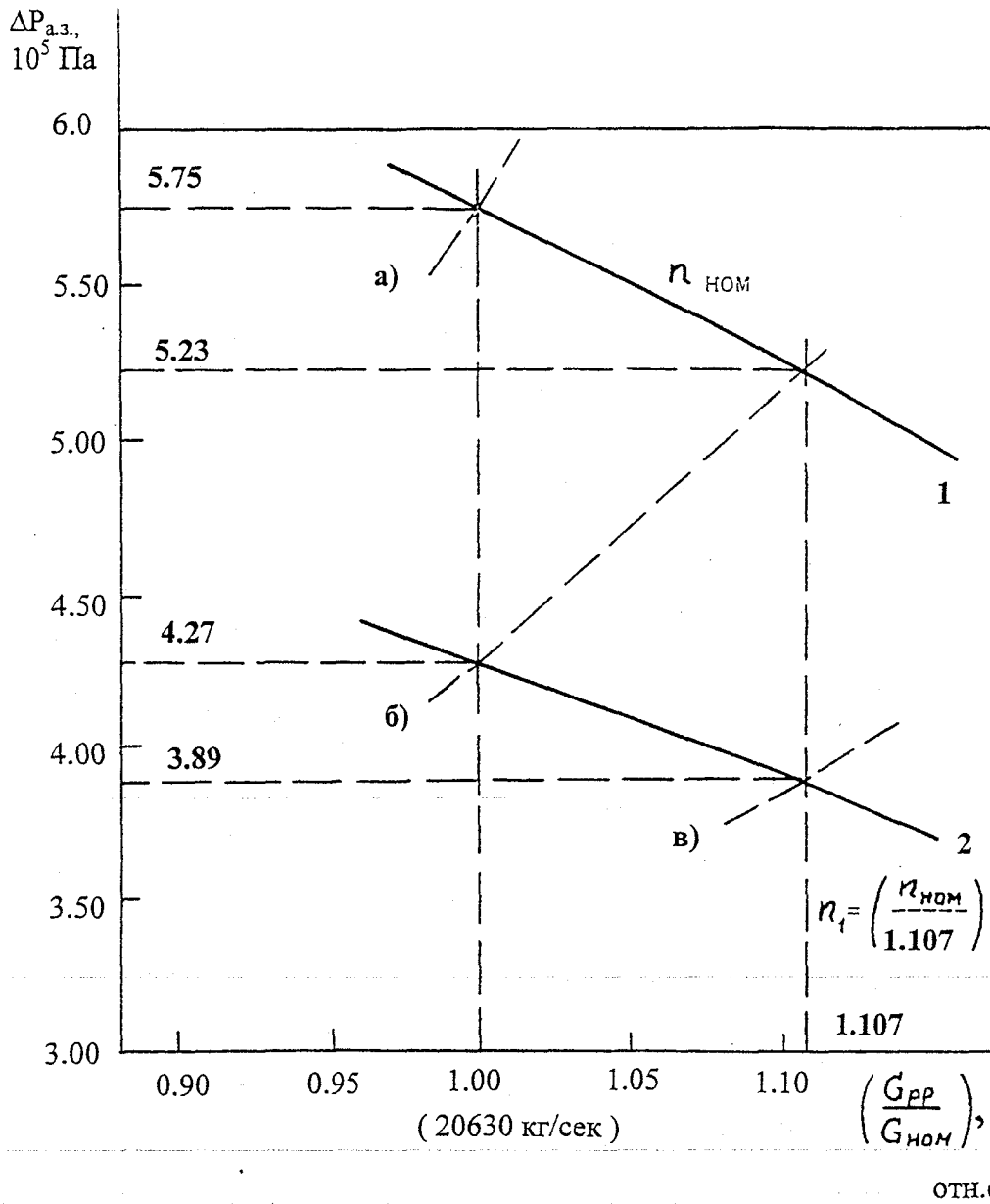


Рис. 3.7. Условия работы ГЦН-I РУ типа БН-1600 М.

1,2 - напорные характеристики ГЦН-I при номинальном числе оборотов ($n_{ном}$) и пониженном в ~ 1.11 раза числе оборотов (n_1)*);
 а, б, в - соответственно, гидравлические характеристики активных зон с диаметрами твэл 8.2 мм, 7.9 мм и 7.4 мм;

*) - приведены к напору на участке активной зоны.

Выводы и основные результаты главы:

1. При заданных параметрах II контура (345/530°C) и фиксированной температуре острого пара 500±505°C выполнено сравнение технико-экономических характеристик вариантов турбоустановок и ПГ энергоблока с РУ большой мощности типа БН-1600М с умеренными (130 ат) и закритическими (240 ат) давлениями острого пара и схемами с паровым и натриевым промперегревом. Показано, что при фиксированной электрической мощности на клеммах генераторов 1675 МВт и уровне температур оболочек твэлов 690±705°C переход с умеренных на закритические давления и от схемы с паровым промперегревом к натриевому приводит к увеличению суммарной металлоемкости и стоимости турбоустановок и корпусных парогенераторов (как с прямыми, так и витыми трубками) и энергоблока в целом. В качестве основного варианта для энергоблока с РУ типа БН-1600М рекомендован цикл на умеренные давления острого пара с паровым промперегревом.
2. Для выбранной схемы с паровым промперегревом и умеренным давлением острого пара на примере оксидных и нитридных активных зон (гомогенного типа и с аксиальной гетерогенностью) проанализировано влияние на температуру оболочки и ресурс твэлов с оболочками из улучшенных аустенитных и ферритно-мартенситных сталей (типа ЭП-450) параметров I и II контуров и температуры острого пара. Показано, что исходя из снижения максимальных температур оболочек твэлов и достижения высоких выгораний топлива для энергоблока с РУ типа БН-1600М в качестве основного целесообразно принять вариант с увеличенной до 5300 мм длиной ТВС (длина газосборника 2000 мм), ленточным дистанционированием периферийных твэлов в пучке и следующими параметрами:

- тепловая мощность блока, МВт	4060
- параметры II контура, °C	340/515
- параметры острого пара (перед турбиной)	
давление, ат	130
температура, °C	485
- температура питательной воды, °C	250
- мощность на клеммах генераторов, МВт	1667.

Дальнейшее снижение параметров II и III контуров с целью уменьшения температур оболочек и повышения ресурса ТВЭЛов нецелесообразно из-за ухудшения технико-экономических показателей энергоблока: возрастают затраты мощности на прокачку теплоносителя II контура, увеличивается металлоемкость ПГ и энергоблока в целом.

3. В соответствии с принятыми параметрами II и III контуров и конструкцией ТВС (см. п.2 выводов данной главы) на основе оптимизационных исследований определены характеристики активных зон РУ типа БН-1600М, обеспечивающие достижение высоких выгораний топлива:

- для ТВЭЛов с нитридным топливом и оболочками из улучшенных аустенитных сталей выгорание 13.2÷14.6% т.а. при ресурсе 1720÷1890 эфф. суток (активная зона с аксиальной гетерогенностью); в случае оболочек из стали ЭП-450 выгорание 12.7% т.а. при ресурсе 1585 эфф. суток;
- для ТВЭЛов с оксидным топливом и оболочками из аустенитных сталей выгорание 17.1÷18.7% т.а. при ресурсе 1430÷1560 эфф. суток; в случае оболочек из стали ЭП-450 выгорание 23% т.а. при ресурсе 1600 эфф. суток.

В случае оксидного топлива для повышения выгорания и улучшения экономических показателей энергоблока целесообразно уменьшить диаметр оболочки из стали ЭП-450 до размеров: $\varnothing 7.4 \times 0.55$ мм и обеспечить долю топлива ~ 0.38 . В остальных случаях (оксидное топливо с аустенитными сталями; нитридное топливо с ферритно-мартенситными или аустенитными сталями) доля топлива равна или превышает 0.47, что обеспечивается оболочками $\varnothing 7.9 \times 0.45$, $\varnothing 8.2 \times 0.60$ и $\varnothing 8.2 \times 0.45$ мм.

Показано, что при неизменном диаметре ТВЭЛА увеличение расхода в I контуре с целью снижения максимальных температур оболочек и увеличения ресурса ТВЭЛА экономически нецелесообразно, т.к. приводит к неоправданному увеличению затрат мощности на прокачку теплоносителя I контура. Увеличение расхода I контура экономически оправдано только в случае уменьшения доли топлива, что достигается за счет уменьшения диаметра ТВЭЛА при сохранении неизменной величины $(d-\delta)/\delta$.

4. В соответствии с характеристиками выбранных вариантов активных зон сформулированы требования к рабочим параметрам ГЦН-I РУ типа БН-1600М: при номинальном числе оборотов ($n_{ном}$) три ГЦН-I должны обеспечить при суммарной производительности 26.3 м³/сек перепад давления на активной зоне

0.523 МПа. Необходимые расходы теплоносителя I контура при выбранных диаметрах твэлов 7.4; 7.9 и 8.2 мм обеспечиваются за счет изменения числа оборотов от $n_{\text{НОМ}}$ до $n_1=0.90 \cdot n_{\text{НОМ}}$.

ГЛАВА 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СУЩЕСТВЕННОГО УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗОПАСНОСТИ И НАТУРАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА АКТИВНОЙ ЗОНЫ РБН С КВА~1.0 ПРИ СНИЖЕНИИ ТРЕБОВАНИЙ ПО НПЭР

Представленные в предыдущей главе результаты исследований в обоснование параметров контуров, вида тепловой схемы, характеристик РУ и ее основного технологического оборудования получены в предположении, что в качестве основного принят вариант нитридной активной зоны с нулевым или отрицательным $\text{НПЭР}_{\text{АЗ+верх}}$ и нулевым $\Delta k_{\text{выгор}}$. Данная концепция активной зоны базируется на устранении потенциальных источников положительной реактивности за счет введения соответствующих ограничений на нейтронно-физические характеристики активной зоны. При этом в соответствии с отечественными нормативными документами ограничение на величину $\text{НПЭР}_{\text{АЗ+верх}} \leq 0$ рассматривается как обязательное условие для обеспечения высокого уровня безопасности РУ. Реализация указанной концепции в рамках проекта РУ типа БН-1600М предопределила многие конструктивные особенности активной зоны и ее элементов: относительно большое уплощение; высокая доля топлива (и как следствие маленький относительный шаг пучка твэлов ~ 1.11); наличие натриевой прослойки между активной зоной и верхним торцевым экраном (ТЗВ заменена экраном из карбида бора); относительно небольшой диаметр твэлов (~ 8.0 мм) при значительном их количестве в ТВС (271 шт.). Это в свою очередь повлияло на выбор ряда характеристик РУ (в частности, на теплогидравлические характеристики активной зоны и натуральные показатели топливного цикла РУ).

Вместе с тем существуют иные подходы к обеспечению безопасности перспективных РБН (например, проект EFR (Европа) и DFBR (Япония)), в которых не выдвигается ограничение типа: $\text{НПЭР}_{\text{АЗ+верх}} \leq 0$. В этом случае разработчики РБН при наличии положительного $\text{НПЭР}_{\text{АЗ+верх}}$ решают задачу по исключению условий, в которых реактивность может высвободиться, и в первую очередь, исключению закипания теплоносителя. Это достигается за счет оптимизации нейтронно-физических характеристик (в первую очередь, плотностного и доплеровского эффектов реактивности), соответствующего выбора

важных для безопасности технических характеристик (расход естественной циркуляции, постоянная выбега ГЦН-I, уровень температур в I контуре и т.д.) и использования пассивно срабатывающих органов воздействия на реактивность.

Выше отмечалось, что в случае нитридной активной зоны с $K_{BA}=1.0$ для выполнения условия $NPЭP_{A3+верх} \leq 0$ требуется обеспечить долю топлива не менее 0.47 и высоту активной части твэла ограничить величиной ~ 800 мм. Отмена ограничения на величину $NPЭP_{A3+верх}$ позволяет улучшить тепло-гидравлические характеристики активной зоны (снизить гидравлическое сопротивление и максимальные температуры оболочек твэлов, увеличить расход естественной циркуляции в контуре и т.д.), а также технико-экономические показатели РУ за счет увеличения относительного шага пучка твэлов (снижения доли топлива) и увеличения высоты активной зоны.

В данной главе представлены результаты выполненных автором расчетных исследований, основная цель которых — определить насколько ухудшаются технические характеристики РБН и натуральные показатели топливного цикла активной зоны при введении ограничения $NPЭP_{A3+верх} \leq 0$. Исследования выполнены в несколько этапов. На первом этапе на примере РУ типа БН-1600 определена зависимость нейтронно-физических (в том числе $NPЭP_{A3+верх}$) и теплогидравлических характеристик активной зоны РБН от величины относительного шага пучка твэлов (доли топлива) и длины активной части твэла. Изменение относительного шага пучка твэлов и доли топлива обеспечивалось за счет изменения числа твэлов в ТВС при сохранении неизменными размеров оболочки: $\varnothing 7.4 \times 0.5$ мм. Исследования выполнены для оксидных и нитридных активных зон при условии сохранения ограничения $K_{BA}=1.0$, т.е. при $\Delta k_{выгор}$ близких к нулю. Соблюдение данного ограничения объясняется тем, что система СУЗ, обеспечивающая компенсацию запаса положительной реактивности на выгорание топлива, является системой активного принципа действия и содержит приводы, движущиеся механические части, переключатели и т.д., возможные отказы которых могут привести к самопроизвольному извлечению стержней КС и вводу положительной реактивности. В этой ситуации выполнение ограничения типа $K_{BA}=1.0$ является одним из эффективных способов повышения безопасности РУ. В приложении 2 дано подробное описание расчетных моделей, используемых при определении нейтронно-физических характеристик, и приведены основные результаты выполненных автором расчетных исследований по определению

зависимости нейтронно-физических характеристик от различных факторов: компоновки и габаритов активной зоны, типа топлива, состава активной зоны и т.д. При определении нейтронно-физических характеристик использовались расчетные программы SINVAR-2 /39/, ТВК-2D /40/ и ММКФК /129/.

Помимо перечисленных получены зависимости от относительного шага пучка твэлов следующих важных для обеспечения безопасности и экономичности установки величин: расход естественной циркуляции, постоянная выбега ГЦН-I, затраты мощности на прокачку теплоносителя I контура. Определены технические и конструкторские решения по элементам активной зоны и РУ, обеспечивающие улучшение вышеперечисленных величин.

На основе полученных зависимостей определены оптимальные с точки зрения величины расхода естественной циркуляции характеристики нитридных и оксидных активных зон с $KVA=1.0$ и $НПЭР_{A3+верх} > 0$: высота активной части твэла, доля топлива, относительный шаг пучка твэлов (при выбранных размерах оболочки).

На следующем этапе на примере РУ типа БН-1600М в соответствии с результатами и рекомендациями выполненных ранее исследований выбраны два варианта активных зон с $\Delta k_{выгор} = 0$ ($KVA=1.05 \div 1.07$) и $НПЭР_{A3+верх} > 0$, для которых определены ресурс и годовое потребление твэлов. В случае нитридного топлива рассмотрен вариант с долей топлива ~ 0.32 и высотой активной части 1200 мм, а в случае оксидного – доля топлива ~ 0.39 при высоте активной зоны 1600 мм. При определении натуральных показателей топливного цикла активных зон рассматривались варианты оболочек из аустенитных и ферритно-мартенситных сталей различной толщины (внутренний диаметр оболочек твэлов сохранялся неизменным). Для рассмотренных вариантов (как в случае традиционной компоновки, так с аксиальной гетерогенностью) получены зависимости годового потребления твэлов от толщины оболочки.

На последнем этапе определена зависимость натуральных показателей топливного цикла активной зоны с $\Delta k_{выгор} = 0$ от ограничения на величину $НПЭР_{A3+верх}$. С этой целью рассмотрены упомянутые выше нитридные и оксидные активные зоны с $\Delta k_{выгор} \approx 0$ и $НПЭР_{A3+верх} > 0$, с одной стороны, и описанные в разделе 3.2.3 нитридные активные зоны с $\Delta k_{выгор} \approx 0$ и $НПЭР_{A3+верх} \leq 0$, с другой стороны. Дополнительно рассмотрены оксидные активные зоны с $\Delta k_{выгор} < 0$ ($KVA \approx 0.80 \div 0.85$) и $НПЭР_{A3+верх} \leq 0$ (см. раздел 3.2.3).

Основные результаты расчетных исследований представлены в работах /25, 123, 124, 125, 126, 127, 128/.

При проведении исследований использовалась разработанная автором программа теплогидравлического расчета ТВС и активной зоны РБН, входящая в состав комплекса программ ССАПС-85.

4.1. Зависимость нейтронно-физических (в том числе НПЭР_{АЗ+верх}) и теплогидравлических характеристик активных зон с КВА=1.0 от величины относительного шага пучка твэлов

Исследование влияния относительного шага пучка твэлов на характеристики активной зоны РБН выполнено на примере РУ типа БН-1600 (проект 80-ых годов) /132, 53/ с сохранением основных проектных и технических решений. При проведении исследований оставались неизменными следующие характеристики проекта:

- габариты корпуса реактора, количество единиц основного технологического оборудования, конструкция поворотных пробок, колонны СУЗ, внутрибаковой биологической защиты, транспортно-технологического тракта;
- радиальные размеры центральной части – общее количество ячеек под сменные элементы (ТВС, ТВС БЗВ, ТВС с В₄С и т.д.) 1043 шт.; сохранены сетка СУЗ и шаг между ТВС 160 мм;
- габариты ТВС по высоте;
- тепловая мощность РУ (4200 МВт), суммарный расход теплоносителя (17111кг/сек) и параметры I контура (354/547°С), а также параметры II и III контуров.

С целью снижения гидравлического сопротивления по I контуру в качестве основного рассмотрен вариант ПТО с тем же количеством теплообменных трубок, но меньшего диаметра: вместо трубок Ø16x1.4 мм применены Ø14x1.0 мм.

Рассмотрен вариант активной зоны с максимально возможным количеством рабочих ТВС 594 шт., двумя рядами ТВС БЗВ и одним рядом сборок сменной защиты с карбидом бора (В₄С). В таблице 4.1 приведено распределение ячеек по зонам реактора. Необходимо отметить, что в составе проекта РУ БН-1600 были проработаны два варианта активной зоны:

- 384 рабочих ТВС с чехлом 153x4.5 мм и 331 твэлом $\varnothing 6.6 \times 0.4$ мм;
- 462 рабочих ТВС с чехлом 153x4.5 мм и 271 твэлом $\varnothing 7.4 \times 0.50$ мм.

При проведении исследований изменение относительного шага пучка твэлов достигалось за счет изменения числа твэлов в ТВС при сохранении диаметра 7.4 мм. Для всех вариантов ТВС размер чехла из стали ЭП-450 принимался 157x2.5 мм. Дистанционирование твэлов в пучке осуществлялось решетками, которые устанавливаются через каждые 260-300 мм (коэффициент местного сопротивления решетки 0.5). В таблице 4.2 приведены характеристики ТВС с различными относительными шагами пучков твэлов. Здесь же даны характеристики проектного варианта ТВС с твэлами $\varnothing 6.6$ мм. Высота активной части твэла определялась из условия, что $K_{ВА}=1.0$, а максимальная линейная мощность твэла не превышает 50.0 кВт/м. При этом, исходя из принятых габаритов ТВС, максимальная длина активной части твэла была ограничена величиной 1600 мм. В качестве основного рассмотрен вариант ТВС без натриевой прослойки, с размещением в пределах одного твэла топливного столба и материала верхней и нижней ТЗВ, с нижним размещением газосборника (в случае нитридного топлива рассматривается твэл с гелиевым подслоем). Длина газосборника принималась равной длине активной части. Дополнительно рассматривались ТВС следующей конструкции:

- без ТЗВ (верхней и нижней); в этом случае выше и ниже твэла предусматриваются экраны из карбида бора и стали толщиной 30 см каждый;
- с твэлами с натриевым подслоем и верхним размещением газосборника (для нитридной активной зоны).

В соответствии с принятыми составами и геометрией ТВС выполнены расчетные исследования по определению нейтронно-физических характеристик и высоты активных зон с различными относительными шагами пучков твэлов. Результаты исследований приведены в таблице 4.3 и приложении 2. Рассматривались оксидные и нитридные активные зоны гомогенного типа с выравниванием полей энерговыделений по радиусу двумя зонами обогащения (ЗМО, ЗБО) с ТЗВ (верхней и нижней) и без них. В связи с небольшим значением $\Delta k_{\text{выгор}}$ принят вариант системы компенсации реактивности на основе топливных КС.

Таблица 4.1

Распределение ячеек центральной части по зонам реактора

Зона реактора	Количество ячеек, шт.
Ячейки под рабочие ТВС зон малого (ЗМО) и большого (ЗБО) обогащения	594
Ячейки под органы СУЗ и нейтронный источник	37
Ячейки под ТВС БЗВ	198
Ячейки под шестигранники первичной защиты (на основе карбида бора и стали)	108
Ячейки ВРХ	106
Итого по реактору	1043

Таблица 4.2

Геометрические характеристики ТВС с различными относительными шагами пучков твэлов

Вариант	1*)	2	3	4	
Диаметр твэла, мм	6.6x0.4	7.4x0.5	7.4x0.5	7.4x0.5	
Шаг между центрами соседних твэлов, мм	7.75	9.1	10.1	11.35	
Относительный шаг пучка твэлов	1.17	1.23	1.36	1.53	
Размер «под ключ» и толщина стенки чехла, мм	153x4.5	157x2.5	157x2.5	157x2.5	
Количество твэлов в ТВС, шт.	331	271	217	169	
Общая длина твэла, мм	2550	2300	2800	3900	
Высота активной части твэла, мм	1000	800	1050	1600	
Тип дистанционирования	Провол.	Решет.	Решет.	Решет.	
Количество дистанционирующих решеток, шт.	-	8	10	13	
Состав ТВС	Доля топлива	0.394	0.393	0.315	0.245
	Доля стали	0.240	0.193	0.166	0.143
	Доля натрия	0.366	0.414	0.519	0.612

*) Проект РУ БН-1600.

Таблица 4.3

Нейтронно-физические характеристики активных зон с нитридным и оксидным топливом
в зависимости от величины относительного шага пучка твэлов

Тип топлива		Нитридное						Оксидное	
Характеристики пучка	Относительный шаг пучка твэлов	1.23		1.36		1.53		1.23	
	Число твэлов ($\varnothing 7.4$ мм) в ТВС, шт.	271		217		169		271	
	Высота активной зоны, мм	800		1050		1600		1200	
	Толщина ТЗВ, см	2x30	-	2x30	-	2x30	-	2x30	-
Обогащение по плутонию (ЗМО/ЗБО), % (среднестационарное состояние)		13.2/16.8	13.0/16.6	13.7/17.5	13.5/17.2	14.0/17.9	13.9/17.8	14.3/18.3	14.2/18.2
Критзагрузка, кг экв. Pu-239		5560	5467	6061	5970	7361	7285	6173	6118
КВА		0.99	1.00	0.98	0.99	0.98	0.99	0.98	0.99
Breeding ratio	Активная зона	0.94	0.99	0.94	0.98	0.95	0.98	0.95	0.98
	ТЗВ+БЗВ	0.51	0.13	0.44	0.14	0.35	0.16	0.37	0.13
	Реактор	1.45	1.12	1.38	1.12	1.30	1.14	1.32	1.11
Изменение реактивности при выгорании топлива за 300 эфф. суток, % Δ K/K		-0.82	-1.22	-0.80	-1.10	-0.72	-0.86	-0.96	-1.22

Из приведенных результатов видно, что в случае оксидного топлива перечисленным выше ограничениям удовлетворяет вариант активной зоны с относительным шагом пучка 1.23 (271 твэл/ТВС): при шаге 1.36 (217 твэл/ТВС) условие $K_{BA}=1.0$ обеспечивается при высоте активной зоны более 1600 мм. В случае нитридного топлива возможный диапазон изменения относительного шага пучка возрастает до 1.53 (169 твэл/ТВС). При этом высота активной зоны изменяется в диапазоне 800÷1600 мм.

Для рассмотренных вариантов активных зон рассчитаны величины пустотного эффекта реактивности. Расчеты показывают, что исключение ТЗВ позволяет существенно уменьшить величину пустотного эффекта (смотри приложение 2). В связи с этим исследование влияния на пустотный эффект относительного шага пучка выполнено для вариантов активных зон без ТЗВ. В таблице 4.4 приведены результаты расчетов величины пустотного эффекта для нитридных активных зон с различными относительными шагами пучков твэлов. Видно, что при выполнении условия $K_{BA}=1.0$ увеличение относительного шага приводит к росту как интегрального пустотного эффекта $NP\dot{E}R_{pp}$, так и величины $NP\dot{E}R_{A3+верх}$. Заметного снижения величины пустотного эффекта можно добиться при использовании твэлов с натриевым подслоем и верхним размещением газосборника. Так, для варианта активной зоны с относительным шагом пучка 1.36 указанное изменение конструкции твэла и ТВС ведет к снижению величины $NP\dot{E}R_{A3+верх}$ с +2.2% до +1.4% $\Delta K/K$.

Замена нитридного топлива на оксидное при сохранении относительного шага пучка и выполнении условия $K_{BA}=1.0$ ведет к росту $NP\dot{E}R_{pp}$ и $NP\dot{E}R_{A3+верх}$. Так, для варианта оксидной активной зоны с относительным шагом 1.23 величина $NP\dot{E}R_{pp}$ равна +2% $\Delta K/K$, тогда как для нитридной активной зоны $NP\dot{E}R_{pp}$ составляет -1% $\Delta K/K$.

Выполненные нейтронно-физические исследования позволили выбрать габариты ТВС с различными относительными шагами пучков твэлов и определить теплогидравлические характеристики активных зон. В таблице 4.5 приведена зависимость гидравлического сопротивления I контура и расхода естественной циркуляции от относительного шага пучка твэлов.

Таблица 4.4

Величина натриевого пустотного эффекта реактивности активной зоны с нитридным топливом без торцевых зон воспроизводства в зависимости от относительного шага пучка твэлов*)

Характеристики пучка	Относительный шаг пучка твэлов	1.23	1.36	1.53
	Число твэлов ($\varnothing 7.4$ мм) в ТВС, шт.	271	217	169
	Высота активной зоны, мм	800	1050	1600
	[Высота верхнего газосборника], см [Длина нижнего газосборника]	<u>20</u> 60	<u>20</u> 85	<u>20</u> 140
НПЭР _{пр} , %ΔК/К	Расчет выполнен по программе ММКФК	-0.762±0.280	+0.099±0.318	+2.773±0.290
	Расчет выполнен в диффузионном приближении с использованием программы ТВК-2D	-1.010	+0.029	+2.721
НПЭР _{АЗ+верх} , %ΔК/К (расчет выполнен по прогр. ТВК-2D)	Нижнее расположение газосборника (твэлы с газовым подслоем)	+0.924	+2.193	+4.458
	Верхнее расположение газосборника (твэлы с натриевым подслоем)	-	+1.411	-
	Величина газосборника равна сумме верхнего и нижнего газосборников для случая твэлов с газовым подслоем			

*) Верхний и нижний экраны из карбида бора, размещенные, соответственно, над верхним и под нижним газосборниками, имеют толщину по 30 см каждый.

