

НЕКОТОРЫЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ РЕАКТОРА «МАСТЕР»

Ю.А. Казанский*, В.А. Левченко**, Ю.С. Юрьев***,
В.А. Баршевцев**, В.А. Белугин***, С.Л. Дорохович**,
А.А. Казанцев**, А.В. Левченко**, Д.М. Титов**

* *Обнинский государственный технический университет атомной энергетики, г. Обнинск*

** *ЭНИМЦ «Моделирующие системы», г. Обнинск*

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



В статье приведены результаты расчетных исследований усовершенствованного реактора «МАСТЕР», подробное описание которого было опубликовано в журнале «Ядерная энергетика» в 2003 г. [1].

Модернизация реакторной установки проведена по следующим направлениям: уменьшено обогащение урана ниже 20% с целью удовлетворения международным требованиям по нераспространению ядерных материалов; увеличена тепловая мощность реактора с целью снижения себестоимости вырабатываемой энергии; сокращено количество дорогостоящего бериллия в активной зоне.

Показано, что новый вариант реактора «МАСТЕР» имеет лучшие физические и теплогидравлические характеристики по сравнению с предыдущим вариантом.

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа является продолжением научного исследования [1], которое было направлено на обоснование возможности создания саморегулируемого реактора сверхмалой мощности с длительным сроком непрерывной работы. Среди многих проектов реакторов малой мощности, установка «МАСТЕР» отличается низким давлением в первом контуре охлаждения (0.12 МПа) и реализацией идеи теплопроводной активной зоны, что дает дополнительный барьер безопасности.

В ходе детальной проработки проекта «однотвэльной» установки «МАСТЕР» мощностью 300 кВт стало понятно, что представленный вариант реактора может быть модернизирован для улучшения технических и экономических показателей.

Основные направления усовершенствования установки следующие:

© Ю.А. Казанский, В.А. Левченко, Ю.С. Юрьев, В.А. Баршевцев, В.А. Белугин, С.Л. Дорохович, А.А. Казанцев, А.В. Левченко, Д.М. Титов, 2008

- увеличение тепловой мощности для снижения себестоимости вырабатываемой энергии за счет введения в конструкцию активной зоны дополнительного кольцевого канала охлаждения;
- уменьшение обогащения урана ниже 20% с целью удовлетворения международным требованиям по нераспространению ядерных материалов;
- замена $UBe_{13}+Mg$ -топлива с низкой плотностью на более плотное UO_2 -топливо для уменьшения размеров активной зоны;
- уменьшение содержания Be в активной зоне реактора и отражателе из-за его дороговизны за счет применения алюминиево-бериллиевого (Al-Be) сплава и более тесной решетки твэлов;
- применение диспрозия (Dy) в качестве выгорающего поглотителя с целью пассивной компенсации изменения реактивности в результате выгорания топлива.

При оптимизации характеристик реактора сверхмалой мощности, когда затраты на топливо являются основными, желательно достигнуть максимальных значений двух отношений. Первое (экономическое) – отношение стоимости выработанной энергии к стоимости топлива. Второе (важно для достижения саморегулирования) – отношение выработанной энергии к потере реактивности.

Новый температурный режим позволил использовать оболочки корпуса реактора из нержавеющей стали – материала с худшей теплопроводностью, но намного более надежного при длительной эксплуатации.

Приведенные сравнительные характеристики исходного и усовершенствованного проектов показали существенный прогресс в основных характеристиках реактора.

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ «МАСТЕР»

Принципиальная гидравлическая схема установки «МАСТЕР» представлена на рис. 1.

Установка трехконтурная, состоит из следующих основных агрегатов: корпус реактора, теплообменники 1 и 2, насосы 1 и 2, бак заполнения.

Особенностью данного реактора является размещение в одном прочном корпусе как активной зоны реактора, так и теплообменника первого-второго контуров.

Корпус с активной зоной и теплообменником заполнен водой, которая является теплоносителем первого контура. Циркуляция теплоносителя первого контура

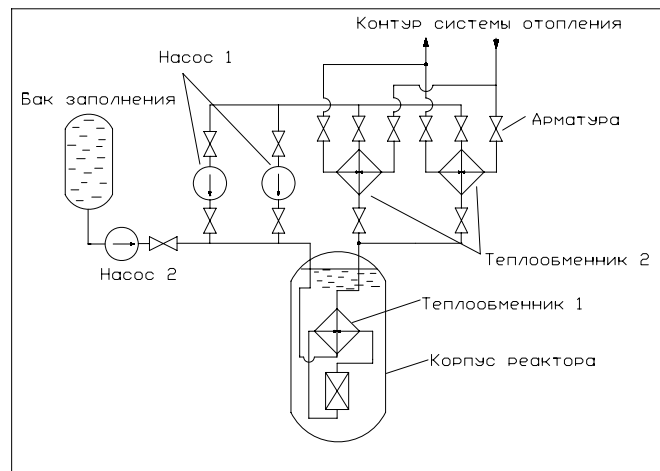


Рис. 1. Принципиальная гидравлическая схема установки «МАСТЕР»

естественная. Съем тепла с теплообменника первого контура осуществляется водой второго контура.

Второй контур образован двумя циркуляционными насосами 1, двумя теплообменниками 2, насосом 2 и баком заполнения. Теплоноситель второго контура – вода. Циркуляция во втором контуре – принудительная. Первый насос 1 и теплообменник 2 работают в основном режиме. Второй насос 1 и теплообменник 2 – в резервном.

Тепловая энергия второго контура передается через теплообменник 2 в контур системы отопления (контур потребителя).

КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ «МАСТЕР»

Конструктивная схема реактора «МАСТЕР» представлена на рис. 2.

В стальном корпусе установки с внешним диаметром 1200 мм, высотой 6100 мм и толщиной 30 мм расположены: активная зона с отражателем, теплоизолирующая обечайка, тяговая труба и теплообменник. Через верхнюю крышку корпуса реактора выведены трубы, подводящие и отводящие теплоноситель 2-го контура.

Активная зона (АЗ) является основным элементом реактора и состоит из двух модулей: внутреннего и внешнего. Внутренний модуль выполнен в виде цилиндра диаметром 286 и высотой 1240 мм. Внешний модуль – в виде цилиндра с внутренним диаметром 336 и внешним диаметром 956 мм. Внешний модуль содержит как часть активной зоны (внешний диаметр 750 мм), так и отражатель толщиной 100 мм из того же Al-Be-сплава. Высота периферийной части АЗ та же, что и центральной. Толщина корпуса АЗ как для внутреннего, так и для внешнего модулей составляет 3 мм.

Состав АЗ был выбран таким образом, чтобы обеспечить контактную теплопроводность, т.к. передача тепла от твэлов к теплоносителю первого контура осуществляется за счет теплопроводности материалов АЗ. Для этого оказалась подходящей следующая композиция: твэлы диаметром 13.5 мм и высотой топлива (UO_2) 1000 мм, расположены внутри Al-Be-матрицы с шагом 18 мм. Для снижения термического сопротивле-