Таблица 4.5

Зависимость расхода естественной циркуляции и гидравлического сопротивления
I контура от конструкции активной зоны и ТВС

Вариант активной зоны	1	2	3	4	5	6
ЗАДАНИЕ ПАРАМЕТРЫ						
Количество рабочих ТВС, шт.	384	462	594	594		
Размер чехла, мм	153x4.5			157x2.5		
Размер твэла, мм	6.6x0.4	7.4x0.45		7.4x0.50		
Число твэлов в ТВС, шт.	331	271	271	271	217	169
Относительный шаг пучка, отн. ед.	1.17	1.16	1.16	1.23	1.36	1.53
Длина твэла (с учетом торцевых экранов), мм	2550			2300	2800	3900
Расстояние между центрными плоскостями активной зоны и пучка теплообменных трубок ПТО, мм	2700			3050	2675	1850
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ						
Гидравлическое сопротивление I контура, 10^5 Па	7.79	5.56	3.55	1.95	1.55	1.43
Расход естественной циркуляции*), %	2.0	2.5	3.1	6.7	7.0	6.1

*) Расход Е.Ц. приведен в процентах от $G_{\text{НОМ}}=17111$ кг/сек.

Здесь же приведены характеристики проектных вариантов активных зон РУ типа БН-1600, а также вариант активной зоны с 594 ТВС с чехлом 153x4.5 мм и 271 твэлом $\varnothing 7.4$ мм. При выполнении расчетов принималось, что гидравлическое сопротивление торцевых экранов из карбида бора и стали равно гидравлическому сопротивлению пучка твэлов такой же длины.

Из приведенных данных видно, что увеличение числа рабочих ТВС с 384 шт. до 594 шт. при одновременном увеличении диаметра твэла с 6.6 мм до 7.4 мм (относительный шаг пучка твэлов фактически остается неизменным) позволяет снизить гидравлическое сопротивление I контура почти в 2.2 раза и увеличить расход естественной циркуляции с 2% до 3.1% (смотри варианты 1 и 3 в табл. 4.5). С увеличением относительного шага пучка твэлов до 1.53 (достигается за счет увеличения размеров чехла и уменьшения числа твэлов в ТВС до 169 шт.) гидравлическое сопротивление I контура снижается еще в 2.5 раза и составляет величину $1.43 \cdot 10^5$ Па. При увеличении относительного шага пучка твэлов с 1.23 до 1.36 расход естественной циркуляции возрастает и составляет величину 7%. Дальнейшее увеличение относительного шага приводит к уменьшению расхода естественной циркуляции, т.к. с увеличением длины активной части твэла сокращается расстояние между центральными плоскостями активной зоны и ПТО и, соответственно, уменьшается движущий напор. Таким образом, при принятых ограничениях на конструкцию РУ для нитридной активной зоны относительный шаг пучка ~ 1.36 является оптимальным по комплексу теплогидравлических характеристик и дальнейшее его увеличение нецелесообразно.

Достигнутое снижение давления теплоносителя в I контуре позволило рассмотреть ряд технических мер по упрощению конструкции центральной части РУ, имеющих целью дальнейшее улучшение теплогидравлических характеристик. Так, были исключены модульные коллекторы и уменьшена высота напорной камеры с 2000 мм до 1120 мм (см. рисунок 4.1). Это позволило уменьшить гидравлическое сопротивление I контура и заглубить активную зону на 1800 мм (920 мм за счет исключения модульных коллекторов и 880 мм за счет уменьшения высоты камеры). Далее, исключена нижняя плита напорной камеры и напорный трубопровод. В этом случае в нижней части бака реактора создается зона повышенного давления, в которую теплоноситель нагнетается насосами через специальные проходки в опорном поясе (см. рисунок 4.2).

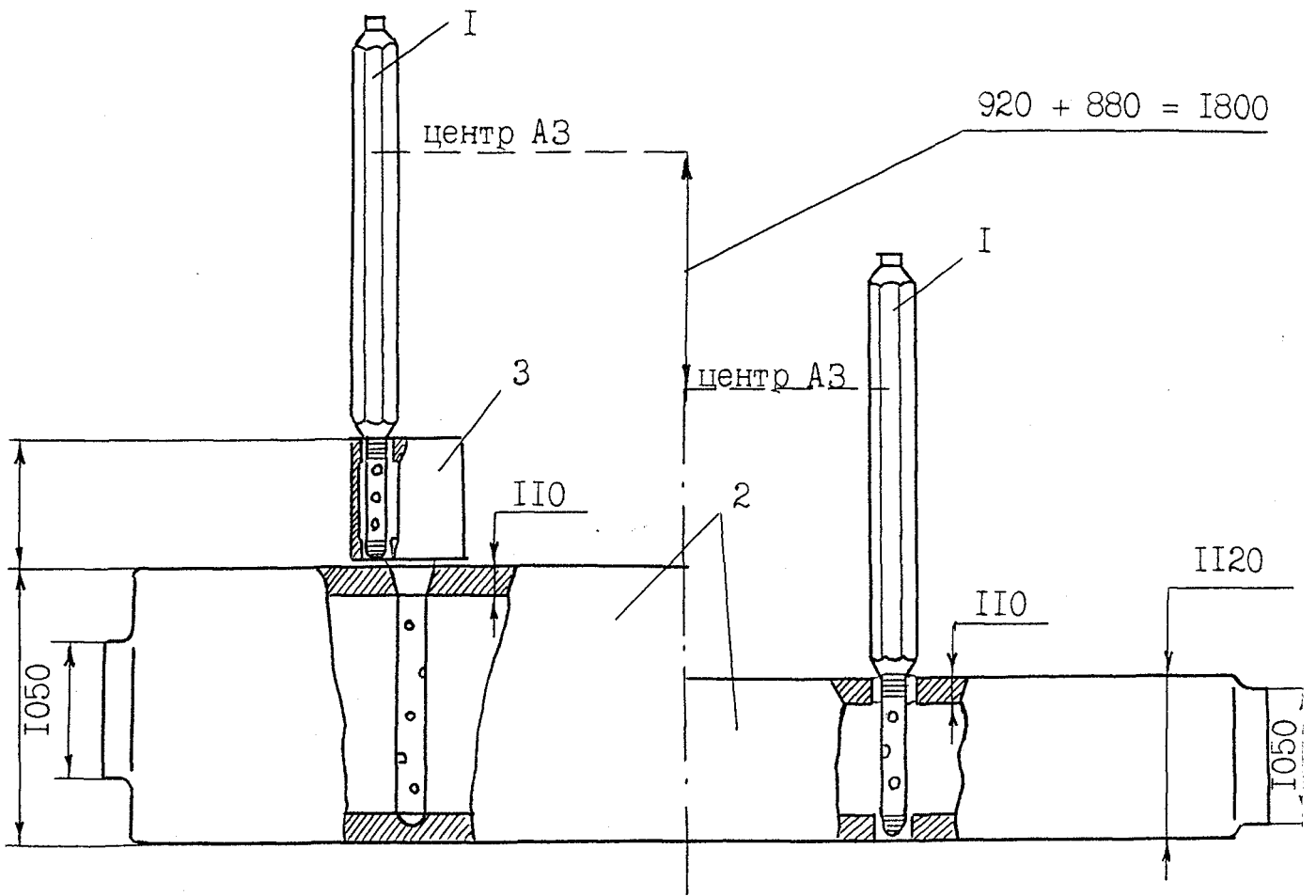


Рис.4.1. Принципиальная схема напорной камеры с модульными коллекторами и без них

I - ТВС; 2 - напорная камера; 3 - модульные коллектора

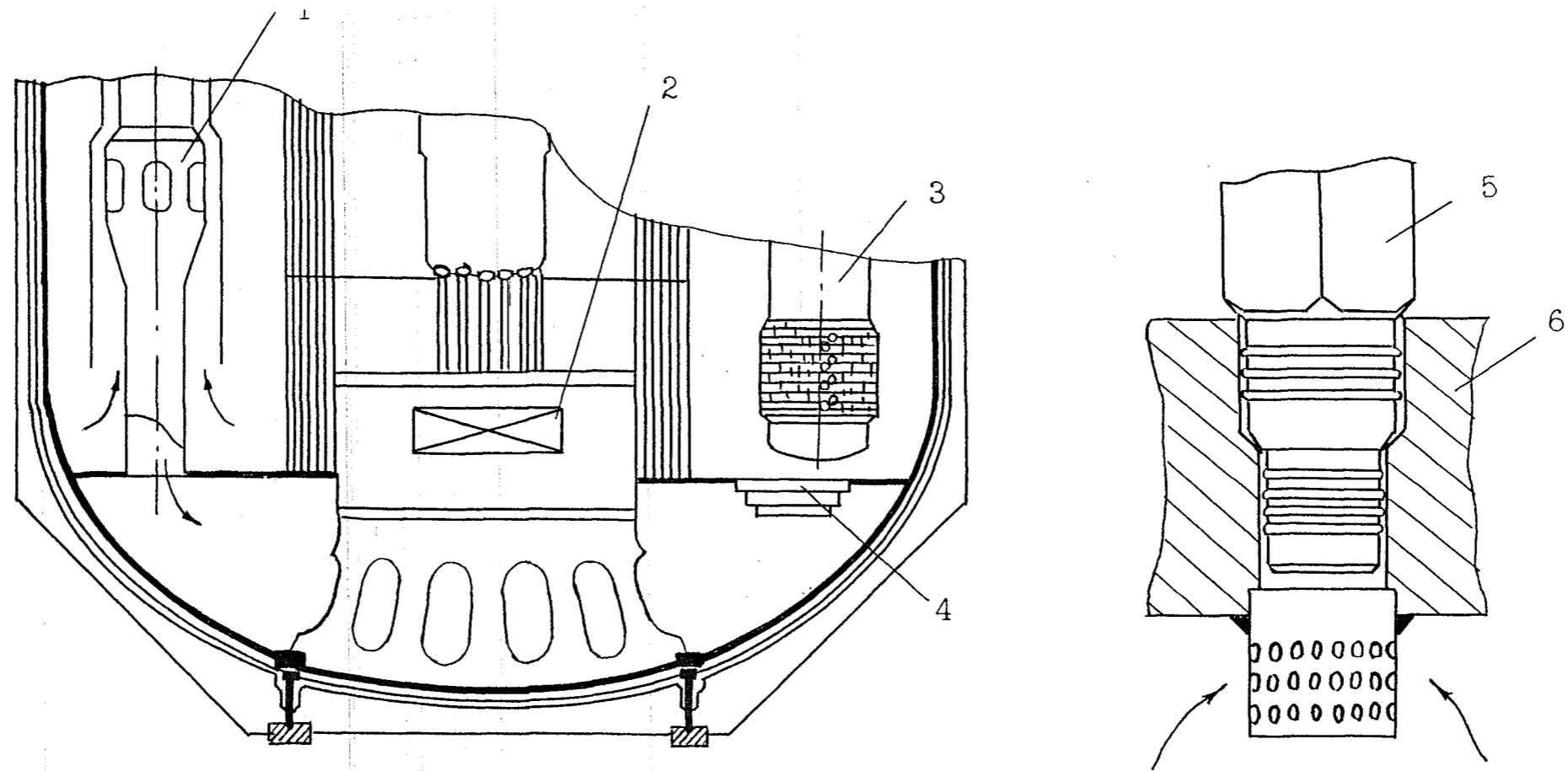


Рис.4.2. Принципиальная схема реактора и узла крепления ТВС

1 - насос; 2 - активная зона; 3 - теплообменник; 4 - гидравлический диод;
5 - ТВС; 6 - плита.

В отверстиях верхней плиты напорной камеры устанавливают дроссельные устройства для профилирования расхода через ТВС. Применен укороченный хвостовик с прямым входом теплоносителя и увеличенным внутренним диаметром: длина 300 мм и $\varnothing 109 \times 3$ мм. От всплытия ТВС удерживается за счет собственного веса. Расчеты показывают, что данное упрощение напорной камеры и напорной части тракта I контура позволяет заметно уменьшить гидравлическое сопротивление и дополнительно заглубить верхнюю плиту не менее чем на 500 мм. В таблице 4.6 показано влияние на гидравлические характеристики I контура совокупности перечисленных мер по упрощению конструкции напорного участка трассы теплоносителя. Здесь же приведены значения коэффициента запаса до всплытия для ТВС с нитридным топливом. Величина коэффициента запаса до всплытия определялась согласно соотношению /53/:

$$K_{\text{вспл}} = \frac{m_{\text{TBC}} \cdot g - F_{\text{арх}}}{\Delta p_{\text{TBC}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{\text{отв}}^2},$$

где

$(m_{\text{TBC}} \cdot g)$ и $F_{\text{арх}}$ – соответственно, сила тяжести и архимедова сила, действующие на ТВС;

Δp_{TBC} – гидравлическое сопротивление ТВС;

$d_{\text{отв}}$ – диаметр отверстия в опорной плите.

Видно, что при относительных шагах пучка $1.23 \div 1.53$ запас до всплытия больше 1.2 и изменяется в диапазоне $1.34 \div 2.98$.

При удалении нижней плиты напорной камеры избыточное давление на корпус РУ возрастет в зависимости от относительного шага пучка твэлов на величину гидравлических потерь в контуре, т.е. на $0.072 \div 0.125$ МПа. Необходимо отметить, что низкое гидравлическое сопротивление I контура позволяет проектировать ГЦН-I на пониженное число оборотов с относительно низким значением минимально-допустимого кавитационного подпора. Это позволяет снизить давление газа в баке аппарата (примерно до атмосферного) и, соответственно, уменьшить избыточное давление на корпус реактора.

Из представленных в таблице 4.6 данных видно, что упрощение конструкции напорной части трассы теплоносителя позволяет заметно снизить гидравлическое сопротивление I контура и увеличить расход естественной циркуляции до $10.5 \div 12.2\%$ в зависимости от относительного шага пучка.

Таблица 4.6

Зависимость гидравлических характеристик I контура варианта РУ с упрощенной конструкцией напорного участка трассы от относительного шага пучка твэлов

Вариант	1	2	3
Количество рабочих ТВС, шт.	594		
Число твэлов в ТВС, шт.	271	217	169
Относительный шаг пучка, отн. ед.	1.23	1.36	1.53
Гидравлическое сопротивление I контура, 10^5 Па	1.25	0.85	0.72
Расход естественной циркуляции, %	10.5	12.2	11.9
Гидравлическое сопротивление ТВС, 10^5 Па	1.13	0.73	0.61
Коэффициент запаса до всплытия*), отн. ед.	1.34	2.15	2.98
Расход естественной циркуляции при наличии в контуре «гидравлического» диода, байпасирующего в режиме Е.Ц. ГЦН-I	12.1	14.0	13.6

*) Нитридное топливо.

Заметного увеличения расхода естественной циркуляции можно добиться, если организовать в опорном поясе непосредственно под ПТО проходки и разместить в них специальные «гидравлические диоды», позволяющие в режиме естественной циркуляции байпасировать ГЦН-I. При работающих ГЦН-I устройство закрыто; при отключении насосов устройство открывается, позволяя теплоносителю напрямую попадать из выходных окон ПТО в зону повышенного давления. Срабатывание устройства при отключении ГЦН-I строится на пассивных принципах. В таблице 4.6 приведены значения расхода естественной циркуляции для активных зон с различными относительными шагами пучков твэлов при наличии «гидравлических диодов» в контуре циркуляции.

Увеличение числа ТВС и относительного шага пучка, а также упрощение конструкции напорного участка трассы теплоносителя позволяют не только снизить гидравлическое сопротивление I контура и увеличить расход естественной циркуляции, но и увеличить постоянную выбега ГЦН-I и уменьшить затраты на прокачку теплоносителя. В таблице 4.7 приведена зависимость перечисленных величин от относительного шага пучка твэлов. Здесь же приведены характеристики проектного варианта РУ БН-1600.

Постоянная выбега ГЦН-I определяется моментом инерции вращающихся частей насоса, его мощностью и числом оборотов и характеризует темп уменьшения производительности после отключения электропитания. Для расчета постоянной выбега ГЦН-I использовалось соотношение:

$$\tau \cong \frac{J_{прив} \cdot n_{ном}^2}{W_n \cdot \left(\frac{60}{\pi}\right)},$$

где

$J_{прив}$ — приведенный маховый момент вращающихся частей насоса;

W_n — мощность насоса;

$n_{ном}$ — номинальное число оборотов.

Опыт разработки насосов показывает, что с уменьшением напора (при неизменной производительности) уменьшаются габариты рабочего колеса и снижается величина махового момента. В связи с этим для сохранения неизменным приведенного махового момента для РУ с низким гидравлическим сопротивлением были рассмотрены варианты ГЦН-I с маховиком.

Таблица 4.7

Зависимость постоянной выбега ГЦН-I и затрат на прокачку теплоносителя I контура от относительного шага пучка твэлов

Вариант	1*)	2	3	4
Относительный шаг пучка, отн. ед.	1.17	1.23	1.36	1.53
Гидравлическое сопротивление I контура, 10^5 Па	7.79	1.25	0.85	0.72
Затраты мощности на прокачку теплоносителя I контура, МВт	24.03	3.86	2.62	2.22
Число оборотов ГЦН-I, об/мин	1000	750	750	750
Постоянная выбега ГЦН-I, сек	5	17.5	25.8	30.4
Мощность, потребляемая одним ГЦН-I при числе оборотов 20% $n_{ном}$, кВт	48.06	7.72	5.24	4.44

*) Проект РУ БН-1600.

При неизменном значении $J_{\text{прив}}$ постоянная выбега определяется числом оборотов и мощностью насоса. Из таблицы 4.7 видно, что, несмотря на снижение числа оборотов до 750 об/мин, снижение гидравлического сопротивления I контура позволяет увеличить постоянную выбега в 3.5÷6.1 раза в зависимости от величины относительного шага пучка твэлов и довести ее до значений 17÷30 сек.

Затраты мощности на прокачку теплоносителя I контура сокращаются в 6÷11 раз по сравнению с проектом РУ БН-1600. В этом случае затраты мощности на один ГЦН-I для обеспечения его работы при 20% $n_{\text{ном}}$ составят 4÷8 кВт. При таких мощностях в качестве резервного источника питания могут использоваться аккумуляторы, являющиеся более надежным источником энергии по сравнению с дизель-генератором.

Представленные выше результаты исследований показывают, что в рамках проектных решений РУ типа БН-1600 могут быть созданы нитридные активные зоны с $KVA=1.0$ и различными относительными шагами пучков твэлов, изменяющимися в диапазоне 1.23÷1.53. Для активных зон данного типа характерны низкие значения гидравлического сопротивления и затрат мощности на прокачку теплоносителя I контура, высокие значения важных для безопасности характеристик: постоянной выбега ГЦН-I и расхода естественной циркуляции. С другой стороны, для активных зон характерны положительные значения плотностного и пустотного эффектов реактивности, которые возрастают с увеличением относительного шага пучка твэлов. Выше отмечалось, что с точки зрения величины гидравлического сопротивления и расхода естественной циркуляции целесообразно принять величину относительного шага пучка твэлов ~ 1.36 , которой соответствует доля топлива ~ 0.32 .

Окончательный выбор оптимальной конструкции активной зоны с $KVA=1.0$ может быть сделан на основе результатов комплексных исследований, направленных как на определение технико-экономических показателей, так и на изучение поведения активных зон с различными относительными шагами пучков твэлов в авариях типа ULOF, UTOP и ULOHS. Последнее является предметом специальных исследований.

4.2. Улучшение натуральных показателей топливного цикла активной зоны с КВА~1 при снижении требований по $\text{НПЭР}_{\text{АЗ+верх}}$

Исследование зависимости натуральных показателей топливного цикла от ограничения на величину $\text{НПЭР}_{\text{АЗ+верх}}$ выполнено на примере нитридных активных зон (традиционных и с аксиальной гетерогенностью) РУ типа БН-1600М. С этой целью рассмотрены варианты активных зон с нулевым изменением реактивности за микрокампанию ($\Delta k_{\text{выгор}} \sim 0$) двух типов:

- с высокой долей топлива 0.47 и отрицательным $\text{НПЭР}_{\text{АЗ+верх}}$;
- с уменьшенной долей топлива и положительным $\text{НПЭР}_{\text{АЗ+верх}}$.

Подробное описание конструкции и параметров активных зон первого типа с отрицательным $\text{НПЭР}_{\text{АЗ+верх}}$ приведено в разделе 3.2.3. Там же дано описание технических характеристик РУ типа БН-1600М: тепловая мощность энергоблока и параметры контуров.

На основе оптимизационных исследований и с учетом рекомендаций раздела 4.1 в качестве активной зоны второго типа с $\text{НПЭР}_{\text{АЗ+верх}} > 0$ выбран вариант с 684 рабочими ТВС, долей топлива ~ 0.32 и высотой активной части твэла 1200 мм. Основные характеристики ТВС и ее элементов для активных зон второго типа приведены в таблице 4.8. Количество твэлов в ТВС выбиралось исходя из ограничения на максимальную линейную мощность твэла: не более 50 кВт/м. Внутренний диаметр оболочки выбирался в соответствии с количеством твэлов в ТВС и принятой долей топлива. Дополнительно в таблице 4.8 приведены характеристики ТВС активной зоны с оксидным топливом. Расчеты показывают, что при длине топливного столба 1600 мм для достижения нулевого значения $\Delta k_{\text{выгор}}$ необходимо обеспечить долю топлива ~ 0.39 . Количество твэлов было выбрано таким же, как в случае нитридной активной зоны. Необходимое значение доли топлива обеспечивалось за счет увеличения внутреннего диаметра оболочки твэла. Натуральные показатели топливного цикла данной активной зоны сравнивались с соответствующими показателями оксидных активных зон с долей топлива $\varepsilon_T = 0.40 \div 0.47$ и $\text{НПЭР}_{\text{АЗ+верх}} \leq 0$, описание которых дано в разделе 3.2.3. Для активных зон второго типа (как с оксидным, так и с нитридным топливом) предусматривалось использование топливных КС.

Характеристики вариантов активных зон РУ типа БН-1600М
с нулевыми значениями $\Delta k_{\text{выгор}}$ и $\text{НПЭР}_{\text{А3+верх}} > 0$

Тип топлива	Окись	Нитрид
Размер «под ключ» и толщина стенки чехла, мм	157x2.5	
Общая длина ТВС, мм	5300	
В том числе: головка	205	
экран на основе В ₄ С и стали	635	
натриевая прослойка	450	
хвостовик с переходником	800	
Общая длина твэла, мм	3210	
В том числе: нижняя торцевая зона воспроизводства	350	
активная часть твэла	1600	1200
общая длина газосборника	1200	1600
Принцип дистанционирования твэлов в пучке	решетки	
Количество дистанционирующих решеток на длине пучка твэлов, шт.	14	
Доля топлива	0.393	0.319
Число твэлов в ТВС, шт.	169	169
Внутренний диаметр оболочки твэла, мм	8.1	7.3
Максимальное энерговыделение в активной зоне, МВт/м ³	~267	~343
Максимальная линейная мощность твэла, кВт/м	~35.0	~45.0
Максимальная энергонапряженность топлива, МВт/м ³	~679	~1075
Шаг расположения твэлов в пучке \bar{t} , мм	11.45	11.40
НПЭР _{А3+верх} , % $\Delta k/k$	+(3.5÷4.0)	+(2.7÷3.0)

Для оксидных и нитридных активных зон второго типа, характеристики которых даны в таблице 4.8, рассмотрено несколько вариантов ТВС, отличающихся толщиной и наружным диаметром оболочки твэла (внутренний диаметр оболочки сохранялся неизменным). Необходимо отметить, что увеличение толщины оболочки, сопровождающееся увеличением доли стали в активной зоне, приводит к некоторому увеличению $\text{НПЭР}_{\text{А3+верх}}$ и снижению КВА (см. приложение 2). В соответствии с геометрическими размерами определялись температурные условия облучения и ресурс твэлов. В качестве материала оболочек твэлов рассматривались улучшенные аустенитные и ферритно-мартенситные стали. При определении ресурса твэла с оболочками из различных материалов были сделаны те же допущения и упрощения, что и при определении ресурса твэлов активной зоны с нулевыми значениями $\text{НПЭР}_{\text{А3+верх}}$ и $\Delta k_{\text{выгор}}$ (см. главу 3).

В таблицах 4.9 и 4.10 представлены ресурсы твэлов и теплогидравлические характеристики оксидных активных зон, соответственно, гомогенного и гетерогенного типов с различными размерами оболочек твэлов из ферритно-мартенситной и аустенитной сталей. Аналогичные характеристики для нитридных активных зон гомогенного и гетерогенного типов приведены в таблицах 4.11 и 4.12. На рисунках 4.3-4.6 приведены зависимости годового потребления твэлов от толщины оболочки (при $\text{КИУМ}=0.8$) для оксидных и нитридных активных зон гомогенного и гетерогенного типа при использовании ферритно-мартенситных и аустенитных сталей.

Здесь же отмечены величины годового потребления твэлов для вариантов активных зон, характеристики которых представлены в разделе 3.2.3 (смотри таблицу 3.23). Местоположение на графике выбиралось из условия, чтобы величины $\eta=(d_{\text{внут}}+\delta)/\delta$, где $d_{\text{внут}}$ и δ - внутренний диаметр и толщина оболочки, для рассматриваемых вариантов и для вариантов из таблиц 4.9-4.12 были одинаковыми. Из рисунков видно, что при одинаковых размерах оболочек твэлов в случае использования аустенитных сталей годовое потребление твэлов ниже, чем в случае применения стали типа ЭП-450.

Сравнение характеристик активных зон $\text{НПЭР}_{\text{А3+верх}}$ больше и меньше нуля (гомогенного и гетерогенного типа с оксидным и нитридным топливом, с оболочками твэлов из аустенитных и ферритно-мартенситных сталей) показало следующее. Снижение доли топлива и, соответственно, увеличение относительного шага пучка твэлов, сопровождающееся увеличением высоты активной зоны с целью

Таблица 4.9

Характеристики вариантов гомогенной активной зоны с оксидным топливом с различными размерами оболочек из ферритно-мартенситной и аустенитной сталей

Вариант		1	2	3	4	5
Наружный диаметр и толщина оболочки твэла, мм		8.7x0.30	8.9x0.40	9.1x0.50	9.3x0.60	9.5x0.70
Относительный шаг пучка твэлов, отн. ед.		1.32	1.29	1.26	1.23	1.21
Доля стали в объеме активной зоны		0.128	0.149	0.171	0.193	0.215
Максимальная температура оболочки твэла (с учетом факторов перегрева), °С		620	623	626	629	633
Гидравлическое сопротивление активной зоны (с учетом модульных коллекторов), 10 ⁵ Па		2.11	2.23	2.39	2.58	2.82
Гидравлическое сопротивление пучка твэлов, 10 ⁵ Па		0.91	1.03	1.19	1.38	1.62
Ферритно-мартенситная сталь	Ресурс твэла (длительная прочность), эфф.с.	659	849	1007	1143	1262
	V^{\max} , %т.а.	5.06	6.52	7.73	8.77	9.69
	$(kt)^{\max}$, с.н.а.	58	75	89	101	112
Аустенитная сталь	Ресурс твэла (длительная прочность), эфф.с.	1446	1962	2410	2793	3110
	Ресурс твэла (повреждающая доза), эфф.с.	1808	1808			
	Минимальный ресурс по двум критериям, эфф. с.	1446	1808			
	V^{\max} , %т.а.	11.10	13.88			
	$(kt)^{\max}$, с.н.а.	128	160			

Таблица 4.10

Характеристики вариантов активной зоны с аксиальной гетерогенностью и оксидным топливом с оболочками твэлов различных размеров из ферритно-мартенситной и аустенитной сталей

Вариант		1	2	3	4	5
Наружный диаметр и толщина оболочки твэла, мм		8.7x0.30	8.9x0.40	9.1x0.50	9.3x0.60	9.5x0.70
Максимальная температура оболочки твэла (с учетом факторов перегрева), °С		629	632	635	638	642
Ферритно-мартенситная сталь	Ресурс твэла (длительная прочность), эфф.с.	642	827	982	1115	1231
	V^{\max} , %т.а.	4.93	6.35	7.54	8.56	9.45
	$(kt)^{\max}$, с.н.а.	47÷50	61÷65	72÷77	82÷87	91÷96
Аустенитная сталь	Минимальный ресурс по двум критериям, эфф. с.	1295	1753	2043÷2170		
	V^{\max} , %т.а.	9.94	13.45	15.68÷16.65		
	$(kt)^{\max}$, с.н.а.	96÷101	129÷137	160		

Таблица 4.11

Характеристики вариантов гомогенной активной зоны с нитридным топливом с оболочками твэлов различных размеров из ферритно-мартенситной и аустенитной сталей

Вариант		1	2	3	4	5
Наружный диаметр и толщина оболочки твэла, мм		7.9x0.30	8.1x0.40	8.3x0.50	8.5x0.60	8.7x0.70
Относительный шаг пучка твэлов, отн. ед.		1.44	1.41	1.37	1.34	1.31
Доля стали в объеме активной зоны		0.122	0.142	0.161	0.181	0.202
Максимальная температура оболочки твэла (с учетом факторов перегрева), °С		629	632	635	639	643
Гидравлическое сопротивление активной зоны (с учетом модульных коллекторов), 10 ⁵ Па		1.77	1.83	1.90	1.99	2.09
Гидравлическое сопротивление пучка твэлов, 10 ⁵ Па		0.57	0.63	0.70	0.79	0.89
Ферритно-мартенситная сталь	Ресурс твэла (длительная прочность), эфф.с.	715	920	1091	1236	1365
	V^{\max} , %т.а.	6.02	7.74	9.18	10.40	11.49
	$(kt)^{\max}$, с.н.а.	72	92	110	124	137
Аустенитная сталь	Минимальный ресурс по двум критериям, эфф. с.	1494	1593			
	V^{\max} , %т.а.	12.57	13.40			
	$(kt)^{\max}$, с.н.а.	150	160			

Таблица 4.12

Характеристики вариантов активной зоны с аксиальной гетерогенностью и нитридным топливом с оболочками твэлов различных размеров из ферритно-мартенситной и аустенитной сталей

Вариант		1	2	3	4	5
Наружный диаметр и толщина оболочки твэла, мм		7.9x0.30	8.1x0.40	8.3x0.50	8.5x0.60	8.7x0.70
Максимальная температура оболочки твэла (с учетом факторов перегрева), °С		638	641	644	648	652
Ферритно-мартенситная сталь	Ресурс твэла (длительная прочность), эфф.с.	698	897	1064	1206	1333
	V^{\max} , %т.а.	5.88	7.55	8.95	10.15	11.22
	$(kt)^{\max}$, с.н.а.	59÷62	75÷80	89÷95	101÷107	112÷119
Аустенитная сталь	Минимальный ресурс по двум критериям, эфф. с.	1341	1809	1800÷1912		
	V^{\max} , %т.а.	11.29	15.22	15.15÷16.09		
	$(kt)^{\max}$, с.н.а.	113÷119	151÷161	160		

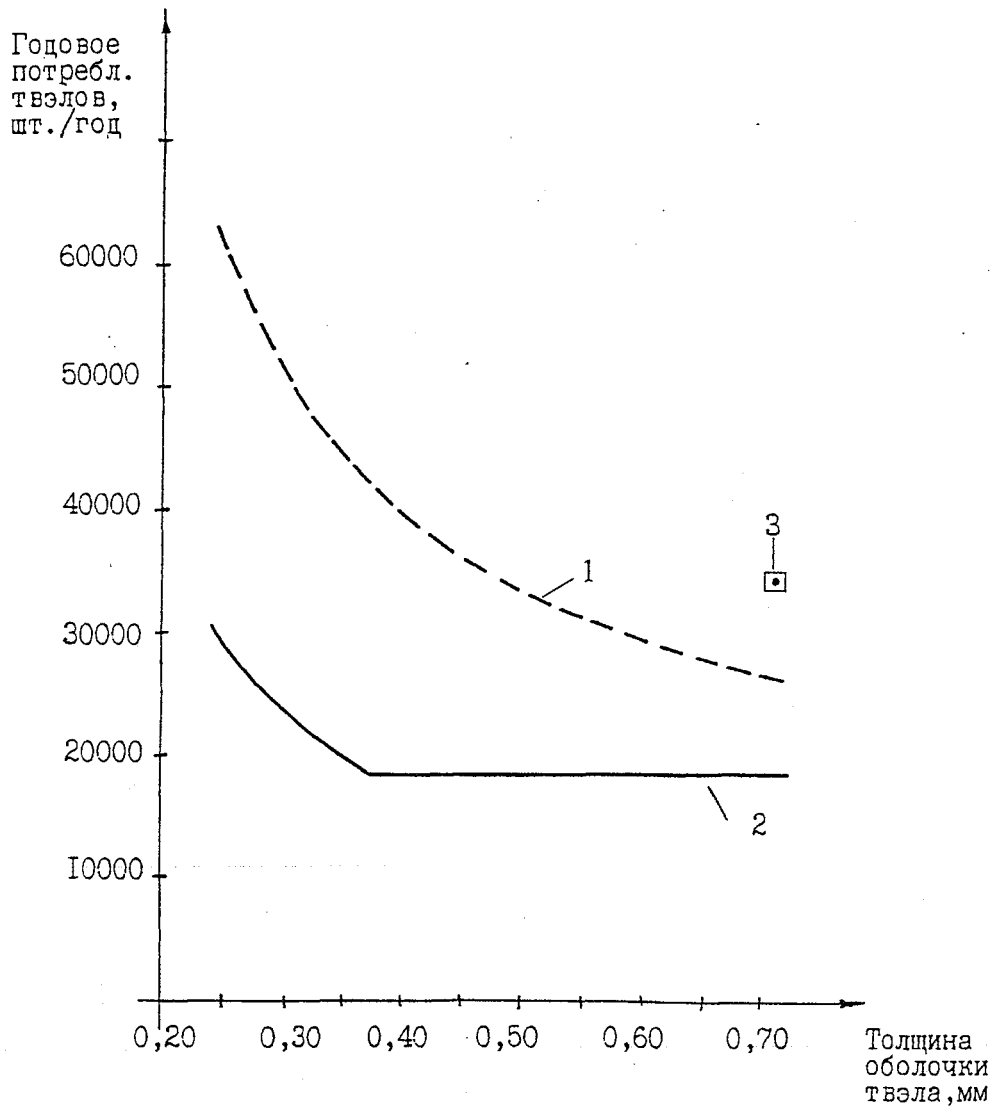


Рис. 4.3. Расход твэлов гомогенной активной зоны с оксидным топливом в зависимости от размеров и материала оболочки (внутренний диаметр оболочки твэла 8.1 мм).

- 1 - ферритно-мартенситная сталь (типа ЭП - 450)
- 2 - аустенитная сталь
- 3 - активная зона с высотой активной части твэла 800 мм, 271 твэлом в ТВС и оболочкой твэла из стали ЭП-450 $\varnothing 7.4 \times 0.55$ мм .

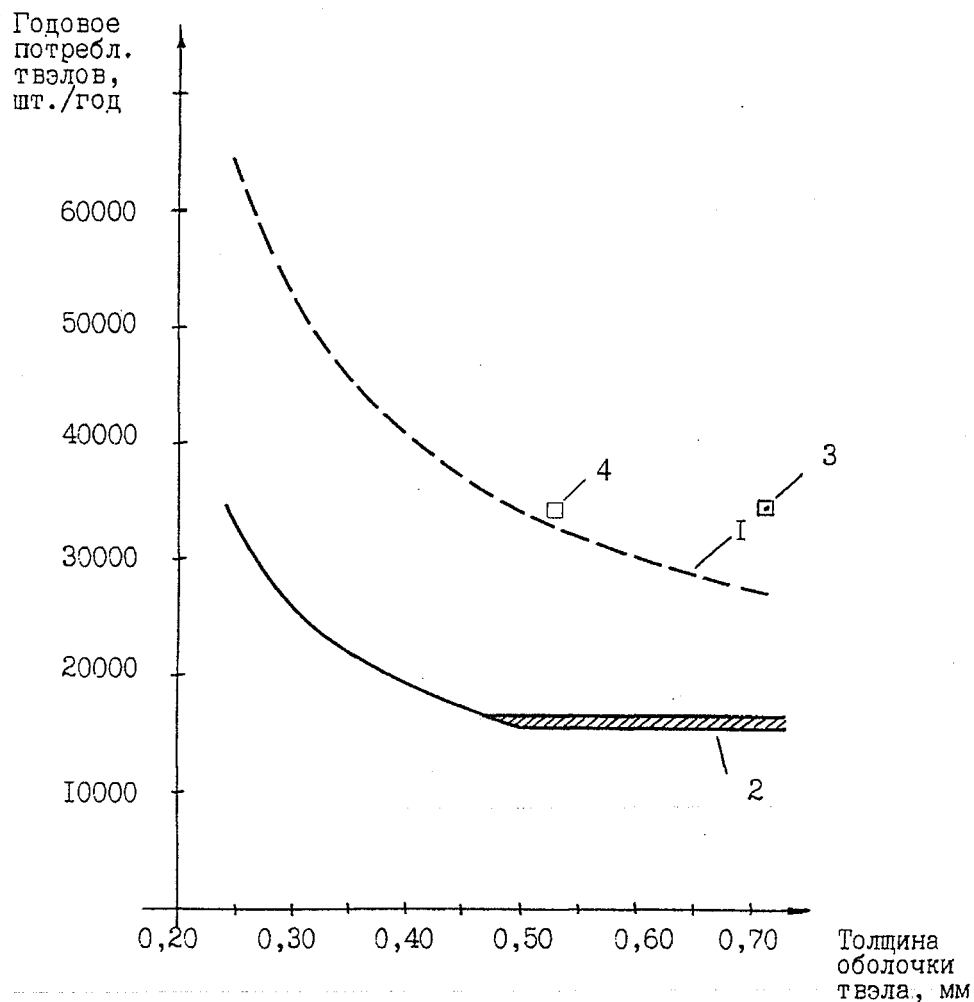


Рис. 4.4. Расход ТВЭЛ гетерогенной активной зоны с оксидным топливом в зависимости от размеров и материала оболочки (внутренний диаметр оболочки 8.1 мм).

- 1 - ферритно-мартенситная сталь (типа ЭП-450)
- 2 - аустенитная сталь
- 3 - активная зона высотой 800 мм, 271 ТВЭлом в ТВС и оболочкой из стали ЭП-450 $\varnothing 7.4 \times 0.55$ мм
- 4 - активная зона высотой 800 мм, 271 ТВЭлом в ТВС и оболочкой из аустенитной стали $\varnothing 7.9 \times 0.45$ мм.

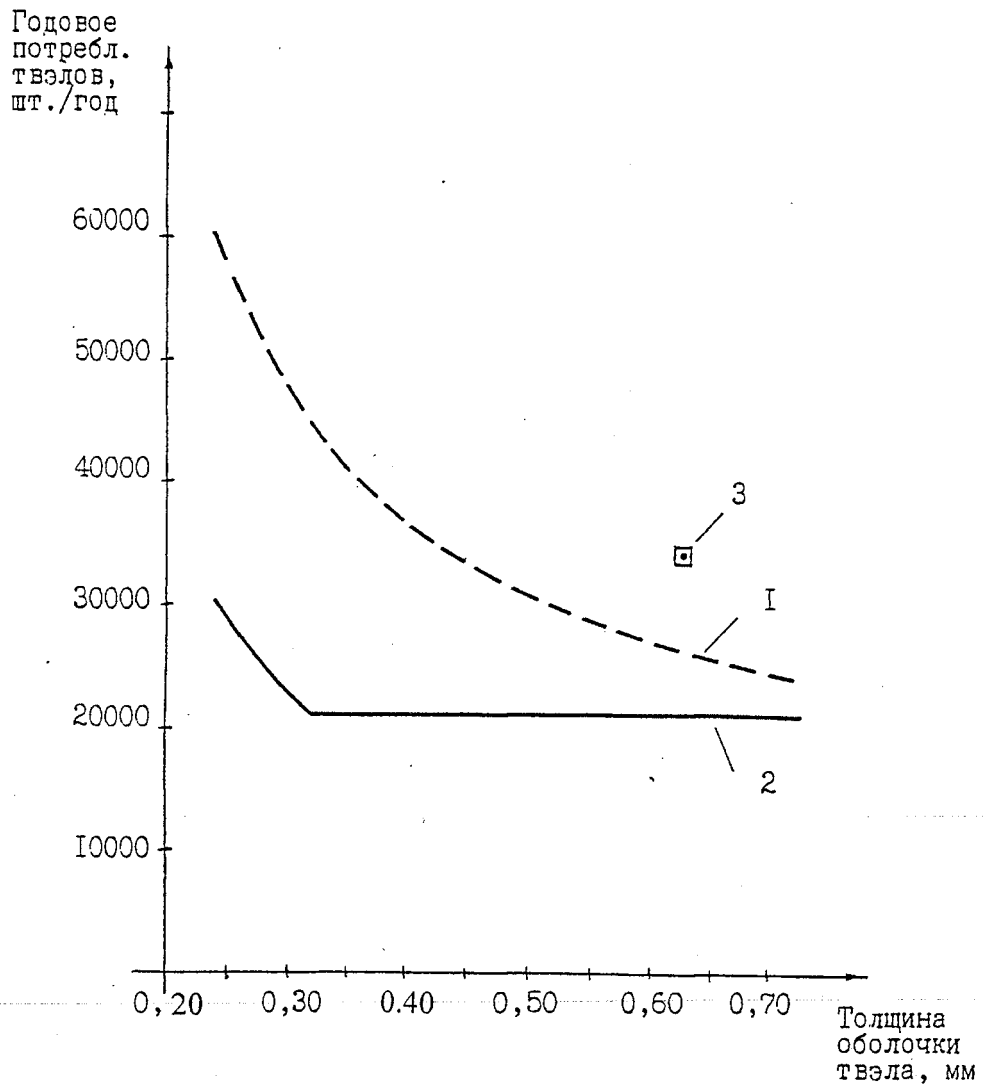


Рис.4.5. Расход ТВЭЛов гомогенной активной зоны с нитридным топливом в зависимости от размеров и материала оболочки (внутренний диаметр оболочки 7.3 мм).

- 1 - ферритно-мартенситная сталь (типа ЭП-450)
- 2 - аустенитная сталь
- 3 - активная зона высотой 800 мм, 271 ТВЭЛОМ в ТВС с оболочкой из стали ЭП-450 \varnothing 8.2 x 0.60 мм.

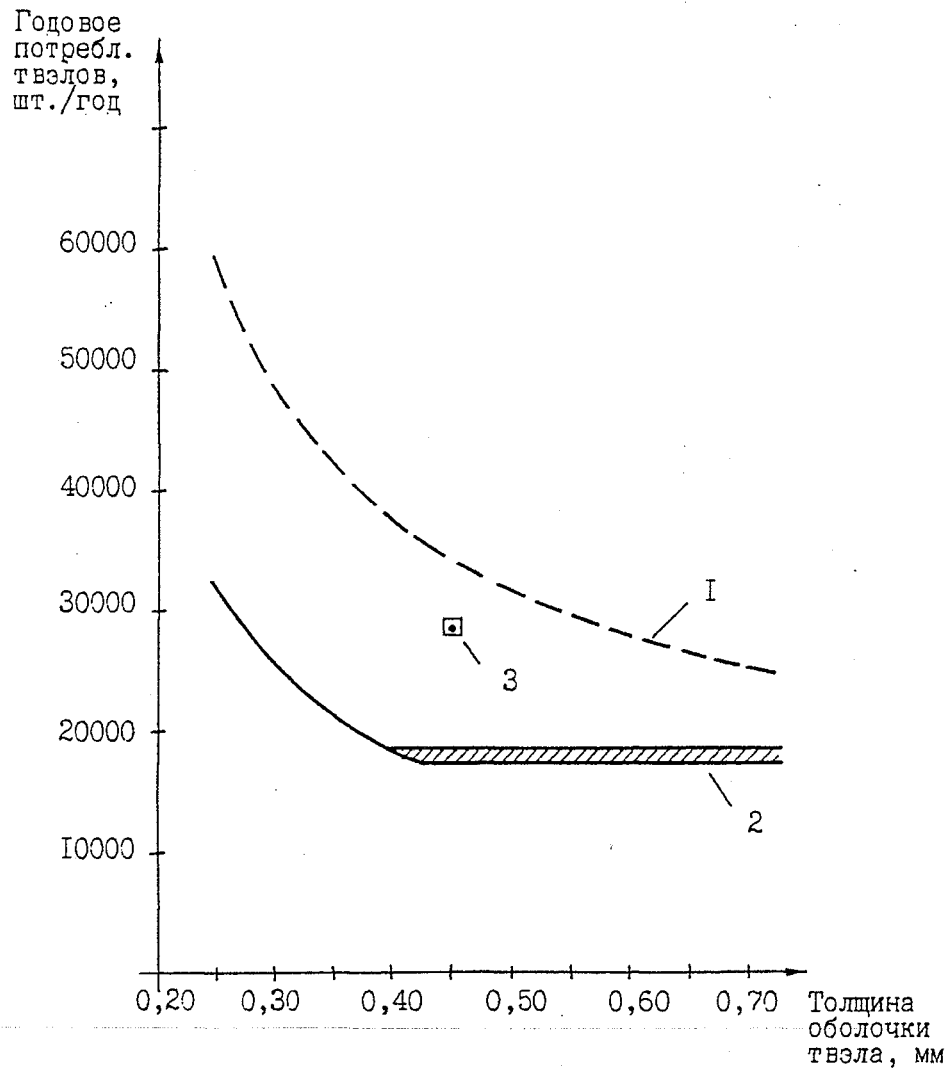


Рис.4.6. Расход ТВЭЛов гетерогенной активной зоны с нитридным топливом в зависимости от размеров и материала оболочки (внутренний диаметр оболочки 7.3 мм).

- 1 - ферритно-мартенситная сталь (типа ЭП-450)
- 2 - аустенитная сталь
- 3 - активная зона высотой 800 мм, 271 ТВЭлом в ТВС с оболочкой из аустенитной стали $\varnothing 8.2 \times 0.45$ мм.

сохранения нулевого значения $\Delta k_{\text{выгор}}$ и ростом $\text{НПЭР}_{\text{АЗ+верх}}$, позволяет снизить годовое потребление твэлов. В случае оболочек твэлов из стали ЭП-450 это снижение составит 26÷29% в зависимости от типа топлива и компоновки активной зоны (рассматриваются оболочки с одинаковыми η). В случае аустенитных оболочек годовое потребление твэлов для гетерогенных активных зон с оксидным топливом снизится в ~ 2.22 раза для оксидного топлива, а с нитридным топливом в ~ 1.65 раза.

Таким образом, снятие ограничения $\text{НПЭР}_{\text{АЗ+верх}} \leq 0$ открывает перспективы для улучшения технико-экономических показателей топливного цикла РУ типа БН-1600М.

Выводы и основные результаты главы

1. На примере энергоблока с РУ большой мощности типа БН-1600 исследована зависимость нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик активных зон с оксидным и нитридным топливом от величины относительного шага пучка твэлов. Рассмотрены активные зоны с $\text{КВА}=1.0$, т.е. с величиной $\Delta k_{\text{выгор}}$ близкой к нулю, и положительными значениями $\text{НПЭР}_{\text{АЗ+верх}}$. По результатам нейтронно-физических исследований получено, что при изменении доли топлива в диапазоне 0.393÷0.245 высота гомогенной нитридной активной зоны изменяется в диапазоне 800÷1600 мм при условии обеспечения $\text{КВА}=1.0$.
2. Рассмотрены три варианта пучков твэлов с решеточным дистанционированием и относительными шагами 1.23, 1.36 и 1.53, что обеспечивается (при неизменном диаметре твэла 7.4 мм) за счет выбора числа твэлов в ТВС 271, 217 и 169 штук. Показано, что для активной зоны РУ типа БН-1600 с увеличенным до 594 штук числом ТВС увеличение относительного шага пучка твэлов до 1.23, 1.36 и 1.53 позволяет, соответственно:
 - снизить гидравлическое сопротивление I контура до 0.195, 0.155 и 0.143 МПа (проектное значение 0.779 МПа);
 - увеличить расход естественной циркуляции до 6.7, 7.0 и 6.1% $G_{\text{ном}}$ (проектное значение $\sim 2.0 \div 2.5\%$).
 Одновременно величина $\text{НПЭР}_{\text{АЗ+верх}}$ возрастает до +0.92%, +2.19% и +4.46% $\Delta K/K$. Получено, что с точки зрения величины расхода естественной

циркуляции оптимальной является доля топлива ~ 0.32 , чему при выбранных размерах оболочки твэла соответствует относительный шаг пучка ~ 1.36 .

3. С целью улучшения теплогидравлических характеристик проанализирован ряд технических мер по упрощению конструкции напорной части тракта I контура. Показано, что исключение модульных коллекторов, исключение нижней плиты напорной камеры и создание зоны повышенного давления в нижней части корпуса, использование укороченных хвостовиков увеличенного диаметра позволяет (в зависимости от относительного шага пучка твэлов):

- снизить гидравлическое сопротивление I контура до 0.125, 0.085 и 0.072 МПа;
- увеличить расход естественной циркуляции до 10.5, 12.2 и 11.9% $G_{\text{ном}}$.

В случае организации в опорном поясе непосредственно под ПТО проходок для размещения «гидравлических диодов», байпасирующих ГЦН-I в режиме естественной циркуляции, величина расхода естественной циркуляции может быть увеличена до 12.1, 14.0 и 13.6% $G_{\text{ном}}$, соответственно.

4. Увеличение относительного шага пучка твэлов и упрощение напорной части трассы теплоносителя I контура открывает перспективы для улучшения ряда технических характеристик РУ. Показано, что в зависимости от относительного шага пучка постоянная выбега ГЦН-I может быть увеличена с 5 сек (проектное значение) до 17.5, 25.8 и 30.4 сек, соответственно. Затраты мощности на прокачку теплоносителя I контура снижаются в 6.2, 9.2 и 10.8 раза по сравнению с проектом БН-1600. В этом случае мощность одного ГЦН-I при 20% $n_{\text{ном}}$ составляет 4÷8 кВт, что позволяет применить в качестве резервного источника питания аккумуляторы.
5. На примере оксидных и нитридных активных зон РУ типа БН-1600М исследовалась зависимость натуральных показателей топливного цикла от ограничения на величину $\text{НПЭР}_{\text{А3+верх}}$. В случае нитридного топлива сравнивались варианты активных зон с нулевыми $\Delta k_{\text{выгор}}$ и отрицательными и положительными значениями $\text{НПЭР}_{\text{А3+верх}}$, отличающиеся долями топлива и высотой активной зоны: доля 0.47 при высоте 800 мм и доля 0.32 при высоте 1200 мм. В случае оксидного топлива сравнивались, с одной стороны, активные зоны с $\text{НПЭР}_{\text{А3+верх}} \leq 0$ при высоте 800 мм и долями топлива 0.40÷0.47, а с другой – активная зона с нулевым $\Delta k_{\text{выгор}}$ и положительным $\text{НПЭР}_{\text{А3+верх}}$ при высоте 1600 мм и доле топлива 0.39. Получено, что снижение доли топлива и,

соответственно, увеличение относительного шага пучка ТВЭЛОВ позволяет снизить годовое потребление ТВЭЛОВ:

- в случае оболочек из стали ЭП-450 на 26÷29% в зависимости от типа топлива и компоновки активной зоны (гомогенная, гетерогенная);
- в случае аустенитных сталей в ~2.22 раза для оксидного топлива и в ~1.65 раза для нитридного топлива.

Показано, что снятие ограничения $НПЭР_{АЗ+верх} \leq 0$ позволяет улучшить технико-экономические показатели топливного цикла активных зон с оксидным и нитридным топливом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы и выводы сводятся к следующему:

1. Сформулирована задача и разработаны математическая модель, методика, алгоритм и комплекс расчетных программ определения параметров натриевых и пароводяного контуров, к.п.д. цикла и теплогидравлических характеристик активной зоны и основного технологического оборудования энергоблока с реактором на быстрых нейтронах с учетом ограничений на рабочие характеристики и габариты оборудования при заданной тепловой или электрической мощности.

Разработаны методика, алгоритм и программа теплогидравлического расчета парогенератора с жидкометаллическим теплоносителем на закритические давления рабочего тела.

2. На примере энергоблока с реактором средней мощности типа БН-800 выполнен сравнительный анализ двух направлений улучшения технико-экономических показателей реакторной установки:

- увеличение тепловой мощности при сохранении максимальных температур оболочек твэлов из аустенитных сталей на уровне $\sim 700^{\circ}\text{C}$;
- повышение выгорания топлива за счет снижения температур оболочек до уровня $\sim 660^{\circ}\text{C}$ и применения ферритно-мартенситных сталей при сохранении проектного значения тепловой мощности 2100 МВт.

Получено, что в рамках проектных и технических решений энергоблока с реактором типа БН-800 более эффективным способом улучшения технико-экономических характеристик является увеличение тепловой мощности с 2100 до 2350 МВт и, соответственно, электрической мощности до 960 МВт(эл).

3. Выполнено сравнение технико-экономических характеристик вариантов турбоустановок и парогенераторов энергоблока с реактором большой мощности типа БН-1600М с умеренными (130 ат) и закритическими (240 ат) давлениями острого пара и схемами с паровым и натриевым промперегревом. Показано, что при фиксированной электрической мощности на клеммах генераторов 1675 МВт, уровне температур оболочек твэлов $690\div 705^{\circ}\text{C}$, заданных параметрах II контура ($345/530^{\circ}\text{C}$) и фиксированной температуре острого пара $500\div 505^{\circ}\text{C}$ переход с умеренных на закритические давления и от схемы с паровым промперегревом к натриевому приводит к увеличению суммарной

металлоемкости и стоимости турбоустановок и корпусных парогенераторов (как с прямыми, так и с витыми трубками).

С целью снижения суммарной металлоемкости основного оборудования III контура (корпусных парогенераторов, турбоустановок) для энергоблока с реактором типа БН-1600М в качестве основного рекомендован цикл на умеренные давления острого пара (130 ат) с паровым промперегревом.

4. Выполнена технико-экономическая оптимизация параметров энергоблока с реактором большой мощности типа БН-1600М исходя из требований по достижению высоких выгораний топлива и снижению металлоемкости оборудования.

Рассматривались оксидные и нитридные активные зоны (гомогенного типа и с аксиальной гетерогенностью) с оболочками твэлов из аустенитных и ферритно-мартенситных сталей, удовлетворяющие требованиям: $НПЭР_{А3+верх} \leq 0$ и доля топлива не менее 0.47.

Для схемы с паровым промперегревом и умеренным давлением острого пара определены тепловая мощность энергоблока и параметры натриевых и пароводяного контуров, при которых обеспечивается достижение высоких выгораний топлива:

- тепловая мощность блока, МВт	4060
- параметры II контура, °С	340/515
- параметры острого пара (перед турбиной)	
давление, ат	130
температура, °С	485
- температура питательной воды, °С	250
- мощность на клеммах генераторов, МВт	1667.

Получено, что для твэлов с нитридным топливом (гелиевый подслои) и оболочками из улучшенных аустенитных сталей выгорание топлива составляет 13.2÷14.6% т.а. при ресурсе 1720÷1890 эфф. суток (активная зона с аксиальной гетерогенностью). В случае оболочек из ферритно-мартенситных сталей (типа ЭП-450) выгорание нитридного топлива составляет 12.7% т.а. при ресурсе 1585 эфф. суток. Для твэлов с оксидным топливом и оболочками из аустенитных сталей выгорание топлива составит 17.1÷18.7% т.а. при ресурсе 1430÷1560 эфф. суток (активная зона с аксиальной гетерогенностью), а в случае оболочек из стали ЭП-450 выгорание составит 23% т.а. при ресурсе 1600 эфф. суток.

Показано, что дальнейшее снижение параметров II и III контуров равно как и увеличение расхода в I контуре с целью уменьшения температур оболочек и повышения ресурса твэлов нецелесообразно из-за ухудшения технико-экономических показателей энергоблока: возрастают затраты мощности на прокачку теплоносителя II контура, увеличивается металлоемкость ПГ и энергоблока в целом.

5. На примере энергоблока с РУ большой мощности типа БН-1600 исследовано влияние на теплогидравлические характеристики и натуральные показатели топливного цикла активной зоны с КВА ~ 1 ограничения на величину пустотного эффекта реактивности. Показано, что отказ от ограничения $НПЭР_{АЗ+верх} \leq 0$ позволяет помимо сокращения годового потребления твэлов (в $1.30 \div 2.2$ раза в зависимости от материала оболочки твэла, вида топлива, компоновки и состава активной зоны) существенно снизить (примерно в 10 раз) гидравлическое сопротивление и затраты мощности на прокачку теплоносителя I контура и улучшить ряд характеристик, важных для обеспечения безопасности:

- увеличить расход естественной циркуляции в I контуре с $\sim 2.5\%$ до $\sim 12 \div 14\%$;
- увеличить постоянную выбегания ГЦН-I с 5 сек до $25 \div 30$ сек.

Определены оптимальные с точки зрения расхода естественной циркуляции состав и характеристики активных зон с КВА ~ 1.0 с нитридным и оксидным топливом РУ типа БН-1600.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплекс программ для расчета основного оборудования и тепловой схемы АЭС с реактором на быстрых нейтронах: Отчет о НИР/ФЭИ, инв. 4540 дсп, Обнинск, 1985.
2. Методика и программа теплогидравлического расчета парогенераторов на закритические параметры рабочего тела и сравнительные исследования парогенераторов с различными конструктивными характеристиками и жидкометаллическими теплоносителями: Отчет о НИР/ФЭИ, инв. № 8811, Обнинск, 1994.
3. А.Ф.Лашин, Ю.В.Наумов., Л.С.Попырин. Оптимизация АЭС с быстрым натриевым реактором. Сборник "Системный подход к выбору параметров оборудования АЭС", Иркутск, СЭИ, 1982, стр.53-61.
4. Г.Б.Усынин, А.С.Карабасов, В.А.Чирков. Оптимизационные модели реакторов на быстрых нейтронах. Москва: Атомиздат, 1981.
5. Пути улучшения характеристик воспроизводства реактора БН-800: Отчет о НИР/ФЭИ, инв. № ИН-20184с, Обнинск, 1985.
6. Теплогидравлические характеристики активной зоны реактора БН-800 с различной степенью гетерогенности кольцевого типа:
Тех.справка/ФЭИ, исх. № 33-10/111 дсп от 27.09.88, Обнинск.
7. Низкотемпературный быстрый реактор с металлическим топливом для теплофикации: Отчет о НИР/ФЭИ, инв.№ Е-10333с, Обнинск, 1982.
8. Физические и теплогидравлические расчеты гетерогенных окисно-металлических активных зон кольцевого и аксиального типов: Отчет о НИР/предприятие п/я А-7755, В-2679, инв. № 2053, Горький, 1982.
9. Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования в обоснование физики активной зоны, биологической защиты и теплогидравлики реактора БН-1600: Отчет о НИР/ФЭИ, инв. № 4235 дсп, Обнинск, 1985.
10. Багдасаров Ю.Е., Камаев А.А., Ринейский А.А. и др. Пути улучшения экономических и физических показателей быстрых реакторов //PROCEEDINGS OF AN INTER. SYMPOS. "FAST BREEDER REAKTORS: EXPERIENCE AND TRENDS", Lyons, 22-26 July, 1985, Vol 1, стр. 301-315.
11. Расчетные исследования физических и термогидравлических характеристик реактора БН-1600 при использовании твэл диаметром 7.4x0.45 мм: Отчет о

- НИР/ФЭИ, инв. № 4846 дсп, Обнинск, 1986.
12. Научно-техническое руководство разработкой АЭС и реакторной установки БН-1600 на стадии технического и рабочего проектирования: Отчет о НИР/ФЭИ, инв. № 5162 дсп, Обнинск, 1987.
 13. Расчетно-экспериментальные исследования по обоснованию физики, радиационной безопасности и теплофизики проекта реактора БН-1600 с традиционной и усовершенствованной гетерогенной активными зонами: Отчет о НИР/ФЭИ, инв. № 5509 дсп, Обнинск, 1988.
 14. Технические предложения по реактору типа БН-1600 на металлическом топливе: Тех. задание/ФЭИ, НИИАР, инв. № Г-3297, Обнинск 1982 (исх. № 31-06/52 дсп от 25.05.82).
 15. Нейтронно-физические и теплогидравлические характеристики активной зоны РУ ОК-510 с увеличенным диаметром твэл и пониженным уровнем температур: Тех. справка/ФЭИ, исх. № 33-09/14 дсп от 14.03.89, Обнинск.
 16. Техническое задание на разработку активной зоны БН-1600 в традиционной компоновке при использовании твэл диаметром 7.4x0.45 мм: Тех. задание /ФЭИ, исх. № 30-05/183 дсп от 30.12.85, Обнинск.
 17. Техническое задание на разработку гетерогенных оксидно-металлических активных зон реактора БН-1600 (Два варианта: с кольцевой кассетной гетерогенностью и с внутритвэльной аксиальной гетерогенностью): Тех. задание / ФЭИ, исх. № 30-05/39 дсп от 27.03.85, Обнинск.
 18. Техническое задание на разработку гетерогенной оксидно-металлической активной зоны реактора БН-1600 с внутрикассетной гетерогенностью (ВКГ): Тех. задание/ ФЭИ, исх. № 30-05/89 дсп от 22.07.85, Обнинск.
 19. К вопросу количества турбин и некоторых схемных решений по III контуру энергоблоков БН-800: Отчет о НИР/ФЭИ, инв. № 4041 дсп, Обнинск, 1984.
 20. Обоснование тепловой схемы и основных параметров III контура АЭС с реактором БН-1600: Отчет о НИР/ФЭИ. инв.№ 4380 дсп, Обнинск, 1985.
 21. Оптимизация проекта БН-1600 с учетом экономических критериев: Отчет о НИР/ФЭИ, инв. № 5512 дсп, Обнинск, 1988.
 22. Основные теплотехнические и нейтронно-физические характеристики РУ БН модульного типа электрической мощностью 100 МВт: Отчет о НИР/ФЭИ, инв. № 5630 дсп, Обнинск, 1989.
 23. Расчетные исследования сравнительных физических характеристик модульного реактора с различными топливными композициями: Тех.

- справка/ФЭИ, инв. № Г-4608 дсп, Обнинск, 1989.
24. Модульный реактор, перевозимый железнодорожным транспортом (основные характеристики и принципиальные решения): Тех. записка / ФЭИ, инв. № Г-3273. Обнинск, 1989.
 25. Характеристики активных зон и конструктивные особенности РУ типа БН-1600 с низким гидравлическим сопротивлением I контура и увеличенным расходом естественной циркуляции: Отчет о НИР/ФЭИ, инв. № 6024 дсп, Обнинск, 1990.
 26. Камаев А.А., Ринейский А.А. Некоторые аспекты выбора параметров реактора и характеристик основного оборудования с учетом накопленного опыта создания и эксплуатации АЭС с быстрыми реакторами//Доклад на французско-советский семинар, ноябрь 1989, Франция. Доклад на семинар Япония-СССР по быстрым реакторам, февраль 1990, Япония.
 27. Камаев А.А., Ринейский А.А., Чушкин В.Н., Ошканов Н.Н., Потапов О.А. Влияние опыта эксплуатации реактора БН-600 на выбор проектных и конструкторских решений разрабатываемых быстрых реакторов// Доклад на советско-французский семинар, март 1988, Обнинск.
 28. Оценка уровня тепловой мощности модульного реактора, перевозимого железнодорожным транспортом, с учетом возможностей пассивных систем снижения мощности и расхолаживания реактора: Тех. справка/ФЭИ, исх. № 33-15/64 от 14.04.92, Обнинск.
 29. Технические требования и рекомендации к разработке технических предложений по РУ и энергоблоку с реактором на быстрых нейтронах модульного типа: Тех. задание/ФЭИ, исх. № 33-23/12 дсп от 09.03.89, Обнинск.
 30. Анализ возможности использования ТВС с чехлом и оболочками ТВЭЛ из стали ЭП-450 в реакторе БН-800: Отчет о НИР/ФЭИ, инв. № 5740 дсп, Обнинск, 1987.
 31. Вопросы разработки активной зоны реактора БН-800 с составными ТВЭлами с выгоранием свыше 15% т.а.: Отчет о НИР/ФЭИ, инв. № Е-13350с, Обнинск, 1989.
 32. Камаев А.А. и др. Возможные пути снижения температур оболочек ТВЭЛОВ реакторов БН-600 и БН-800: Доклад на секцию НТС Министерства/ФЭИ, исх. № 33-11/75 дсп от 05.05.88, Обнинск.
 33. Технические предложения по использованию составных ТВЭЛОВ в реакторе

- БН-800: Тех. предложения/ФЭИ, инв. № Е-13349с, Обнинск, 1989.
34. Техническое задание на проектно-конструкторскую работу по усовершенствованию базового варианта установки БН-800 с целью повышения ее безопасности и технико-экономических показателей: Тех. задание/ФЭИ, исх. № 33-11/65 дсп от 08.06.87, Обнинск.
 35. Сопоставление технико-экономических показателей вариантов энергоблока с РУ типа БН-800М с увеличенной электрической мощностью и высоким выгоранием топлива: Техническая справка/ФЭИ, исх. № 29-14/49 от 16.06.95, Обнинск.
 36. Усовершенствование проектов следующих энергоблоков БН-800: Техническая записка/ФЭИ, исх. № 33-19/80 дсп от 06.08.86, Обнинск.
 37. Обоснование мощности и технические требования к реактору и оборудованию усовершенствованной АЭС типа БН-800: Техническая записка/ФЭИ, исх. № 33-11/16 дсп от 15.02.88, Обнинск.
 38. Предварительная оценка технических и физических характеристик двухконтурной АЭС с РУ петлевого типа со свинцовым теплоносителем: Отчет о НИР/ФЭИ, инв. № 5978 дсп, Обнинск, 1990.
 39. СИНВАР-2 – комплекс программ нейтронно-физического расчета реакторов в двумерной геометрии: Отчет о НИР (промежуточный)/ФЭИ, инв. № 6139, Обнинск, 1979.
 40. Алексеев П.Н. и др. Комплекс программ ТВК-2D// Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика и техника ядерных реакторов. 1983. Вып. 4(33), с. 32.
 41. Зинин А.И., Колесов В.Е., Воропаев А.И. Пакет прикладных программ РБР-80// Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика и техника ядерных реакторов», 1985, вып. 5, с. 73-77.
 42. Chr. Reiche, H.U. Barz, B.Kunzmann at all. Reactor-Code-System RHEIN fur ESER Computer:/Kernforschungszentrum, ZFK-668, Karlsruhe, 1989.
 43. Серегин А.С. и др. Адаптация комплекса программ TRIGEX на ЭВМ типа ЕС: Препринт ФЭИ-1919, Обнинск. 1988.
 44. Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Ушаков П.А. и др. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках. М.: Атомиздат, 1975.
 45. Усынин Г.Б., Кусмарцев Е.В. Реакторы на быстрых нейтронах: Учебное пособие для вузов / Под редакцией Ф.М.Митенкова.- М.: Энергоатомиздат, 1985.
 46. Теплогидравлический расчет активной зоны и бокового экрана реактора БН

- (программа "ТИГР"-БН): Отчет о НИР/предприятие п/я А-7755, инв. № 628э, Горький, 1980.
47. Жуков А.В. и др. Анализ данных по межканальному обмену в ТВС с винтовым оребрением твэлов (Часть II. Периферийная зона): Препринт ФЭИ-1573. Обнинск, 1984.
 48. Жуков А.В. и др. Анализ данных по межканальному обмену в ТВС с винтовым оребрением твэлов (Часть I. Центральная зона): Препринт ФЭИ-1574. Обнинск, 1984.
 49. Методические указания и рекомендации по теплогидравлическому расчету активных зон быстрых реакторов. РТМ 1604.008-88. ФЭИ, Обнинск, 1988.
 50. Богословская Г.П., Сорокин А.П., Тихомиров Б.Б., Титов П.А., Ушаков П.А. Программа ТЕМП-М теплогидравлического расчета кассет твэлов быстрых реакторов: Препринт ФЭИ-1401, Обнинск, 1983.
 51. Методика и программа ТЕМП поканального теплогидравлического расчета ТВС быстрых реакторов типа БН-600: Отчет о НИР/предприятие п/я В-2679, инв. № 3626 дсп, Обнинск, 1983.
 52. Программа ВУМТ для трехмерного расчета нестационарных теплогидравлических процессов в сборках активной зоны быстрого реактора с натриевым охлаждением: Отчет о НИР/ФЭИ, инв. № 9346, Обнинск, 1996.
 53. РЕАКТОР С ОБОРУДОВАНИЕМ ПЕРВОГО КОНТУРА. Расчет тепловой и гидравлический активной зоны, зоны воспроизводства и отражателя. ОК-510, 100 РР 14: Отчет о НИР/предприятие п/я А-7755. инв. № 1934 дсп, Горький, 1981.
 54. РЕАКТОР. Расчеты физические, тепловые и гидравлические активной зоны и зоны воспроизводства. УН-4, ООРР6: Отчет о НИР/ предприятие п/я А-7755, инв. № 2262 дсп, Горький, 1984.
 55. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975.
 56. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) . М.: Энергоатомиздат, 1984.
 57. ТЕПЛООБМЕННИК. Тепловой и гидравлический расчет. ОК-510: Отчет о НИР/предприятие п/я А-7755, инв. № 540120, Горький, 1981.
 58. ТЕПЛООБМЕННИК. Тепловой и гидравлический расчет. УН-4, ПРР1: Отчет о НИР/предприятие п/я А-7755, инв. № 560945, Горький, 1982.

59. Программа для ЭВМ БЭСМ-6. Тепловой расчет стационарного режима крупномодульного секционного парогенератора с жидкометаллическим теплоносителем ТРП-5: Отчет о НИР/ ГКАЭ ОКБ "Гидропресс", Б-174, Подольск, 1981.
60. ПАРОГЕНЕРАТОР Н-317. Расчет теплогидравлический. Парогенератор с укрупненными секциями. 317.00.00.00.000 РР02.1: Отчет о НИР/ ГКАЭ ОКБ "Гидропресс", инв. № 152956, Подольск, 1982.
61. Кокорев Б.В., Фарафонов В.А. Парогенераторы ядерных энергетических установок с жидкометаллическим охлаждением / Под общей редакцией П.Л. Кириллова. - М.: Энергоатомиздат, 1990.
62. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров): Издание четвертое. М.: Наука, 1978.
63. РУКОВОДЯЩИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ. Методика и зависимости для теоретического расчета теплообмена и гидравлического сопротивления теплообменного оборудования АЭС. РТМ 24.031.05-72. Москва, 1972.
64. Исаченко В. П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. -М.: Энергия, 1965.
65. Полетавкин П.Г., Шапкин Н.А. Исследование теплоотдачи при поверхностном кипении// Теплоэнергетика, 1969, № 12.
66. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. М.: Госэнергоиздат, 1957.
67. Миропольский З.Л. Теплоотдача при пленочном кипении пароводяной смеси в парогенерирующих трубах// Теплоэнергетика. 1963, № 5, с. 49.
68. Groenvald D.C. Post dry-out heat transfer physical mechanism and a survey of prediction methods // Nuclear Eng. Design. 1975, Vol. 32, № 3.
69. Дорошук В.Е. Рекомендации по расчету кризиса теплоотдачи в трубах// Теплофизика высоких температур. 1966, Том 4, № 4.
70. Коньков А.С. Экспериментальное исследование условий ухудшения теплоотдачи при течении пароводяной смеси в обогреваемых трубах // Труды ЦКТИ, 1965, № 58.
71. Красноухов Ю.В. Исследование теплогидравлических характеристик и разработка рекомендаций для проектирования змеевиковых поверхностей нагрева прямоточных парогенераторов АЭС: Дисс. канд. техн. наук, Ленинград, ЦКТИ, 1980.
72. Экспериментальное исследование теплоотдачи к воде сверхкритического

давления при турбулентном течении: Отчет о НИР (промежуточный)/ФЭИ, инв. № 6677, Обнинск, 1982.

73. Протопопов В.С. Обобщающие зависимости для местных коэффициентов теплоотдачи при турбулентном течении воды и двуокиси углерода сверхкритического давления в равномерно обогреваемых круглых трубах // Теплофизика высоких температур, 1977, т.15, № 4, с. 815-821.
74. Петухов Б.С. и др. Новый подход к расчету теплообмена при сверхкритических давлениях теплоносителя // Теплофизика высоких температур, 1976, т.14, № 6, с. 1326-1329.
75. Swenson H.S., Carver J.R., Kakarala C.R. Heat transfer to supercritical water in smoothbore tubes // Trans. ASME, ser. C, 1965, v. 87, No 4, pp. 477-484.
76. Bishop A.A., Sandberg R.O., Tong L.S. Forced convection heat transfer to water at near critical temperatures and supercritical pressures // WCAP - 2056 -P, Part III-V, Feb. 1964.
77. Шлыков Ю.П. и др. Турбулентный теплообмен в сверхкритической области параметров состояния (теоретический анализ и обобщение опытных данных) // В кн.: Тепло- и массоперенос при фазовых превращениях. Часть II. Минск, 1974, с. 3-20.
78. Миропольский З.Л., Шицман М.Е. Теплоотдача к воде и пару при переменной теплоемкости (в околокритической области) // Журнал технической физики, 1957, т.27, № 10, с. 2359-2372.
79. Yamagata K. et al. Forced convective heat transfer to supercritical water in tubes // Intern. Sym. Heat and Mass Transfer, 1972, v. 15, N 12. pp. 2575-2594.
80. Апатовский Л.Е. и др. Разработка алгоритма и программы расчета паротурбинной установки с секционированием конденсационного устройства: Отчет о НИР/ЦКТИ, ЛМЗ, инв. № 023819/о-9745, план-заказ 03.13.1413.00.40, Ленинград, 1978.
81. Петухов Б.С., Попов В.Н. Теоретический расчет теплообмена и сопротивления трения при турбулентном течении в трубах несжимаемой жидкости с переменными физическими свойствами. Теплофизика высоких температур, 1963, т.1, № 1, с. 85-101.
82. Теплогидравлические характеристики активной зоны реактора БН-800 с модифицированным невоспроизводящим боковым экраном и оболочками ТВЭЛов из ферритно-мартенситных сталей: Отчет о НИР/ФЭИ, инв. № 9680, Обнинск, 1997.

83. Высокобезопасный энергоблок с реактором БН средней мощности (500-600 МВт(э)): Отчет о НИР/ФЭИ, инв. № 6109 дсп, Обнинск, 1991.
84. Сопоставление технико-экономических показателей вариантов энергоблока с РУ типа БН-800 с увеличенной электрической мощностью и высоким выгоранием топлива: Отчет о НИР/ФЭИ, инв. № 9363, Обнинск, 1996.
85. Камаев А.А., Забудько Л.М., Попов Э.П., Мартьянова Н.Г. Пути улучшения технико-экономических показателей энергоблока с реактором на быстрых нейтронах средней мощности. Доклад на российско-японский семинар, 7-10 октября, 1996, Обнинск, Россия.
86. Установка реакторная БН-600М. Пояснительная записка. РНАТ.501.111.010 ПЗ: Отчет/ОКБМ, инв. № 779729, Н. Новгород, 1992.
87. Зона активная. Расчет физический. РНАТ.501.341.002 РР: Отчет/ОКБМ, ФЭИ, инв. № 762014, Н. Новгород, 1991.
88. Реактор с оборудованием I контура. Расчет гидравлический основной и вспомогательной трасс. УН-4 00РР8: Отчет/ОКБМ, инв. № 587236, Горький, 1983.
89. Зона активная. Расчет теплогидравлический. РНАТ.501.341.002 РР1: Отчет/ОКБМ, инв. № 762015, Н. Новгород, 1991.
90. Парогенератор Н-272. Пояснительная записка. 272.00.00.000.01ПЗ: Отчет/п/я Г-4285, инв. № 1938 дсп (инв. № 61645), Подольск, 1976.
91. Fast Reactor database. IAEA-TECDOC-866, Vienna, Feb, 1996.
92. Матвеев В.И., Черный В.А., Камаев А.А., Стогов В.Ю. Исследование возможности создания в реакторе БН-600 активной зоны с нулевым НПЭР при полной загрузке смешанным уран-плутониевым топливом:// 5-ая научно-техническая конференция, посвященная 30-летию ввода в эксплуатацию Белоярской АЭС, Заречный, 1995.
93. По вопросу турбин блоков БН-800 с увеличенной тепловой и электрической мощностью:/Письмо ПОТ "ЛМЗ", исх. № 510-35-97 от 20.01.88 (Вх. № 576 от 26.01.88, ФЭИ), Ленинград.
94. Расчетное обоснование геометрии ТВС активной зоны реактора БН-1600М: Техническая справка / ФЭИ, исх. № 33-09/157 от 25.08.92, Обнинск.
95. Статистическая обработка результатов формоизменений чехлов ТВС из стали ЭП-450 активной зоны БН-600 1М и оболочек твэлов из стали ЭП-172 х.д.: Отчет / ФЭИ, ВНИИИНМ, БАЭС, инв. № 6243 дсп, Обнинск, 1991.
96. Исследование радиационной ползучести и распухания оболочечных и

- чехловых сталей в обоснование работоспособности твэлов и ТВС реактора ОК-510 по критерию предельного формоизменения: Отчет / ФЭИ, ВНИИИНМ, инв. № 5800 дсп, Обнинск, 1989.
97. Оценка топливной составляющей БН-800 при повышении выгорания МОХ топлива до 12% и при отказе от бокового экрана: Техническая справка / ФЭИ, инв. № 22-05/10 дсп от 25.06.97, Обнинск.
 98. Сукнев К.Л. и др. Сравнение технико-экономических характеристик АЭС с быстрыми и тепловыми реакторами для условий площадки Белоярской АЭС. Доклад на российско-французский семинар, ноябрь 1998, Россия.
 99. Технические аспекты создания реактора-хранилища плутония (типа FNPSR) на базе российских РБН: Отчет о НИР/ФЭИ, инв. № 9177, 1996, Обнинск.
 100. Камаев А.А., Попова Н.Г. Concept of fast neutron plutonium storage reactor. Technical and physical problems:// Inter. Con. Of the Physics of Reactor PHYSOR 96, September 1-20, 1996, vol.2, p. D31-D40, Mito, Japan.
 101. Исследование влияния реактора-хранилища на темпы утилизации оружейного плутония и параметры топливного цикла: Отчет о НИР/ФЭИ, инв. № 9681, 1997, Обнинск.
 102. Камаев А.А. Technological aspects of FNPSR development on the basis of Russian LMFR's.//Доклад на франко-российский семинар, Кадараш, 19-24 июня, 1995.
 103. Каграманян В.С., Камаев А.А. и др. Concept of fast neutron plutonium storage reactor. Technical and physical problems. //Доклад на российско-французский семинар, Обнинск, 1-5 июля, 1996.
 104. Поплавский В.М., Борисов В.В., Камаев А.А. и др. Энергетический комплекс безотходной переработки металлосодержащих отходов: // «Цветная металлургия», 1995, № 1-2 (январь-февраль), стр. 27-30.
 105. Поплавский В.М., Борисов В.В., Камаев А.А. и др. Устройство охлаждения и утилизации тепла отходящих из печи газов: // Заявка на изобретение № 94039494/02 (040037) от 03.11.94 (положительное решение).
 106. Поплавский В.М., Борисов В.В., Камаев А.А. и др. Энергометаллургическая установка КЭМ-75 для завода по переработке промышленных отходов в г. Карабаше: // Международная конференция по черной металлургии будущего, 12-15 сентября 1994, г. Санкт-Петербург, Россия.
 107. Борисов В.В., Кравченко И.Н., Камаев А.А. и др. Высокотемпературная переработка отходов с эффективной системой утилизации тепла: // Наука производству (индекс 11394), 1999, № 1, издан. г. Москва.

108. Улучшение технических показателей процесса переработки твердых промышленных и бытовых отходов в шлаковом расплаве при замене водяной системы охлаждения на натриевую: Отчет о НИР / ФЭИ, инв. № 9678, 1997, Обнинск.
109. Расчетные исследования в обоснование применимости жидкометаллического теплоносителя для утилизации тепла высокотемпературного процесса переработки твердых бытовых и промышленных отходов в шлаковом расплаве: Отчет о НИР / ФЭИ, инв. № 9910, 1998, Обнинск.
110. Ринейский А.А., Камаев А.А., Яровицин В.В. О методах сопоставления вариантов АЭС с различными параметрами паросилового цикла: / Препринт ФЭИ - 1117, 1980, Обнинск.
111. Ринейский А.А., Камаев А.А., Щербаков С.И. Особенности теплогидравлики активной зоны быстрого реактора с неочехлованными сборками: // труды конференции «Теплофизика-88», 1988, Обнинск.
112. Сопоставление физико-технических характеристик гетерогенной (модульной) и гомогенной активных зон реактора большой мощности: Отчет о НИР / ФЭИ, инв. № 6191 дсп, 1991, Обнинск.
113. Физические и теплогидравлические расчеты варианта активной зоны с нулевым или отрицательным НПЭР и минимальным запасом реактивности на выгорание топлива: Отчет о НИР / ФЭИ, инв. № 7954, 1991, Обнинск.
114. Конструктивные особенности и рабочие параметры активной зоны РУ типа БН-1600 М с высоким и сверхвысоким выгоранием топлива: Отчет и НИР / ФЭИ, инв. № 8226, 1992, Обнинск.
115. Ринейский А.А., Щербаков С.И., Камаев А.А. Теплогидравлическая концепция активной зоны с низким содержанием конструкционных материалов и оптимальной гидродинамикой // Доклад на советско-японский семинар «Улучшение показателей топливного цикла реакторов на быстрых нейтронах», сентябрь 1990, Обнинск.
116. Забудько Л.М., Камаев А.А. Обоснование характеристик ТВС реактора типа БН-1600М с тонкостенными и перфорированными чехлами с учетом вопросов прочности и требований к составу активной зоны: // Доклад на японско-российский семинар «Физические, технологические и конструкторские проблемы достижения сверхвысоких выгораний в активных зонах БН с различными видами топлива», декабрь 1993, Япония.
117. Забудько Л.М., Камаев А.А. Design features and operational parameters of FBR

core with high burnup and improved Safety Characteristics (oxide, nitride fuels): // Доклад на японско-российский семинар «Физические, технологические и конструкторские проблемы достижения сверхвысоких выгораний в активных зонах БН с различными видами топлива», декабрь 1993, Япония.

118. О возможности создания парогенераторов установок БН на сверхкритические давления. 317.ЭКО.301.226: Техническая справка/ОКБ «Гидропресс», исх. № 11-4/5867 от 29.09.89, г. Подольск.
119. ПАРОГЕНЕРАТОР Н-415. Пояснительная записка 415 ПЗ/ОКБ «Гидропресс», 1991, г. Подольск.
120. ПАРОГЕНЕРАТОР Н-415. Расчет теплогидравлический 415 РР02/ОКБ «Гидропресс», инв. № 333801, 1991, г. Подольск.
121. ПАРОГЕНЕРАТОР Н-415. Расчет прочности. 415 РР06/ОКБ «Гидропресс», инв. № 333883, 1991, г. Подольск.
122. A. Brachet, M. Doneddu, V. Feburie, J.L. Quinet. Possible trends of steam cycles, design and economic characteristics of the steam generators of future fast breeder reactors. Topical Meeting on «LMFBR STEAM GENERATORS», GENOA-ITALY, 30/11-2/12 1981.
123. Топливные затраты на 1 кВт/час электроэнергии быстрых реакторов и других энергоисточников: Отчет о НИР/ФЭИ, инв. № 17845 с, 1980, Обнинск.
124. Системная оценка различных вариантов БН-ов для начального этапа строительства (высоко- и низконапряженный, гетерогенный): Отчет о НИР/ФЭИ, инв. № 3031 дсп, 1981, Обнинск.
125. Троянов М.Ф., Ринейский А.А., Каграманян В.С., Камаев А.А. Экономия затрат на топливо на начальном этапе ввода быстрых реакторов:// Атомная энергия, 1983, т. 55, вып. 2, стр. 77-80.
126. Троянов М.Ф., Ринейский А.А., Камаев А.А. Возможные пути достижения предельных характеристик безопасности реакторов БН:// Атомная энергия, 1989, том 66, вып. 4, стр. 235-238.
127. Камаев А.А., Ринейский А.А. A New Safety Approach in the Design of LMFBR's://Inter. Topical Meeting on Safety of Next Generation Power Reactors, May 1-5, 1988, Seattle, Washington, p. 732-741.
128. Багдасаров Ю.Е., Ринейский А.А., Камаев А.А. и др. Возможные пути достижения предельных характеристик быстрого реактора с натриевым теплоносителем: //Доклад-рекомендации Министерству, инв. № Г-4306, 1988, Обнинск.

129. Майоров Л.В. Программный комплекс ММКФК для расчета реакторов методом Монте-Карло, разработанный А.Д. Франк-Каменецким // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика и техника ядерных реакторов», 1981, вып. 8(21), с.7.
130. Система константного обеспечения АРАМАКО-80: Отчет о НИР (промежуточный)/ФЭИ, инв. № 6358, Обнинск, 1980.
131. Система константного обеспечения АРАМАКО-СІ: Отчет о НИР (промежуточный)/ФЭИ, инв. № 7012, Обнинск, 1984.
132. Атомная паропроизводящая установка. Пояснительная записка. ОК-510.ООПЗ:/ОКБМ, инв.№ 1927 дсп, Н. Новгород, 1981.
133. Баранов О.В. Комплекс программ PRECON. Описание применения. Руководство программиста. Препринт ФЭИ-1847, Обнинск, 1987.

**КОНСТРУКЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ НАТРИЙ-ВОДА
НА ЗАКРИТИЧЕСКИЕ И УМЕРЕННЫЕ ДАВЛЕНИЯ ПАРА
ДЛЯ ЭНЕРГОБЛОКА С РУ ТИПА БН-1600М**

В приложении представлены результаты исследований по определению характеристик ПГ на закритические и умеренные параметры рабочего тела.

Для каждой ступени параметров рассмотрены варианты турбоустановок и парогенераторов с паровым и натриевым промперегревом пара. Основные характеристики вариантов приведены в таблице 3.8. При выборе тепловой мощности энергоблока исходили из условия, что электрическая мощность на клеммах генераторов составляет 1675 МВт (эл), а параметры теплоносителя II контура: 345/530 °С. Для всех вариантов принималось, что в состав РУ входит 6 ПГ, каждый из которых состоит из одного или нескольких модулей.

При выборе конструкции модулей испарителя-перегревателя (ИП) и промпароперегревателя (ППП) исходили из следующих предположений.

а). Схема движения теплоносителя и рабочего тела - противоток (теплоноситель в межтрубном пространстве движется сверху вниз, а рабочее тело снизу вверх в теплообменных трубках).

б). Рассматриваются варианты парогенераторов, состоящих из нескольких вертикальных модулей. По теплоносителю все модули ИП и ППП включены параллельно.

в). Рассмотрены два варианта трубного пучка модуля ИП парогенератора на СКД - прямотрубный и витой (по типу парогенератора SPh-I). При выборе длины теплообменной трубки (как прямотрубного пучка, так и витого) исходили из того, что габариты корпуса ИП не должны превышать по высоте 38 м. В его верхней части организована газовая полость для компенсации расширений теплоносителя II контура. При указанных габаритах длина теплообменных трубок прямотрубного пучка не должна превышать 31÷32 м, а длина витой теплообменной трубки не должна превышать 140÷150 м.

г). Длина теплообменных трубок модуля ППП (рассмотрен вариант прямотрубного пучка) не должна превышать 20 м, что позволяет выполнить его в корпусе с габаритами не более 27 м (т.е. меньше длины пучка модуля ИП).

д). Для уменьшения потерь в к.п.д. цикла потери давления рабочего тела на промперегреве не должны превышать 4 ат. В этом случае гидравлическое сопротивление теплообменных труб модулей ППП должно быть ограничено величиной 2 ат.

В таблице П 1.1 дано описание конструкции и рабочих параметров модулей ИП парогенератора на закритические параметры пара. Конструкция модулей ИП для схем с паровым и натриевым промперегревом фактически одинакова - отличия заключаются только в длине теплообменных труб, металлоемкости и рабочих параметрах. В качестве материала теплообменных трубок, согласно рекомендациям /118, 119, 120 /, выбрана высоконикелевая аустенитная сталь марки 03X21H32M3B (ЧС-33). При выборе материала и размеров пароводяных камер, корпуса и других конструктивных элементов руководствовались материалами технического предложения парогенератора установки БН-1600М: ПАРОГЕНЕРАТОР Н-415 /121/. В случае прямотрубного пучка в целях снижения диаметра корпуса, уменьшения толщины трубных досок и размеров пароводяных камер испаритель-перегреватель выполнен в двух корпусах. Конструкция одного модуля ИП приведена на рисунке П 1.1. Применены сферические пароводяные камеры наружным диаметром и толщиной 1597x149 мм. При этом максимальная толщина линзовой трубной доски равна 350 мм. В случае витого трубного пучка ИП выполнен в одном корпусе, конструкция и характеристики которого приведены на рисунке П 1.2 и в таблице П 1.1. Применены цилиндрические пароводяные камеры размером: $\varnothing 650 \times 85$ мм, толщина трубной доски 130 мм.

Конструкция и характеристики модуля ППП для схем с натриевым промперегревом (как для закритических, так и умеренных параметров) приведены на рисунке П 1.3 и в таблице П 1.2 (вариант А для парогенератора на умеренные параметры; вариант В для парогенератора на СКД).

В таблице П 1.3 дано описание конструкции и рабочих параметров модулей ИП парогенератора на умеренные параметры пара. ИП выполнен в одном корпусе, конструкция которого подобна варианту корпуса ИП парогенератора на СКД (см. рисунок П 1.1). Рассмотрен вариант ИП с прямотрубным пучком. Для умеренных давлений пара в качестве материала теплообменных трубок предполагается использовать перспективную хромистую сталь 05X12H2M3B. При определении размеров и толщин стенок корпуса и пароводяных камер модуля ИП на умеренные параметры за основу взяты методика и результаты прочностных расчетов парогенератора на СКД /121/.

Конструкция и рабочие параметры модуля испарителя-перегревателя (ИП)
на закритические параметры рабочего тела

Характеристика	1	2	3	4
Тип промперегрева пара	паровой		натриевый	
Количество модулей ИП на ПГ, шт.	2	1	2	1
Тип трубного пучка	прямо- трубный	витой	прямо- трубный	витой
Размеры теплообменной трубки, мм	16 x 2.0	28 x 3.5	16 x 2.0	28 x 3.5
Количество теплообменных трубок в модуле, шт.	1597	340	1597	340
Омывание трубки теплоносителем	продоль- ное	попереч- ное	продоль- ное	попереч- ное
Тип решетки теплообменных труб в поперечном сечении пучка	треуг.	квадрат	треуг.	квадрат
Шаг размещения трубок в пучке, мм	25	43.6	25	43.6
Относительный шаг пучка	1.563	1.557	1.563	1.557
Развернутая длина теплообменной трубки, м	27.30	146.6	23.90	117.7
Наружный диаметр вытеснителя, мм	-	800	-	800
Поверхность теплообмена модуля (приведенная к наружному диаметру), м ²	2191.5	4384.5	1918.5	3520.2
Расход теплоносителя, кг/сек	1403.6	2807.3	1077.3	2154.6
Расход рабочего тела, кг/сек	171.3	342.6	131.5	262.9
Массовая скорость воды, кг/м ² сек	948.3	2908.9	727.7	2232.6
Масса трубного пучка, тонн	32.78	107.32	29.01	86.41
Масса незаполненного модуля, тонн	91.71	201.22	85.54	167.65
Материал теплообменных трубок	03X21H32M3B			
Тепловая мощность модуля, МВт (т)	330	660	253.3	506.6
Максимальный тепловой поток, Вт/м ² (приведен к наружному диаметру),	226000	239800	194500	228100
Гидравлические потери на длине теплообменных трубок (со стороны воды), 10 ⁵ Па	0.9827	21.55	0.5233	10.43
Наружный диаметр и толщина корпуса, мм	1141x18	2390x36	1141x18	2390x36
Количество пароводяных камер на модуль ИП, шт.	2	6	2	6
Тип пароводяной камеры	сферич.	цилиндр.	сферич.	цилиндр.
Диаметр и толщина камеры, мм	1597x149	650x85	1597x149	650x85

Модуль испарителя-перегревателя ПГ на СКД

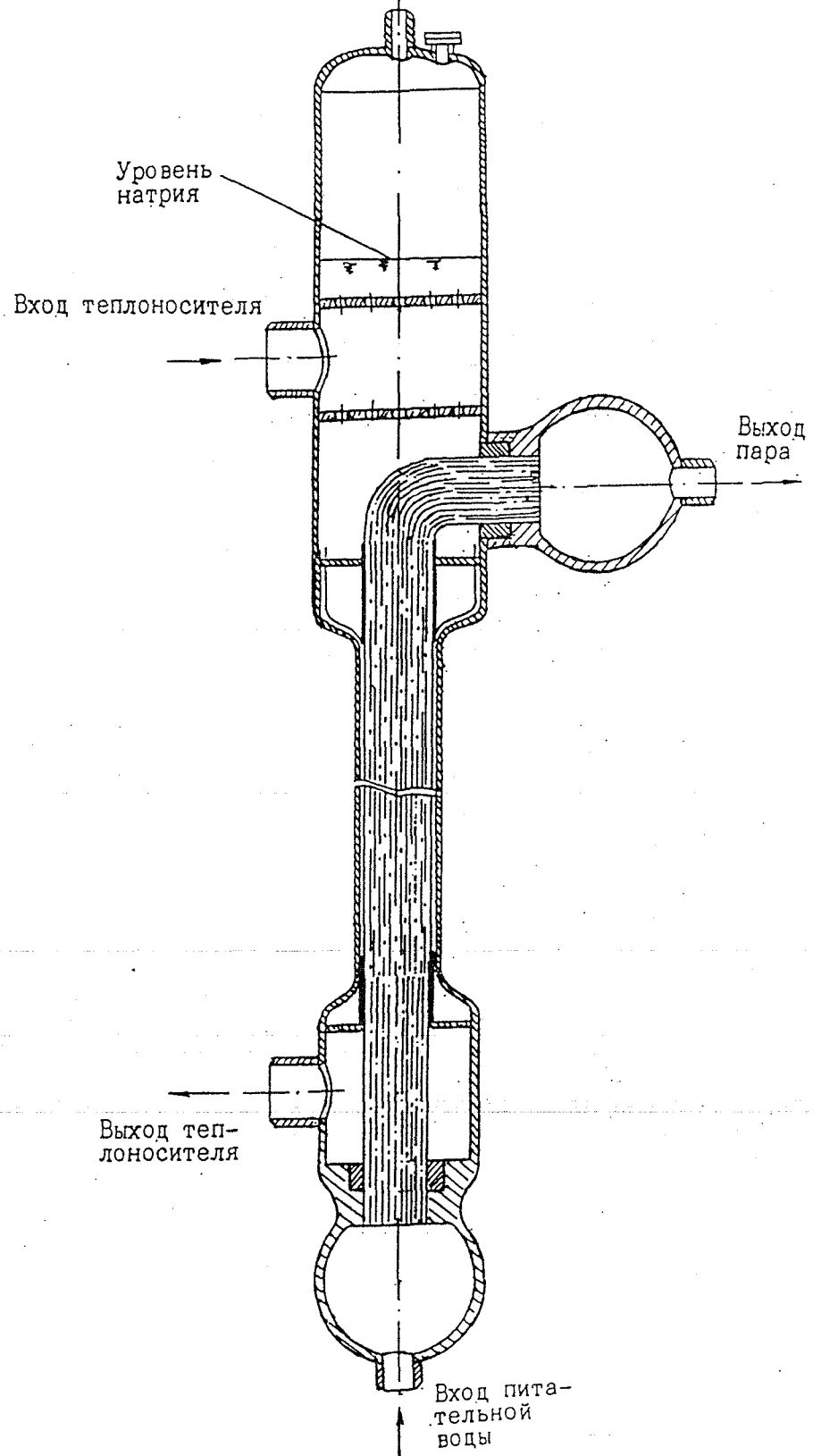


Рис. П.1.1.

ПГ на СКД с витыми трубками

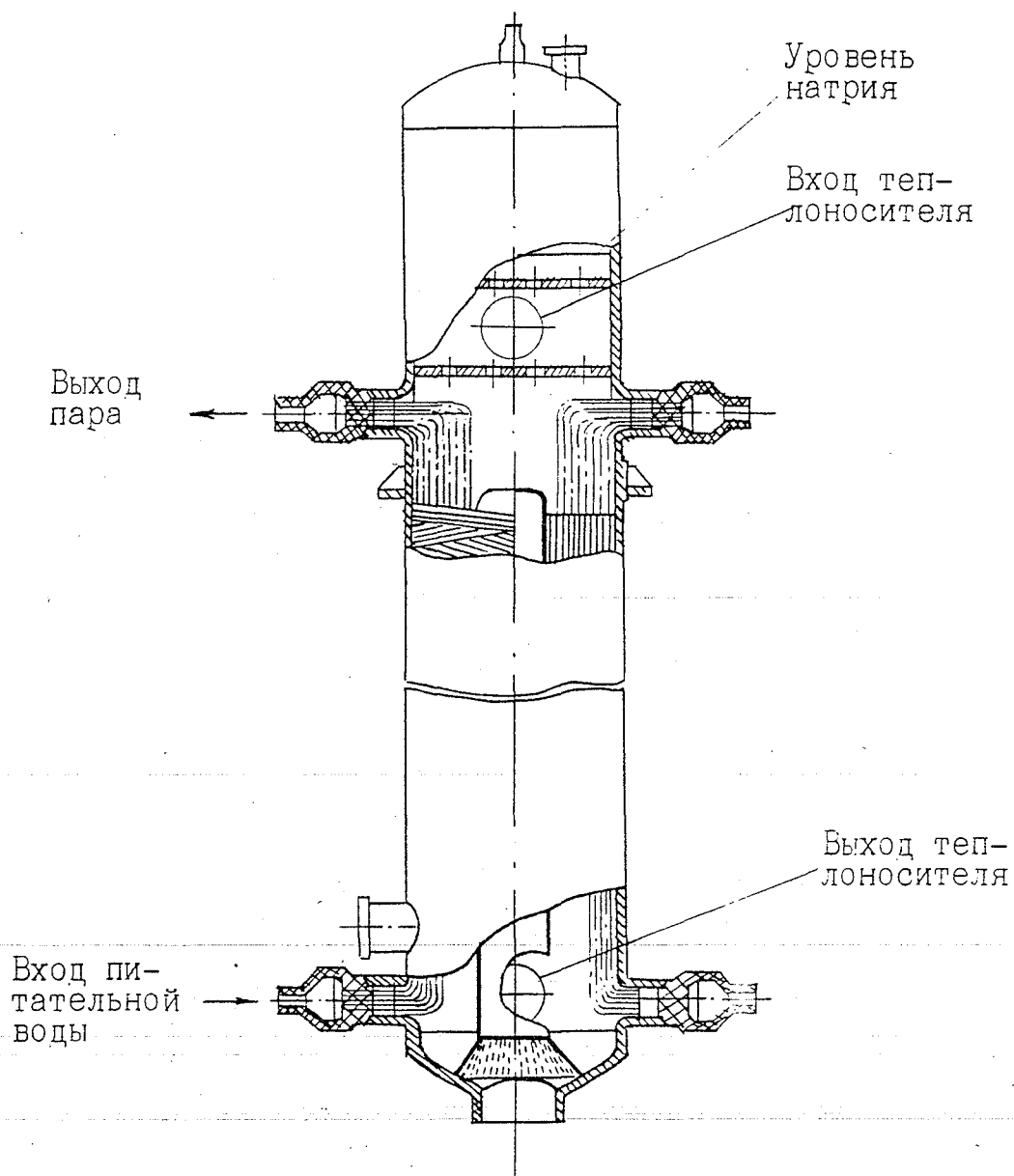


Рис. П.1.2.

Промпароперегреватель

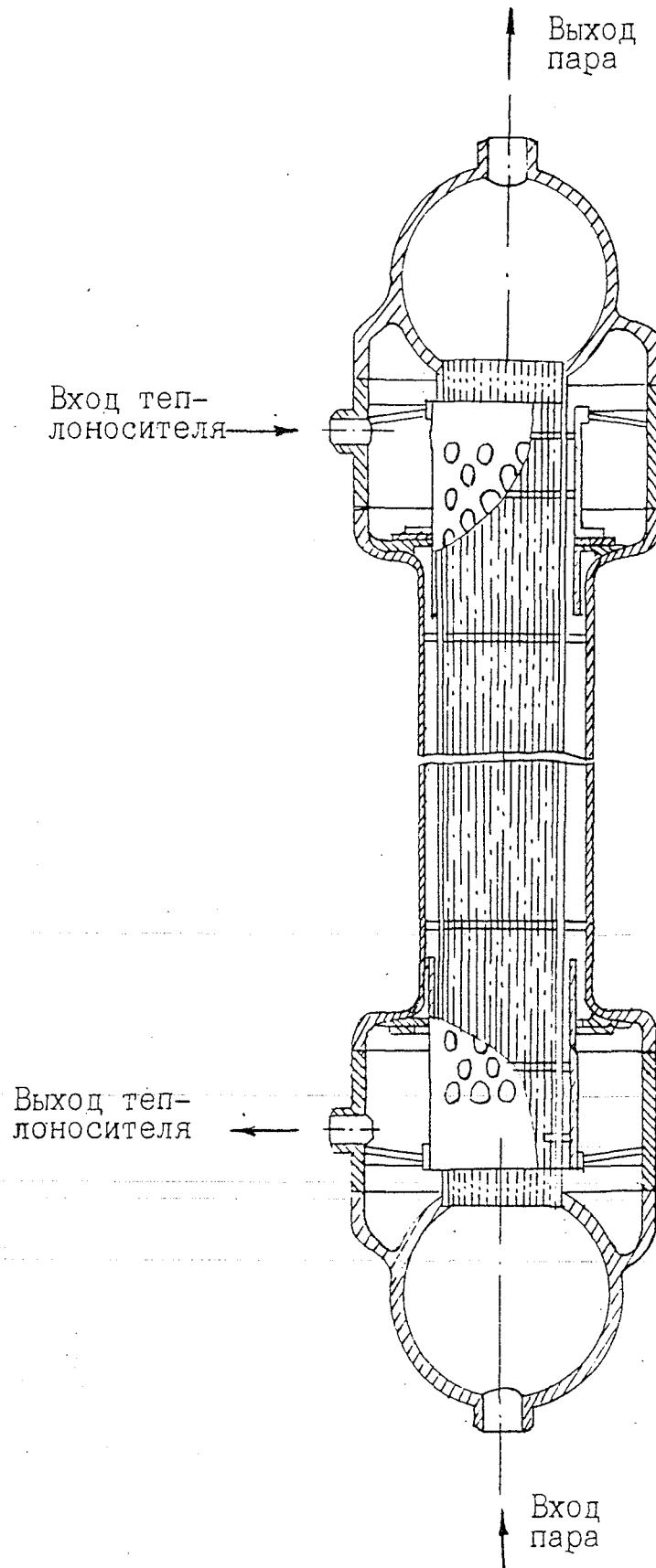


Рис. П.1.3.

Конструкция и рабочие параметры модуля промпароперегревателя (ППП)
для различных вариантов парогенератора

Характеристика \ Вариант	А	В
Параметры рабочего тела	умеренные	закритические
Количество модулей ППП на ПГ, шт.	1	1
Тип трубного пучка	прямотрубный	прямотрубный
Размеры теплообменной трубки, мм	25 x 2.5	25 x 2.5
Количество теплообменных трубок в модуле, шт.	1639	1639
Омывание пучка теплоносителем	продольное	продольное
Тип решетки теплообменных трубок в поперечном сечении пучка	треугольная	треугольная
Шаг размещения трубок в пучке, мм	34.8	34.8
Относительный шаг пучка	1.392	1.392
Длина теплообменной трубки, м	19.16	18.94
Поверхность теплообмена модуля (приведенная к наружному диаметру), м ²	2466.4	2438.1
Расход теплоносителя, кг/сек	441.1	574.7
Расход рабочего тела, кг/сек	212.8	216.4
Массовая скорость воды, кг/м ² сек	413.4	420.3
Масса трубного пучка, тонн	45.10	44.89
Масса незаполненного модуля, тонн	80.23	82.59
Материал теплообменных трубок	05X12H2M-ВИ	09X18H9
Тепловая мощность модуля, МВт (т)	103.9	135.1
Максимальный тепловой поток, (приведенный к наружной поверхности), Вт/м ²	58080	104800
Гидравлические потери на длине теплообменных трубок (со стороны воды), 10 ⁵ Па	1.84	1.15
Наружный диаметр и толщина корпуса, мм	1597 x 25	1597 x 25
Количество сферических пароводяных камер на модуль ППП, шт.	2	2
Диаметр и толщина камеры, мм	2062 x 40	2084 x 51

Таблица П 1.3

Конструкция и рабочие параметры модуля испарителя-перегревателя (ИП)
на умеренные параметры пара

Характеристика	Вариант	5	6
Тип промперегрева пара		паровой	натриевый
Количество модулей ИП на ПГ, шт.		1	1
Тип трубного пучка		прямотрубный	прямотрубный
Размеры теплообменной трубки, мм		16 x 2.5	16 x 2.5
Количество теплообменных трубок в модуле, шт.		1639	1639
Омывание пучка теплоносителем		продольное	продольное
Тип решетки теплообменных трубок в поперечном сечении пучка		треугольная	треугольная
Шаг размещения трубок в пучке, мм		34.8	34.8
Относительный шаг пучка		2.175	2.175
Развернутая длина теплообменной трубки, м		31.02	27.79
Поверхность теплообмена модуля (приведенная к наружному диаметру), м ²		2555.6	2289.5
Расход теплоносителя, кг/сек		2873.3	2368.4
Расход рабочего тела, кг/сек		302.4	249.3
Массовая скорость воды, кг/м ² сек		1941.3	1600.4
Масса трубного пучка, тонн		46.02	41.58
Масса незаполненного модуля, тонн		159.20	150.60
Граничное паросодержание		0.239	0.263
Материал теплообменных трубок		05X12H2M-ВИ	05X12H2M-ВИ
Тепловая мощность модуля, МВт (т)		676.7	557.8
Максимальный тепловой поток (приведенный к наружной поверхности), Вт/м ²		469600	426250
Гидравлические потери на длине теплообменных трубок (со стороны воды), 10 ⁵ Па		14.91	9.16
Наружный диаметр и толщина корпуса, мм		1577 x 25	1577 x 25
Количество сферических пароводяных камер на модуль ИП, шт.		2	2
Диаметр и толщина камеры, мм		2071 x 131	2071 x 131

В результате выбраны следующие размеры сферических пароводяных камер: $\varnothing 2071 \times 131$ мм, а максимальная толщина линзовых трубных досок 308 мм.

В таблице П 1.4 дано описание конструкции вариантов парогенератора на закритические и умеренные параметры рабочего тела для различных схем промперегрева.

Таблица П 1.4

Описание конструкции различных вариантов парогенератора РУ типа БН-1600М

Вариант параметров рабочего тела	Тип промперегрева пара	Тип пучка теплообменных труб	Описание конструкции парогенератора (формула парогенератора *)	№ варианта
Закритические параметры	Паровой	Прямотрубный	Два модуля ИП 2 ИП-1	I
		Витой	Один модуль ИП 1 ИП-2	II
	Натриевый	Прямотрубный	Два модуля ИП Один модуль ППП $2 \text{ ИП-3} + 1 \text{ ППП-В}$	III
		Витой	Один модуль ИП Один модуль ППП $1 \text{ ИП-4} + 1 \text{ ППП-В}$	IV
Умеренные Параметры	Паровой	Прямотрубный	Один модуль ИП 1 ИП-5	V
	Натриевый	Прямотрубный	Один модуль ИП Один модуль ППП $1 \text{ ИП-6} + 1 \text{ ППП-А}$	VI

*) $2 \text{ ИП-3} + 1 \text{ ППП-В}$ - формула парогенератора, где

2 - число модулей ИП (число 3 указывает номер варианта в табл. П 1.1 или П 1.3);
1 - число модулей ППП (буква В указывает номер варианта в табл. П 1.2).

**ЗАВИСИМОСТЬ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
АКТИВНЫХ ЗОН С УРАН-ПЛУТОНИЕВЫМ ОКСИДНЫМ И НИТРИДНЫМ ТОПЛИВОМ
ОТ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ШАГА ПУЧКА ТВЭЛОВ**

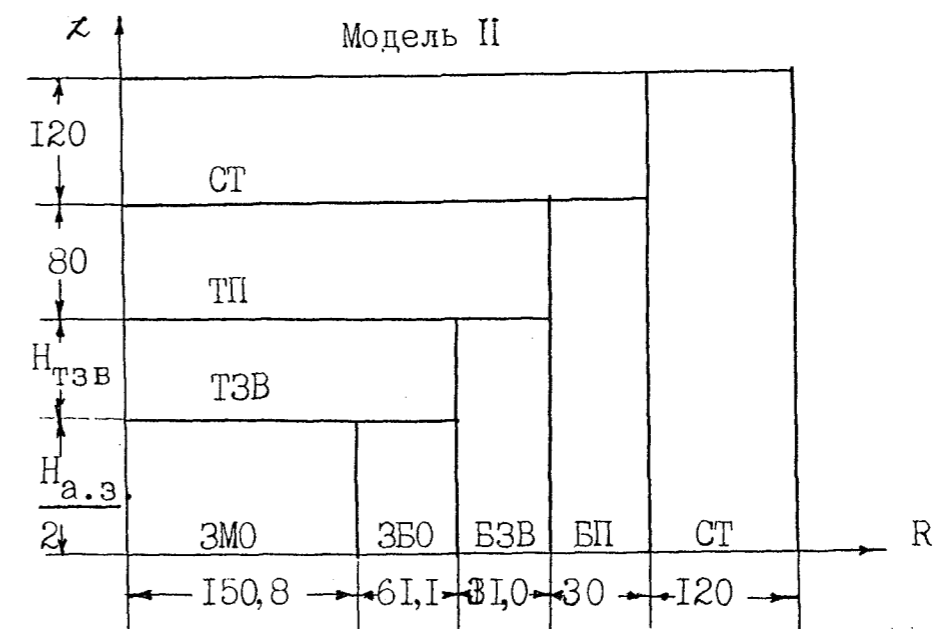
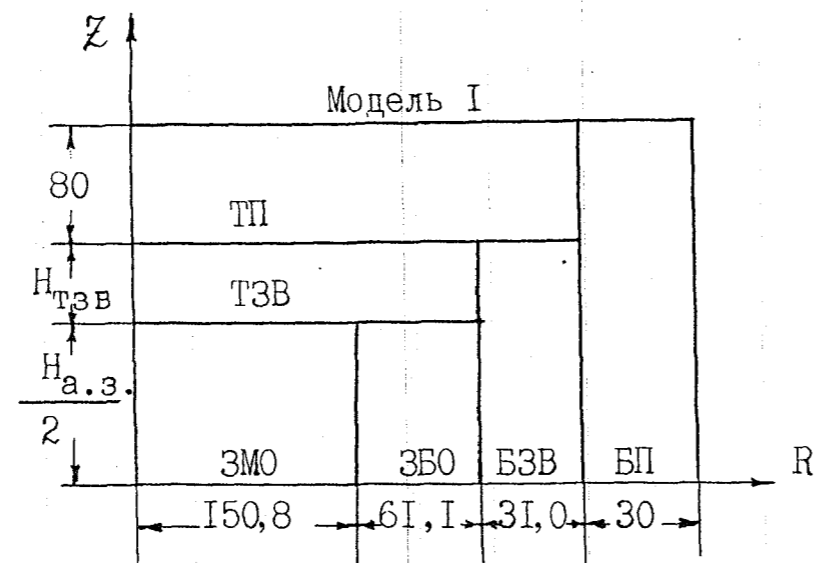
В приложении представлены результаты расчетов нейтронно-физических характеристик активных зон большого энергетического реактора типа БН-1600, различающихся долями топлива, стали и видом топлива /25/. Рассматривались гомогенные (традиционные) активные зоны с выравниванием полей энерговыделений по радиусу двумя зонами обогащения.

Описание конструктивных особенностей различных вариантов активных зон приведено в подразделе 4.1.

В представленных ниже исследованиях, если не оговорено особо, под $\text{НПЭР}_{\text{p-p}}$ понимают изменение $k_{\text{эфф}}$ при полном удалении натрия (от хвостовика до головки) во всех элементах центральной части аппарата. На рис. П.2.1 представлены расчетные модели активных зон с указанием их радиальных и аксиальных размеров. Модель I использовалась при определении критических параметров и характеристик воспроизводства. Расчеты выполнялись в 8-ми групповом приближении по программе SINVAR-2 /39/ с подготовкой многогрупповых констант с использованием комплекса АРАМАКО-80 /130/.

Модель II использовалась для оценочных расчетов величины $\text{НПЭР}_{\text{p-p}}$ по программе SINVAR-2. Исследование зависимости величины $\text{НПЭР}_{\text{p-p}}$ от конструктивного исполнения элементов активной зоны выполнялось на усложненных моделях, представленных на рисунках П.2.2 и П.2.3. Расчеты проводились по двумерной диффузионной программе ТВК-2D в 26 группах с использованием комплекса программ подготовки многогрупповых констант АРАМАКО-С1 /131/. Для ряда вариантов активных зон величина $\text{НПЭР}_{\text{p-p}}$ рассчитывалась по программе ММКФК /129/ с использованием комплекса АРАМАКО-80.

Целью расчетов являлось определение зависимости от величины относительного шага пучка твэлов нейтронно-физических характеристик активных зон, удовлетворяющих перечисленным в подразделе 4.1 ограничениям и требованиям. При проведении расчетов были сделаны следующие допущения.



158

Рис. П.2.1.

Расчетные модели активных зон для определения критических параметров и характеристик воспроизводства

ЗМО - зона малого обогащения;

ЗБО - зона большого обогащения;

ТЗВ - торцевая зона воспроизводства;

БЗВ - боковая зона воспроизводства;

ТП, БП - торцевой и боковой подпоры;

СТ - сталь;

- Размеры зон даны в см;

- Величины $H_{АЗ}$ и $H_{ТЗВ}$ варьируются.

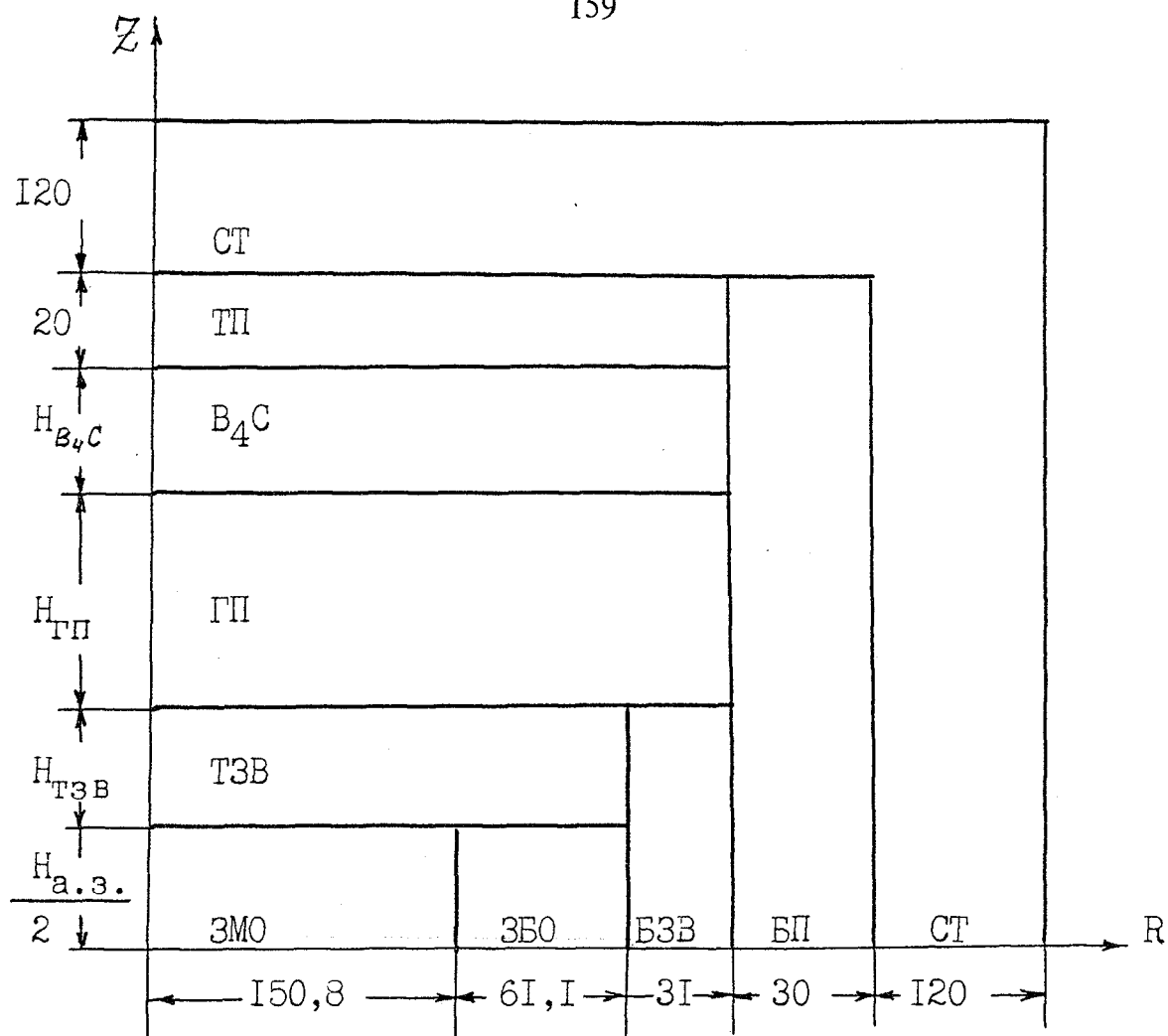


Рис. П.2.2.

Расчетная модель для определения величины
НПЭР по программе ТВК-2Д

- ЗМО - зона малого обогащения;
 ЗБО - зона большого обогащения;
 TZB - торцевая зона воспроизводства;
 BZB - боковая зона воспроизводства;
 TP, BP - торцевой и боковой подпоры;
 CT - сталь;
 GP - зона размещения газосборников ТВЭЛ;
 доли стали и натрия равны соответствующим
 долям ЗМО (или ЗБО); доля топлива равны нулю
 B₄C - зона размещения карбида бора с естественным
 содержанием B¹⁰ и B¹¹; принят состав ЗМО,
 только вместо топлива помещен B₄C;
 эффективная плотность карбида бора 2 г/см³;
 H_{B₄C}, H_{а.з.}, H_{GP}, H_{TZB} - варьируемые величины.

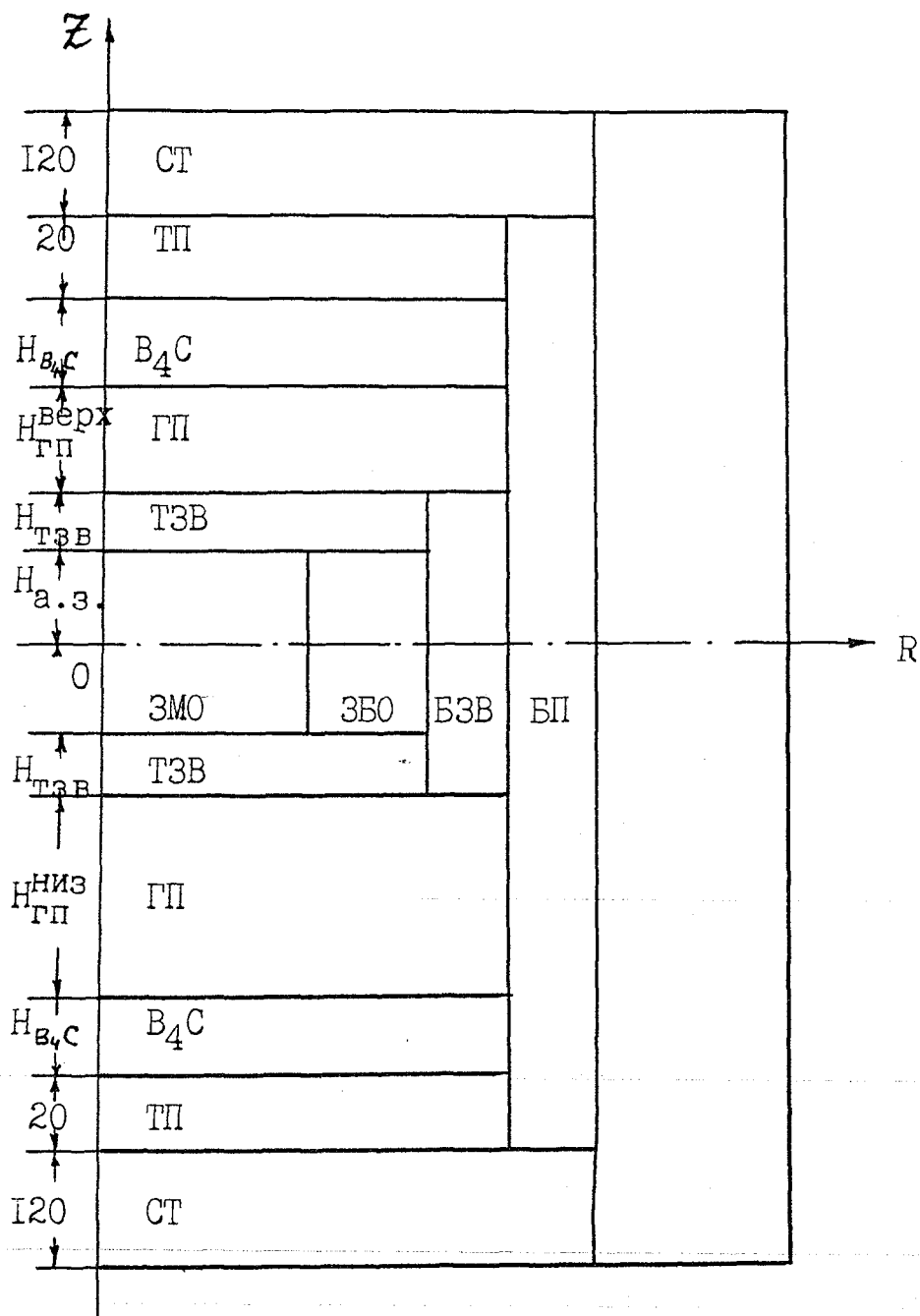


Рис. П.2.3.

Расчетная модель для определения величины
НПЭР по программам ТВК-2Д и ММКРК

- обозначения зон, см. рис. П.2.2.
- радиальные размеры зон, см. рис. П.2.2.
- $H_{в4с}$, $H_{а.з.}$, $H_{ТЗВ}$, $H_{ГП}^{верх}$, $H_{ГП}^{низ}$ - варьируемые величины.

а). Критические параметры (обогащение, критзагрузка) и характеристики воспроизводства рассчитывались на середину микрокампании. Рассматривался установившийся режим равномерно-частичных перегрузок.

б). Изменение относительного шага пучка твэлов достигалось варьированием числа твэлов в ТВС: 169, 217 и 271 шт. на ТВС при неизменном диаметре оболочки 7.4 мм. Для каждого варианта ТВС рассмотрены два состава:

- состав А соответствует реальным геометрическим характеристикам ТВС, представленным в подразделе 4.1; толщина оболочки твэла принята 0.5 мм;
- состав В соответствует ТВС с таким же количеством твэлов, в которой до предела уменьшено количество конструкционных материалов: удалены чехол, дистанционирующие решетки; толщина оболочки твэла 0.45 мм.

Данный подход позволил оценить степень влияния доли конструкционных материалов на нейтронно-физические характеристики активной зоны. В таблице П.2.1 представлены характеристики составов А и В для ТВС с различным числом твэлов.

в). Считалось, что состав ТЗВ соответствует составу активной зоны. В таблице П.2.2 приведены составы физических зон: БЗВ, торцевого подпора (ТП), бокового подпора (БП) и стальных имитаторов (СТАЛЬ).

г). Изотопные составы делящегося и воспроизводящего материалов приведены в таблице П.2.3. Содержание делящегося и воспроизводящего материалов в топливных композициях различных зон представлено в таблице П.2.4. В таблице П.2.5 приведены характеристики различных видов топлива. Здесь же для каждого типа топлива приведены величина среднего накопления осколков деления (среднего по объему активной зоны) и соответствующее ей максимальное выгорание. В качестве конструкционного материала чехла и оболочки твэла выбрана сталь ЭП-450 (ИХЗМ2БФР).

д). Для всех вариантов активных зон рассматривались топливные компенсаторы выгорания. Топливная композиция, состав стержней компенсаторов соответствуют топливу и составу зоны малого обогащения (ЗМО).

е). Длина микрокампании принималась 150 эфф. суток. Изменение реактивности при выгорании топлива за микрокампанию определялось без учета нептуниевого эффекта.

Таблица П.2.1

Состав активных зон с различными характеристиками пучков ТВЭЛОВ

Количество ТВЭЛОВ в ТВС, шт.		271		217		169	
Относительный шаг пучка		1.23		1.36		1.53	
Тип состава		А	В	А	В	А	В
Доли	топливо	0.393	0.406	0.315	0.325	0.245	0.253
	сталь	0.193	0.120	0.166	0.096	0.143	0.075
	натрий	0.414	0.474	0.519	0.579	0.612	0.672

Таблица П.2.2

Составы различных зон

Зона		БЗВ	ТП	БП	СТАЛЬ
Доли	топлива	0.40	-	-	-
	стали	0.15	0.45	0.55	1.0
	натрия	0.45	0.55	0.45	-

Таблица П.2.3

Изотопные составы делящегося и воспроизводящего материалов (%)

Изотопы	Зона	ЗМО ЗБО	ТЗВ	БЗВ	
	Делящийся материал	Pu ²³⁹	60	98	98
		Pu ²⁴⁰	25	2	2
		Pu ²⁴¹	10.4	-	-
		Pu ²⁴²	4.6	-	-
Обедненный уран		U ²³⁵	0.4		
		U ²³⁸	99.6		

Таблица П.2.4

Соотношение топливного и воспроизводящего материалов (весов) в топливных композициях различных зон

Зона	ЗМО и ЗБО	ТЗВ	БЗВ
U	Содержание Pu варьируется в диапазоне 10÷30 % (весовых), остальное обедненный U	98.9	99
Pu		1.1	1.0

Таблица П.2.5

Характеристики различных видов топлива

Вид топлива		Двуокись	Нитрид*)	Карбид	Легированный металл	
Топливо активной зоны	Формула	(U-Pu)O ₂	(U-Pu)N	(U-Pu)C	U-Pu-10%Zr	
	Теоретическая плотность, г/см ³ ($\gamma_{\text{теор}}$)	10.6	14.32	13.6	15.8	
	Эффективная плотность, г/см ³ ($\gamma_{\text{эфф}}$)	8.6	11.6	10.6	11.85	
	Соотношение $\left(\frac{\gamma_{\text{эфф}}}{\gamma_{\text{теор}}}\right)$, %	~ 81	81	~ 78	75	
	Среднее содержание осколков, % т.а.	4.4	3.1	3.3	3.2	
	Максимальное выгорание топлива **), % т.а.	15	10.4	11.3	10.7	
Топливные композиции зон воспроизводства	Формула		UO ₂	UN	UC	U
	Эффективная плотность, г/см ³	ТЗВ	9.2	12.4	12.4	15
		БЗВ	9.5	12.8	12.4	15

*) — Естественная смесь изотопов азота.

**) Выгорание подбиралось из расчета одинакового накопления газообразных продуктов деления.

А. КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОСПРОИЗВОДСТВА

В таблице П.2.6 представлены характеристики активных зон с оксидным топливом, рассчитанные для составов типа В. Из рассмотренных вариантов пучков только вариант с относительным шагом 1.23 (271 твэл/ТВС) позволяет обеспечить $K_{BA}=1.0$ при умеренных размерах активной части твэла: 110 см. При этом величина изменения реактивности при выгорании топлива за микрокампанию составляет - 0.33% $\Delta k/k$. (Расчеты показывают, что для достижения нулевого изменения реактивности при выгорании топлива за микрокампанию величина K_{BA} должна составлять в зависимости от варианта 1.03÷1.07). При относительном шаге 1.36 (217 твэл/ТВС) K_{BA} , равный 1.0, обеспечивается при высоте активной зоны 150÷155 см (состав типа В). Переход к составу А (сопровождающийся снижением доли топлива и увеличением доли стали) приводит к увеличению высоты активной зоны до значений более 160 см. В таблице П.2.7 представлены характеристики активных зон с оксидным топливом для варианта пучка с относительным шагом 1.23 (271 твэл/ТВС) и составом типа А. Рассматривались варианты активных зон с ТЗВ и без них. В таблице для сравнения приведены характеристики активной зоны с составом типа В.

Существенное увеличение относительного шага пучка твэлов (при умеренных высотах активных зон и условии $K_{BA}=1.0$) становится возможным при использовании плотных топливных композиций. В таблице П.2.8 приведены нейтронно-физические характеристики активных зон с различными видами топлив (рассмотрены варианты активных зон с относительным шагом пучка твэлов 1.53, длиной активной части твэла 90 см и составом типа В). Из представленных данных видно, что переход от оксидного топлива к плотным топливным композициям ведет к существенному увеличению K_{BA} . Влияние различных факторов на нейтронно-физические характеристики активных зон с высокими относительными шагами пучков твэлов изучалось на примере нитридного топлива, позволяющего обеспечить минимальное значение $НПЭР_{p-p}$.

В таблице П.2.9 показана зависимость нейтронно-физических характеристик и высоты активной зоны с нитридным топливом от величины относительного шага пучка твэлов и варианта состава (А или В). Для состава типа А рассматривались активные зоны с ТЗВ и без них. Расчеты показывают, что для пучка твэлов с относительным шагом 1.53 (169 твэл/ТВС) в случае состава А условие $K_{BA}=1.0$ выполняется при длине активной части твэла 160 см.

Характеристики активных зон с оксидным топливом
(Толщина ТЗВ: 2 x 30 см; Составы типа В)

Высота активной зоны	110			150		
	Относительный шаг пучка	1.23	1.36	1.53	1.23	1.36
число твэлов в ТВС	271	217	169	271	217	169
Обогащение по плутонию (ЗМО/ЗБО), %	13.9	15.7	18.1	13.0	14.4	16.4
	17.8	20.1	23.2	16.6	18.4	21.0
Критзагрузка, кг экв Pu ²³⁹	5698	5135	4618	7234	6421	5687
КВА	1.0	0.89	0.77	1.09	0.98	0.87
Breeding ratio (BR) p-p	1.38	1.29	1.19	1.38	1.30	1.21
Изменение реактивности за 150 эфф. суток, % ΔК/К	-0.33	-0.97	-1.95	+0.10	-0.41	-1.21
Оценка величины НПЭР _{p-p} , % ΔК/К (программа SINVAR-2, модель II)	+3.0	+3.2	+2.5	+3.9	+4.6	+4.5

Таблица П.2.7

Характеристики активных зон с относительным шагом пучка 1.23
(271 твэл/ТВС, окисное топливо)

Тип состава		В	А	
Высота активной зоны, см		110	120	120
Толщина ТЗВ, см		2 x 30	2 x 30	-
Обогащение по плутонию (ЗМО/ЗБО), %		13.9	14.3	14.2
		17.8	18.30	18.2
Критзагрузка, кг экв. Pu ²³⁹		5698	6173	6118
КВА		1.00	0.98	0.99
Breeding g ratio	активная зона	0.96	0.95	0.98
	ТЗВ + БЗВ	0.42	0.37	0.13
	реактор	1.38	1.32	1.11
Изменение реактивности за 150 эфф. сут., % ΔК/К		-0.33	-0.48	-0.61

Нейтронно-физические характеристики активных зон
с различными видами топлив

Тип топлива активной зоны		(U-Pu) O ₂	(U-Pu) N	(U-Pu) C	U-Pu-10%Zr
Обогащение по плутонию (ЗМО/ЗБО), %		<u>19.7</u> 25.2	<u>15.9</u> 20.4	<u>16.0</u> 20.5	<u>13.4</u> 17.2
Критзагрузка, кг экв. Pu ²³⁹		4114	4873	4519	4428
КВА		0.70	0.83	0.84	0.87
Breeding ratio	активная зона	0.66	0.79	0.80	0.82
	ТЗВ + БЗВ	0.52	0.54	0.59	0.69
	реактор	1.18	1.33	1.38	1.51
Оценка величины НПЭР _{p-p} , % ΔК/К (Программа SINVAR-2, модель II)		+ 1.3	+2.0	+2.5	+5.5

Таблица П.2.9

Характеристики активных зон с нитридным топливом в зависимости от величины относительного шага пучка

Относительный шаг пучка число твэлов в ТВС	<u>1.23</u> 271			<u>1.36</u> 217			<u>1.53</u> 169		
	В	А		В	А		В	А	
Тип состава	В	А		В	А		В	А	
Высота активной зоны, см	80	80		100	105		140	160	
Толщина ТЗВ, см	2 x 30	2 x 30	-	2 x 30	2 x 30	-	2 x 30	2 x 30	-
Обогащение по плутонию (ЗМО/ЗБО), %	<u>12.7</u>	<u>13.2</u>	<u>13.0</u>	<u>13.3</u>	<u>13.7</u>	<u>13.5</u>	<u>13.8</u>	<u>14.0</u>	<u>13.9</u>
	16.2	16.8	16.6	17.0	17.5	17.2	17.6	17.9	17.8
Критзагрузка, кг экв. Pu ²³⁹	5534	5560	5467	5811	6061	5970	6529	7361	7285
КВА	1.02	0.99	1.00	0.99	0.98	0.99	0.99	0.98	0.99
Breeding ratio	активная зона	0.97	0.94	0.99	0.95	0.94	0.98	0.95	0.98
	ТЗВ + БЗВ	0.54	0.51	0.13	0.48	0.44	0.14	0.40	0.35
	реактор	1.51	1.45	1.12	1.43	1.38	1.12	1.35	1.30
Изменение реактивности за 150 эфф. сут., % ΔК/К	- 0.25	-0.41	- 0.61	- 0.28	- 0.40	- 0.55	- 0.40	- 0.36	- 0.43

В. ЗАВИСИМОСТЬ ВЕЛИЧИНЫ НПЭР_{р-р} ОТ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ АКТИВНОЙ ЗОНЫ И ТВС

Ниже представлены результаты расчетов, позволяющие оценить влияние на величину НПЭР_{р-р} состава и размеров зон, имитирующих в расчетных моделях различные элементы конструкции ТВС: активную часть твэла, торцевые ЗВ, газосборник и т.д.

В качестве базовой была выбрана расчетная модель, представленная на рисунке П.2.2, со следующими исходными характеристиками:

- толщина экрана из карбида бора $N_{B_4C} = 0$;
- газосборники размещены симметрично относительно активной зоны (сверху и снизу), каждый газосборник принимался равным 100 см.

Наиболее полно влияние состава и размеров зон на величину НПЭР_{р-р} исследовалось для активных зон с составами типа В, нейтронно-физические характеристики которых приведены в таблицах П.2.7 и П.2.9. Результаты исследований представлялись в виде зависимости $\Delta k_{эфф}$ от плотности теплоносителя, а именно:

$$\Delta k_{эфф}(\gamma) = k_{эфф}(\gamma) - k_{эфф}(\gamma_{ном}),$$

где $k_{эфф}(\gamma)$ и $k_{эфф}(\gamma_{ном})$ — соответственно, коэффициенты размножения при плотностях теплоносителя γ и $\gamma_{ном}$;

$\gamma_{ном}$ - плотность теплоносителя при номинальных параметрах активной зоны.

Величина НПЭР_{р-р} определялась из соотношения:

$$НПЭР_{р-р} = \Delta k_{эфф}(\gamma = 0).$$

Для определения величин $\Delta k_{эфф}(\gamma)$ и НПЭР_{р-р} выполнялись прямые расчеты $k_{эфф}$ реактора с номинальной плотностью теплоносителя $\gamma_{ном}$ и с плотностью γ (в том числе $\gamma = 0$).

При проведении расчетов были сделаны следующие упрощения:

- все ячейки СУЗ заняты ТВС ЗМО;
- в пределах выделенных расчетных зон выполнялась гомогенизация составов; подготовка многогрупповых макроконстант (если не оговорено особо) осуществлялась по стандартным расчетным схемам комплексов АРАМАКО-80 и АРАМАКО-С1.

На рисунке П.2.4 представлена зависимость $\Delta k_{эфф}(\gamma)$ для активной зоны с оксидным топливом, имеющей $KVA=1.0$ при относительном шаге пучка твэлов 1.23 (271 твэл/ТВС). Зависимость $\Delta k_{эфф}(\gamma)$ получена при различных значениях толщины торцевой зоны воспроизводства ($H_{ТЗВ}$). Видно, что исключение ТЗВ позволяет существенно снизить величину $НПЭР_{p-p}$. Однако значение $НПЭР_{p-p}$ остается положительным. На рисунке П.2.5 представлены аналогичные зависимости, рассчитанные для активной зоны с оксидным топливом и относительным шагом пучка твэлов 1.23 (271 твэл/ТВС), в которой KVA снижен до 0.93 и уменьшена величина $НПЭР_{p-p}$. Расчеты выполнены для ТЗВ толщиной 2x5 см и в отсутствие последней. Здесь же приведены зависимости $\Delta k_{эфф}(\gamma)$ при различных размерах ТЗВ для активной зоны с относительным шагом пучка твэлов 1.36 (217 твэл/ТВС), имеющей $KVA=0.94$. На основе полученных результатов сделаны следующие выводы:

- с увеличением относительного шага пучка твэлов (при условии сохранения KVA) величина $НПЭР_{p-p}$ возрастает;
- для рассмотренных вариантов при плотности теплоносителя, близкой к номинальным значениям, уменьшение последней приводит к увеличению $k_{эфф}$ ($\Delta k_{эфф} > 0$);
- утонение или исключение ТЗВ и уменьшение высоты активной зоны (при условии сохранения относительного шага пучка твэлов) приводит к снижению $НПЭР_{p-p}$.

Подобные исследования были выполнены для активных зон с нитридным топливом и составом В. На рисунке П.2.6 представлена зависимость $\Delta k_{эфф}(\gamma)$ для активной зоны с относительным шагом пучка твэлов 1.36 (217 твэл/ТВС), имеющей $KVA=1.0$. Расчеты выполнены при различных значениях толщины торцевой зоны воспроизводства. На рисунках П.2.7 и П.2.8 представлены зависимости $\Delta k_{эфф}(\gamma)$ для активных зон с различными относительными шагами пучков твэлов при толщине ТЗВ 2x5 см и в отсутствие последней. Расчеты показывают, что замена оксида на нитрид ведет к изменению численных значений кривых $\Delta k_{эфф}(\gamma)$. Тем не менее характер кривых сохраняется.

Представленные на рисунках П.2.4-П.2.8 результаты расчетов получены по программе ТВК-2D в диффузионном приближении. На рисунке П.2.9 представлено сравнение результатов расчета зависимостей $\Delta k_{эфф}(\gamma)$, полученных для одного варианта активной зоны на одинаковых расчетных моделях по

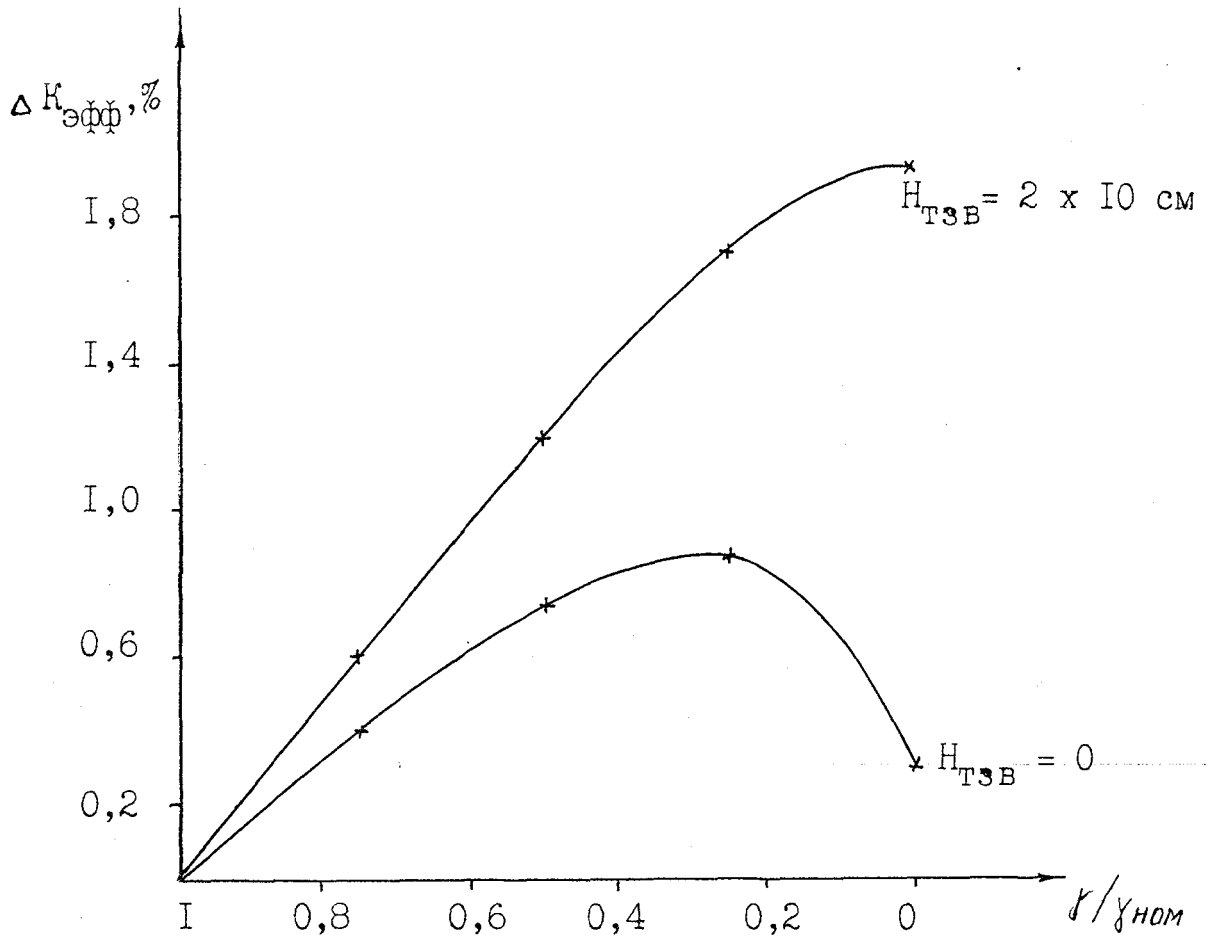


Рис. П.2.4.

Изменение $K_{эфф}$ в зависимости от плотности теплоносителя при различной толщине торцевых зон воспроизводства (расчетная модель на рис. П.2.2.)

Относительный шаг 1,23 (271 твэл/ТВС), окисное топливо; состав типа В, высота активной части 110 см; $K_{ВА} \approx 1,0$; $H_{ТП} = 2 \times 100$ см; $H_{В,С} = 0$.

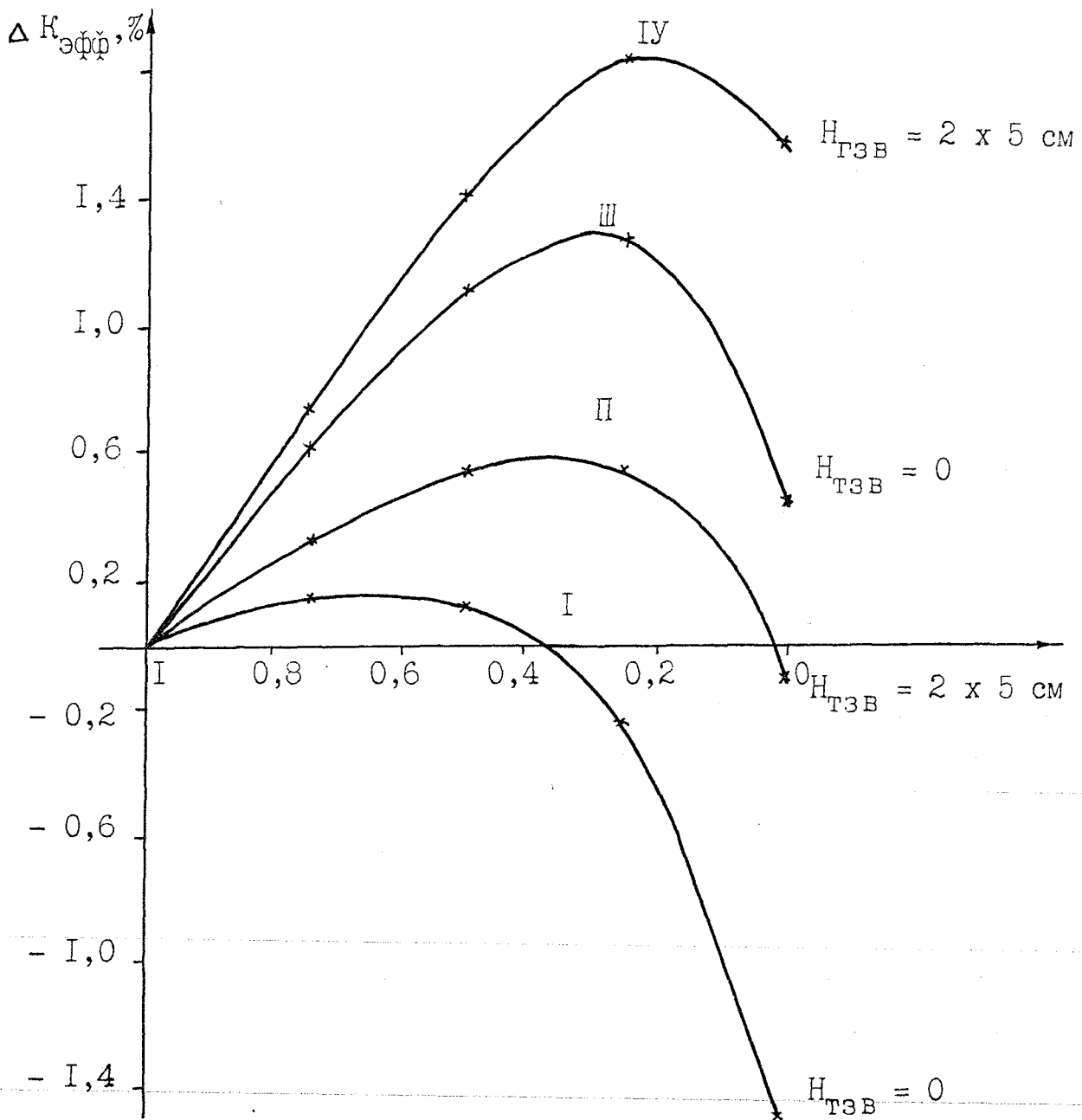


Рис. П.2.5.

Изменение $K_{эфф}$ в зависимости от плотности теплоносителя при различной толщине торцевых зон воспроизводства и относительных шагах пучков (расчетная модель на рис. П.2.2.:

Оксидное топливо, состав В;

$H_{ГП} = 2 \times 100 \text{ см}$, $H_{В,С} = 0$.

I, II - относительный шаг пучка 1,23 (271 твэл), высота активной зоны 90 см, $K_{ВА} \approx 0,93$;

III, IV - относительный шаг пучка 1,36 (217 твэл), высота активной зоны 130 см, $K_{ВА} \approx 0,94$.

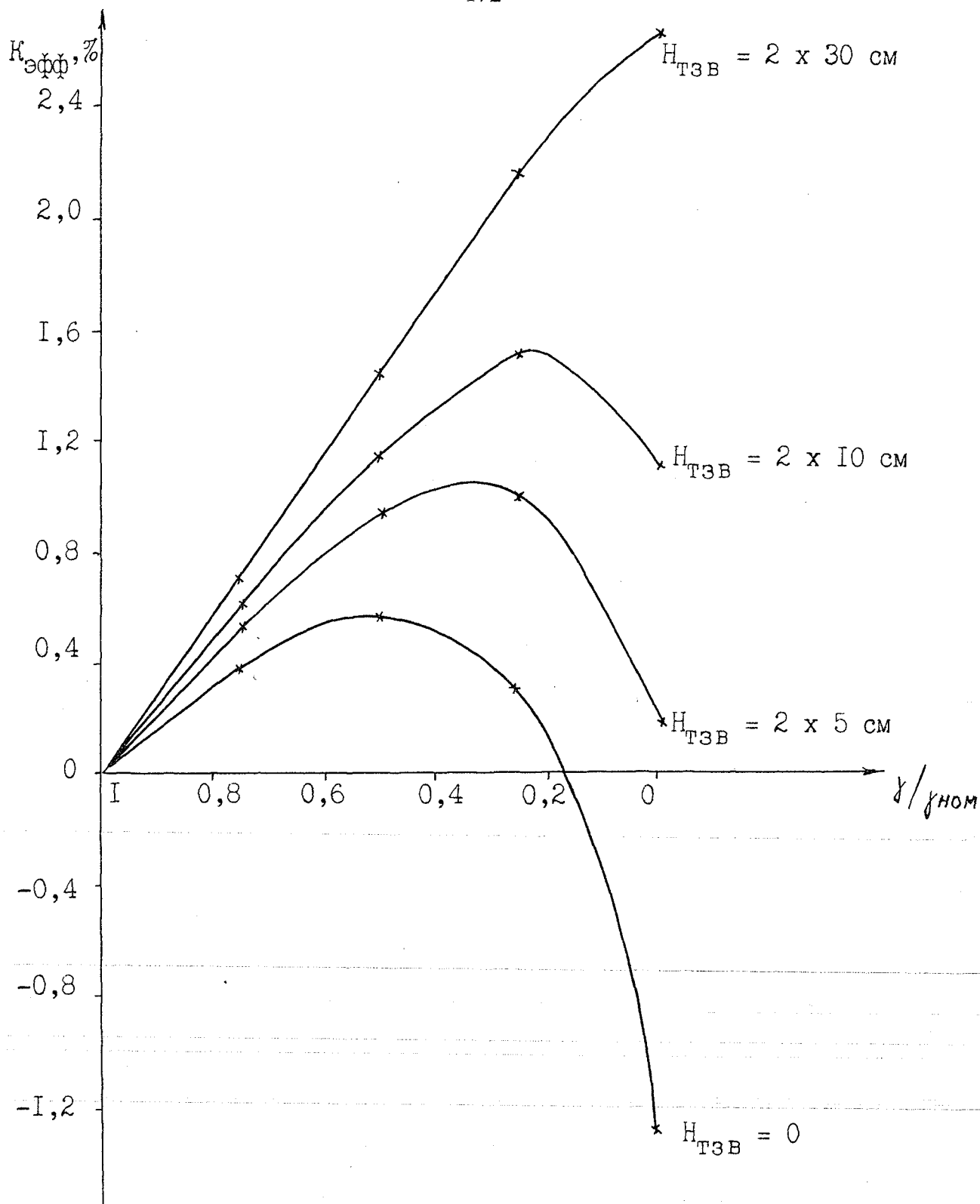


Рис. П.2.6.

Изменение $K_{эфф}$ в зависимости от плотности теплоносителя при различной толщине торцевых зон воспроизводства (расчетная модель на рис. П.2.2.)

Относительный шаг 1,36 (217 твэл/ТВС);
 Нитридное топливо, состав В;
 высота активной части 100 см;
 $K_{ВА} \approx 0,99$; $H_{ГП} = 2 \times 100 \text{ см}$; $H_{В,С} = 0$.

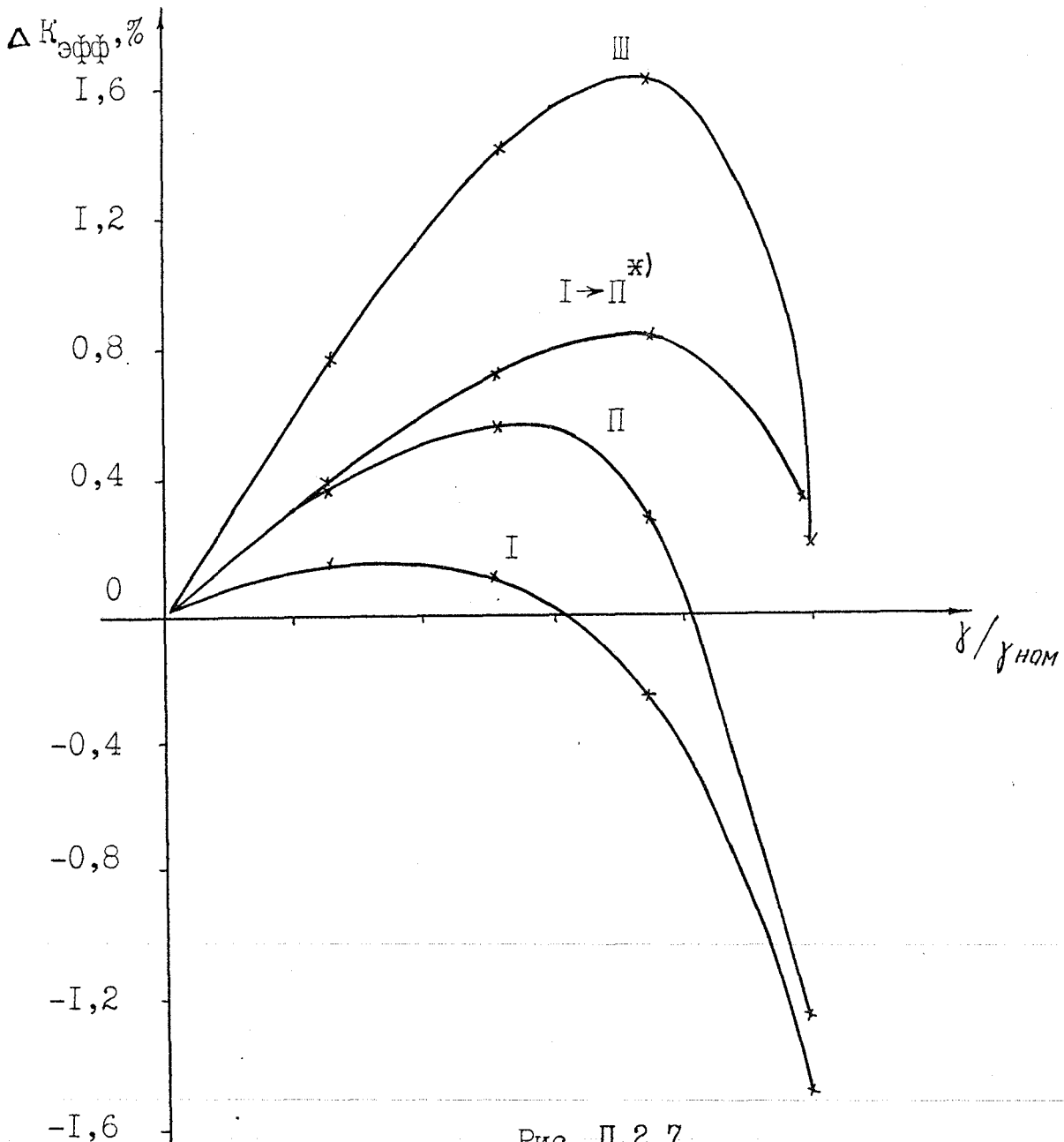


Рис. П.2.7.

Изменение $K_{\text{эфф}}$ в зависимости от плотности теплоносителя для активных зон с различными относительными шагами пучков твэл и КВА I,0 (расчетная модель на рис. П.2.2.)

Нитридное топливо, состав В;

I - относительный шаг пучка I,23 (271 твэл), $H_{\text{АЗ}}=80\text{см}$;

II - относительный шаг пучка I,36 (217 твэл), $H_{\text{АЗ}}=100\text{см}$;

III - относительный шаг пучка I,53 (169 твэл), $H_{\text{АЗ}}=140\text{см}$;

I → II * - в активной зоне с относительным шагом I,23 высота активной части твэла увеличена с 80см до 100см.

$H_{\text{вчс}} = 0$; $H_{\text{ТП}} = 2 \times 100\text{см}$, $H_{\text{ТЗВ}} = 0$.

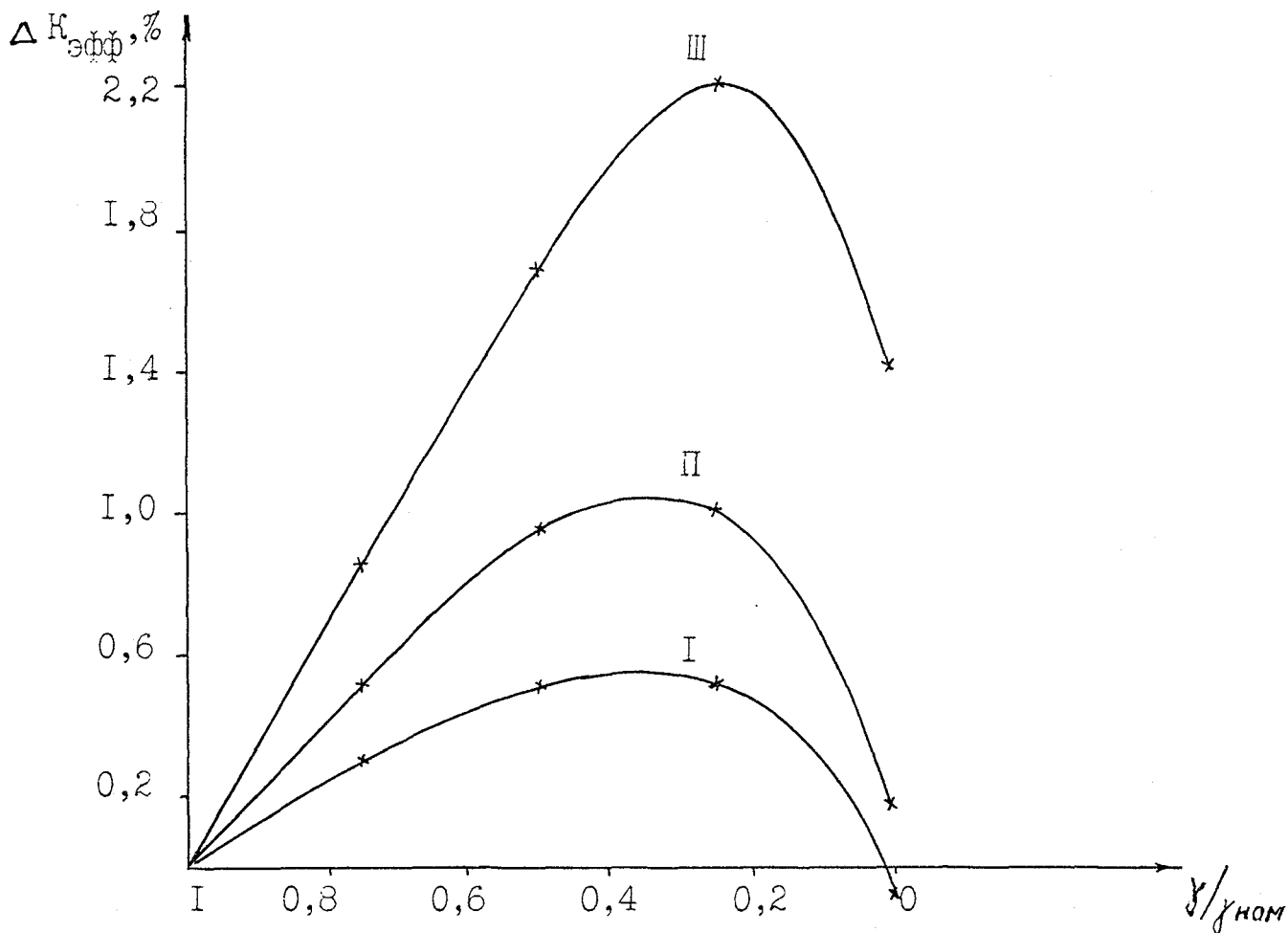


Рис. П.2.8.

Изменение $K_{эфф}$ в зависимости от плотности теплоносителя для активных зон с различными относительными шагами пучков твэл и $K_{BA} \approx 1,0$
(Расчетная модель на рис. П.2.2.)

Нитридное топливо, состав В;

I - относительный шаг пучка 1,23 (271 твэл), $H_{AZ} = 80$ см;

II - относительный шаг пучка 1,36 (217 твэл), $H_{AZ} = 100$ см;

III - относительный шаг пучка 1,53 (169 твэл), $H_{AZ} = 140$ см.

$H_{B,C} = 0$, $H_{ГП} = 2 \times 100$ см, $H_{ТЗВ} = 2 \times 5$ см.

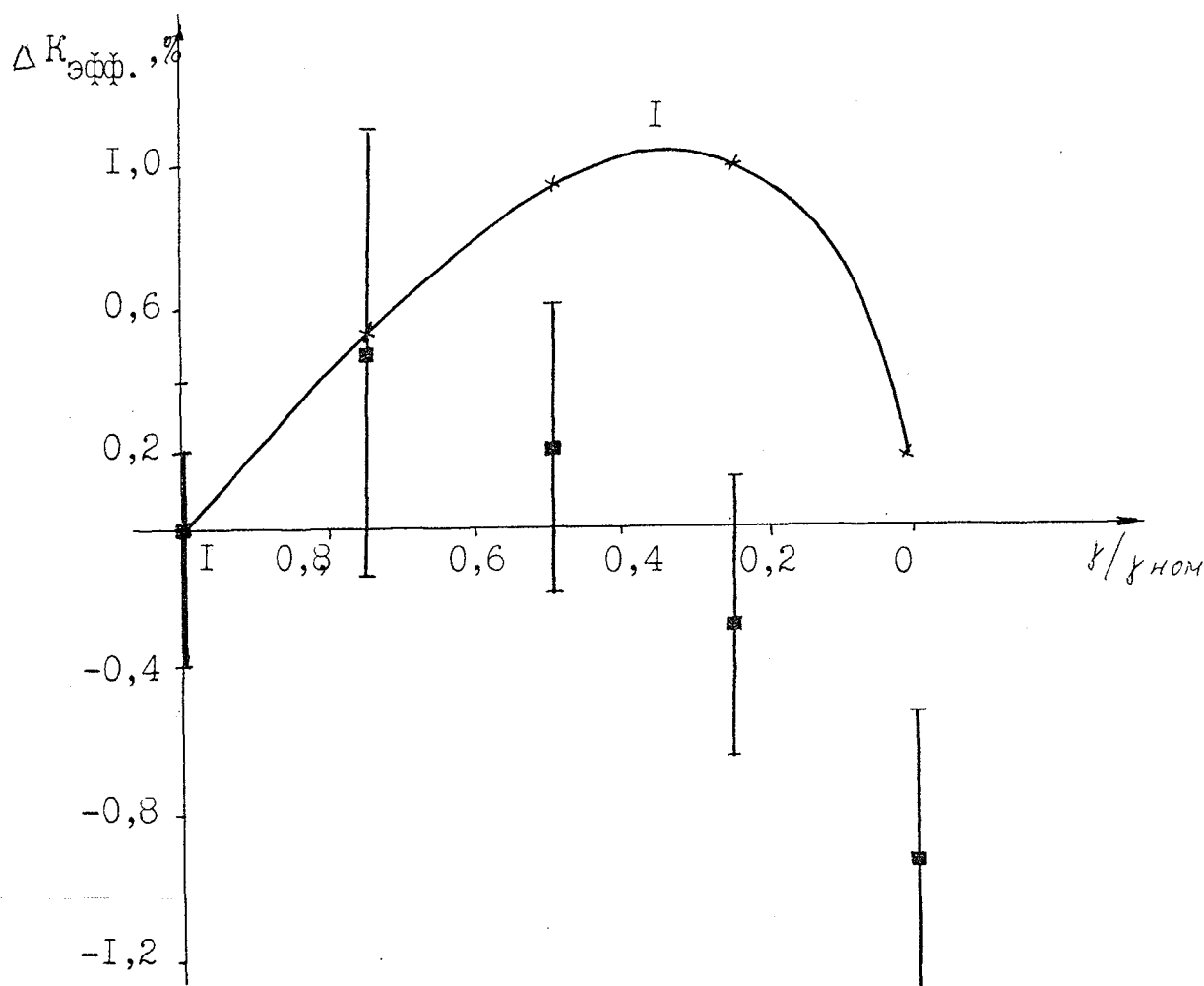


Рис. П.2.9.

Сравнение расчетов изменения $k_{эфф}$ в зависимости от плотности теплоносителя, выполненных по программам ТВК-2Д и ММКФК.

Нитридное топливо: состав типа В, относительный шаг пучка 1,36 (217 твэл), высота активной части 100 см, $K_{ВА} \approx 1,0$,
 $H_{в,с} = 0$, $H_{гп} = 2 \times 100$ см, $H_{ТЗВ} = 2 \times 5$ см.

I - расчет по ТВК-2Д с использованием АРАМАКО-С1;

II - расчет по ММКФК и АРАМАКО-80; *)

Представлен возможный диапазон изменения $\Delta K_{эфф}$ с учетом погрешности расчета, зависящей от числа историй. Расчеты выполнены при следующем числе историй:

$\rho/\rho_{ном}$	I	0,75	0,5	0,25	0
$N_{историй}$	81200	13800	80000	77400	77400

*) - $\Delta K_{эфф}$ представлено с погрешностью одна σ .

программам ТВК-2D и ММКФК (Метод Монте-Карло). Характер кривых $\Delta k_{эфф}(\gamma)$ подтверждается расчетами по различным программам.

С целью определения влияния на $НПЭР_{p-p}$ размеров верхнего и нижнего газосборников были выполнены следующие исследования.

а). Для активной зоны с нитридным топливом, толщиной ТЗВ 2x5 см, составом В и относительным шагом пучка твэлов 1.36 (217 твэл/ТВС) оценивалась величина $НПЭР_{p-p}$ при длине газосборников, соответственно, 2x100 см и 2x60 см (симметричная относительно центральной плоскости активной зоны расчетная модель). Расчеты показывают, что уменьшение размеров газосборников приводит к увеличению $НПЭР_{p-p}$ с +0.19% до +0.64% $\Delta K/K$.

б). На рисунке П.2.10 показано влияние на зависимость $\Delta k_{эфф}(\gamma)$ одновременного уменьшения верхнего газосборника со 100 см до 15 см и увеличения нижнего газосборника со 100 см до 120 см. Расчеты выполнены для варианта активной зоны с нитридным топливом, толщиной ТЗВ 2x5 см, составом В и относительным шагом пучка твэлов 1.36 (217 твэл/ТВС). Расчеты показывают, что при указанном изменении размеров газосборников величина $НПЭР_{p-p}$ возрастает с +0.19% до +1.03% $\Delta K/K$.

Из представленных выше результатов исследований видно, что на значение $НПЭР_{p-p}$ значительное влияние оказывают размеры и составы зон, имитирующих в расчетных моделях газосборники, стальную защиту, ТЗВ и определяющих величину утечки нейтронов из центральной части реактора (в состоянии без натрия). В силу того, что величина утечки нейтронов из активной зоны существенно зависит от отражающих способностей периферийных зон, были выполнены исследования, позволяющие оценить влияние на $НПЭР_{p-p}$ неточности расчета отражающих способностей зон различного состава. Обычно во всех расчетных зонах при блокировке транспортного сечения (Σ_{tr}) используется спектр первой гармонии (ток нейтронов) в разложении полного потока $F(E, \vec{r}, \vec{\Omega})$ /133/:

$$F(E, \vec{r}, \vec{\Omega}) \cong \left\{ \Phi(E, \vec{r}) + 3 \vec{\Omega} \vec{J}(E, \vec{r}) \right\} \frac{1}{4\pi}, \text{ где}$$

$\vec{J}(E, \vec{r})$ - ток нейтронов (первая гармоника),

$\Phi(E, \vec{r})$ - поток нейтронов (нулевая гармоника).

Данная процедура подготовки транспортного сечения позволяет получить нижнюю оценку величины альбеда различных зон, что вполне достаточно для

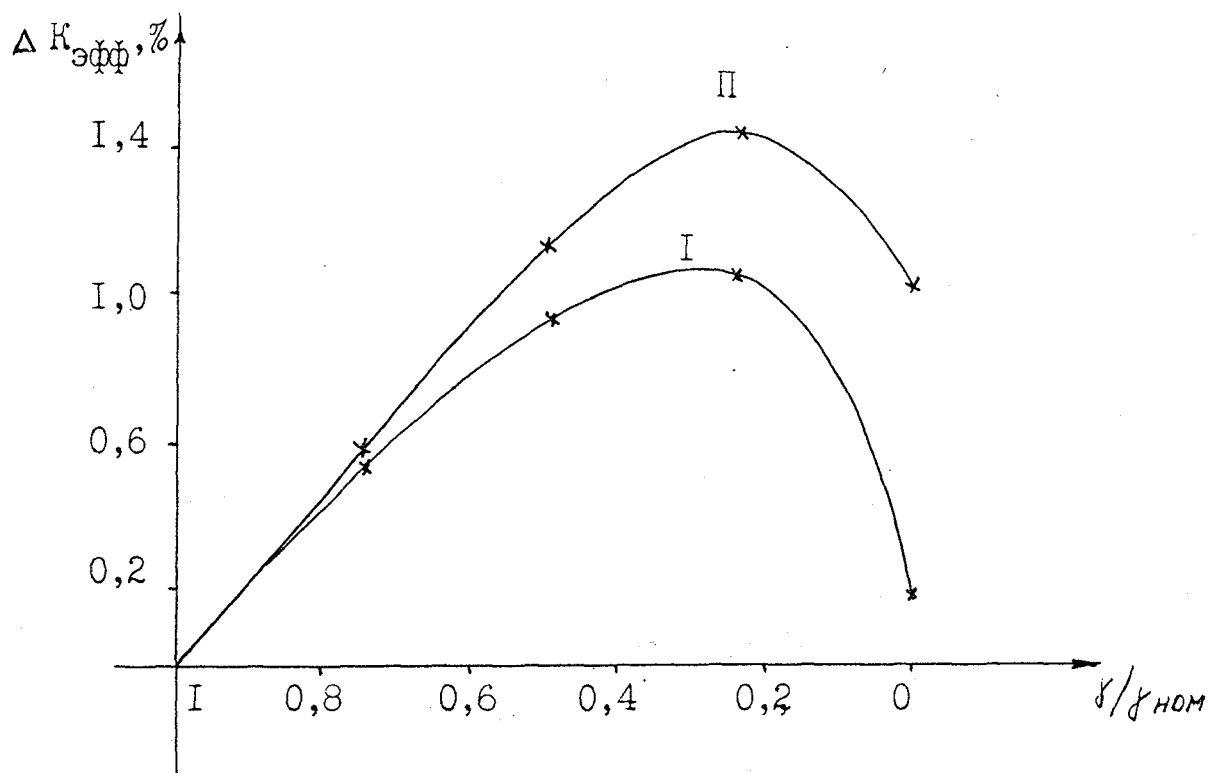


Рис. П.2.10.

Влияние на $K_{\text{эфф}}$ изменения размеров верхнего и нижнего газосборников

Нитридное топливо: состав типа В, относительный шаг пучка 1,36 (2Г7 твэл), высота активной части 100 см; $K_{\text{ВА}} \approx 1,0$; $H_{\text{ТЗВ}} = 2 \times 5 \text{ см}$; $H_{\text{В,С}} = 0$.

I - расчетная модель на рис. П.2.2.

$H_{\text{ГП}} = 2 \times 100 \text{ см}$;

II - расчетная модель на рис. П.2.2.

- верхний газосборник уменьшен со 100 см до 15 см;

- нижний газосборник увеличен со 100 см до 120 см.

расчета $k_{эфф}$ (как в состоянии с натрием, так и без него) активных зон, окруженных “толстыми” торцевыми и боковыми ЗВ, (т.е. зонами с относительно большими размерами и долями топлива, стали). В случае утонения ЗВ и/или уменьшения долей топлива и стали (т.е. перехода к “тонким” экранам) погрешность в определении $k_{эфф}$ активной зоны в состоянии без натрия (и, следовательно, погрешность в определении $НПЭР_{p-p}$), обусловленная неточностью оценки отражающих способностей различных зон, существенно возрастает. В работе /133/ отмечается, что для расчета отражающих способностей “тонкого” отражателя целесообразно выполнять блокировку транспортного сечения с весом нулевой гармоники, т.е. использовать процедуру, позволяющую получить верхнюю оценку величины альбедо. В связи с вышесказанным для активной зоны с нитридным топливом, составом В, толщиной ТЗВ 2x5 см и относительным шагом пучка твэлов 1.36 (217 твэл/ТВС) были рассчитаны два значения $НПЭР_{p-p}$, представляющих собой нижнюю и верхнюю оценку величины пустотного эффекта (истинное значение $НПЭР_{p-p}$ находится в пределах указанного диапазона):

- блокировка во всех расчетных зонах транспортного сечения с весом первой гармоники (стандарт); величина $НПЭР_{p-p} = +0.19\% \Delta K/K$;
- блокировка во всех зонах Σ_{tr} с весом нулевой гармоники;
- $НПЭР_{p-p} = +1.22\% \Delta K/K$.

В таблице П.2.10 представлены результаты расчетов $НПЭР_{p-p}$, позволяющие оценить влияние на величину пустотного эффекта неточности расчета отражающих способностей отдельных зон расчетной модели (см. рисунок П.2.2). Представленные выше результаты демонстрируют важность данного фактора в вопросе корректного расчета величины $НПЭР_{p-p}$.

Выше обсуждались пути максимально возможного снижения $НПЭР_{p-p}$. Вместе с тем расчеты показывают, что величина пустотного эффекта при удалении натрия только из объема активной зоны может оставаться существенно положительной при нулевых и отрицательных значениях $НПЭР_{p-p}$. В таблице П.2.11 для активных зон с различными видами топлив и различными относительными шагами пучков твэлов приведены значения эффектов реактивности при удалении натрия только в объеме активной зоны и по всему реактору: $НПЭР_{AZ}$ и $НПЭР_{p-p}$. Рассматривались варианты активных зон без ТЗВ, составы типа В.

Изменение величины НПЭР при блокировке в различных зонах
транспортного сечения по спектру нулевой гармоники

Зона, в которой блокировка Σ_{tr} осуществляется по спектру нулевой гармоники. В остальных зонах - стандартная подготовка Σ_{tr}	НПЭР, %
Все зоны по спектру первой гармоники	+ 0.19
ТЗВ	+ 0.21
БЗВ	+ 0.18
СТАЛЬ	+ 0.36
ТП	+ 0.49
ТП + СТАЛЬ	+ 0.64
Все зоны	+ 1.22

Таблица П.2.11

Соотношение НПЭР_{АЗ} и НПЭР_{р-р} для активных зон с КВА $\cong 1.0$ и
различными относительными шагами пучков
(Торцевые ЗВ отсутствуют. Составы типа В.

$$H_{B_4C} = 0; H_{ТП} = 2 \times 100 \text{ см})$$

Вариант активной зоны		Расчет по программе ТВК-2D	
		НПЭР _{р-р}	НПЭР _{АЗ}
<ul style="list-style-type: none"> ◆ окисное топливо; ◆ относительный шаг пучка 1.23; ◆ высота активной зоны 110 см; 		+ 0.32	+ 3.55
Нитридное топливо	<ul style="list-style-type: none"> ◆ относительный шаг 1.23; ◆ высота активной зоны 80 см; 	- 1.52	+ 2.61
	<ul style="list-style-type: none"> ◆ относительный шаг 1.36; ◆ высота активной зоны 100 см; 	- 1.28	+ 3.84
	<ul style="list-style-type: none"> ◆ относительный шаг 1.53; ◆ высота активной зоны 140 см; 	+ 0.22	+ 5.60

Видно, что при отрицательном значении $\text{НПЭР}_{\text{p-p}}$ может вводиться значительная положительная реактивность, например, при попадании в активную зону достаточно большого газового пузыря. Подобное будет происходить в аварийной ситуации со сливом теплоносителя из бака реактора. На рисунке П.2.11 для активной зоны с нитридным топливом, составом В, толщиной ТЗВ 2x5 см и относительным шагом пучка твэлов 1.36 (217 твэл/ТВС) показано изменение $k_{\text{эфф}}$ в зависимости от расположения уровня теплоносителя. Так, при величине $\text{НПЭР}_{\text{p-p}} +0.2\% \Delta\text{К/К}$ значение положительной реактивности, вводимой при сливе теплоносителя, может достигать $+2.1\% \Delta\text{К/К}$.

Утонение или полное исключение ТЗВ порождает проблему защиты от нейтронного излучения внутрикорпусных конструкций и теплоносителя II контура в ПТО. С этой целью предполагается за газосборниками (верхним и нижним) разместить поглощающие экраны толщиной 30 см каждый на основе карбида бора (с естественным содержанием изотопов B^{10} и B^{11}). В таблице П.2.12 представлены результаты исследований, демонстрирующие изменение $\text{НПЭР}_{\text{p-p}}$ при добавлении в объем центральной части аппарата поглощающих экранов на основе карбида бора. Рассмотрен вариант активной зоны с нитридным топливом, составом типа В, толщиной ТЗВ 2x5 см и относительным шагом пучка твэлов 1.36 (217 твэл/ТВС). Полагалось, что в поглощающем экране карбид бора занимает такую же долю сечения ТВС, что и топливо в активной зоне. Из результатов исследований видно, что с появлением поглощающих экранов с карбидом бора величина $\text{НПЭР}_{\text{p-p}}$ возрастает.

Представленные выше результаты получены для активных зон с составами типа В, т.е. при минимально возможном количестве конструкционных материалов. В таблице П.2.13 приведены результаты расчетов величины $\text{НПЭР}_{\text{p-p}}$ для активных зон с составами типа А, различными типами топлив и относительными шагами пучков твэлов, удовлетворяющих условию: $\text{КВА}=1.0$. При выборе вариантов были учтены результаты предыдущих исследований — исключены ТЗВ, за газосборниками размещен карбид бора. Расчеты выполнялись на симметричной относительно центральной плоскости активной зоны расчетной модели. Суммарная длина газосборников принималась равной длине активной части твэла. Здесь же для активной зоны с относительным шагом пучка 1.36 (217 твэл/ТВС) представлено значение $\text{НПЭР}_{\text{p-p}}$ в случае несимметричного расположения газосборников: 20 см вверху и 85 см внизу. На основе представленных расчетов можно сделать следующие выводы:

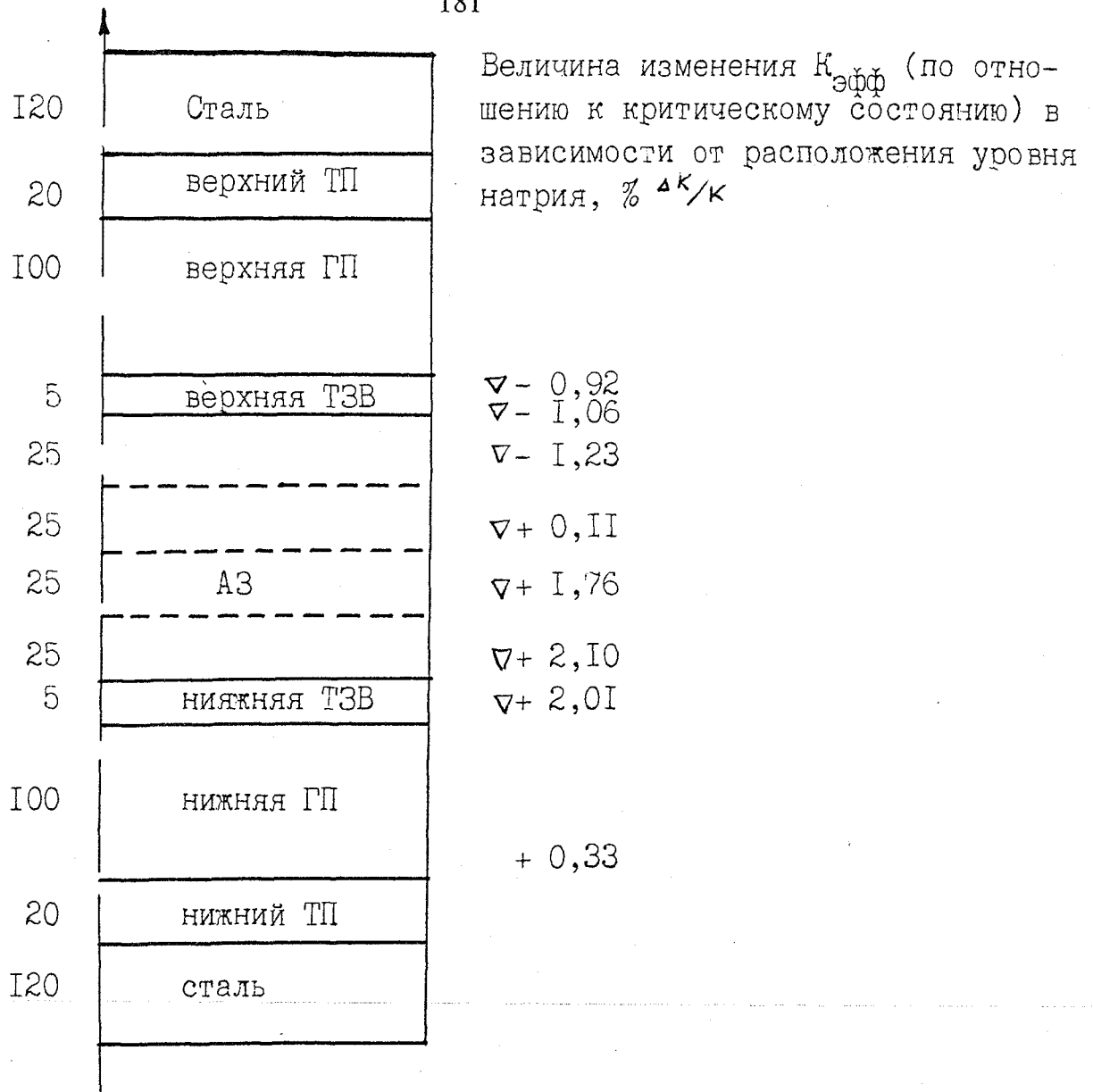


Рис. П.2.11.

Изменение $K_{эфф}$ при сливе теплоносителя из реактора. Расчет выполнен по программе ТВК-2Д для модели на рис. П.2.3.

Нитридное топливо, состав типа В; относительный шаг пучка 1,36, высота активной зоны 100 см;

$H_{В4С} = 0$; $H_{ГП} = 2 \times 100 \text{ см}$; $H_{ТЗВ} = 2 \times 5 \text{ см}$; $K_{ВА} \approx 1,0$;
 $НПЭР_{реактор} \approx + 0,2\%$; $НПЭР_{АЗ} \approx + 3,84\%$

- увеличение доли стали в активной зоне ведет к некоторому росту НПЭР_{pp} ;
- при условии, что величина КВА равняется 1.0 увеличение относительного шага пучка твэлов (уменьшение доли топлива) ведет к значительному росту $\text{НПЭР}_{\text{p-p}}$.

Таблица П.2.12

Изменение величины НПЭР для активной зоны с нитридным топливом, ТЗВ толщиной 2x5 см и относительным шагом пучка 1.36 при добавлении зон с карбидом бора. (Состав типа В)

Вариант расчета		Расчетная программа	НПЭР, %
Активная зона без карбида бора; $H_{B_4C} = 0$, $H_{ГП} = 2 \times 60$ см		ТВК-2D	+ 0.64
Активная зона с карбидом бора:	блокировка Σ_{tr} по спектру первой гармоники (стандарт)	ТВК-2D	- 0.68
	блокировка Σ_{tr} по спектру нулевой гармоники	ТВК-2D	- 0.02
$H_{B_4C} = 2 \times 30$ см $H_{ГП} = 2 \times 30$ см	стандартная процедура подготовки констант $N_{историй} \cong 110000 \div 130000$	ММКФК*)	- 0.25 ± 0.30
Активная зона с карбидом бора: $H_{B_4C} = 2 \times 30$ см верхний газосборник 20 см нижний газосборник 100 см Стандартная процедура подготовки констант $N_{историй} \cong 110000 \div 130000$		ММКФК*)	- 0.33 ± 0.28

*) НПЭР представлен с погрешностью одна σ .

Таблица П.2.13

Значение НПЭР для активных зон с различными
относительными шагами пучков и $KVA \cong 1.0$.
(Составы типа А; $H_{B_4C} = 2 \times 30$ см, расчеты по ТВК-2D,
модели на рис. П.2.2 и П.2.3)

Вариант активной зоны			НПЭР, %	
<ul style="list-style-type: none"> ◆ окисное топливо; ◆ относительный шаг 1.23; ◆ высота активной зоны 120 см; ◆ $H_{ГП} = 2 \times 30$ см; 			+ 0.85	
Нитридное топливо	<ul style="list-style-type: none"> ◆ относительный шаг пучка 1.23; ◆ высота активной зоны 80 см; ◆ $H_{ГП} = 2 \times 40$ см; 		- 1.13	
	относительный шаг пучка 1.36;	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Симметричная модель ◆ $H_{ГП} = 2 \times 52.5$ см 	- 0.24	
	◆ высота активной зоны 105 см;	<ul style="list-style-type: none"> ◆ несимметричная модель ◆ $H_{ГП}^{верх} = 20$ см ◆ $H_{ГП}^{низ} = 85$ см 	◆ блокировка Σ_{tr} по спектру первой гармоники	+ 0.03
			◆ блокировка Σ_{tr} по спектру нулевой гармоники	+ 0.80
	<ul style="list-style-type: none"> ◆ относительный шаг пучка 1.53; ◆ высота активной зоны 160 см; ◆ $H_{ГП} = 2 \times 80$ см; 		+ 2.43	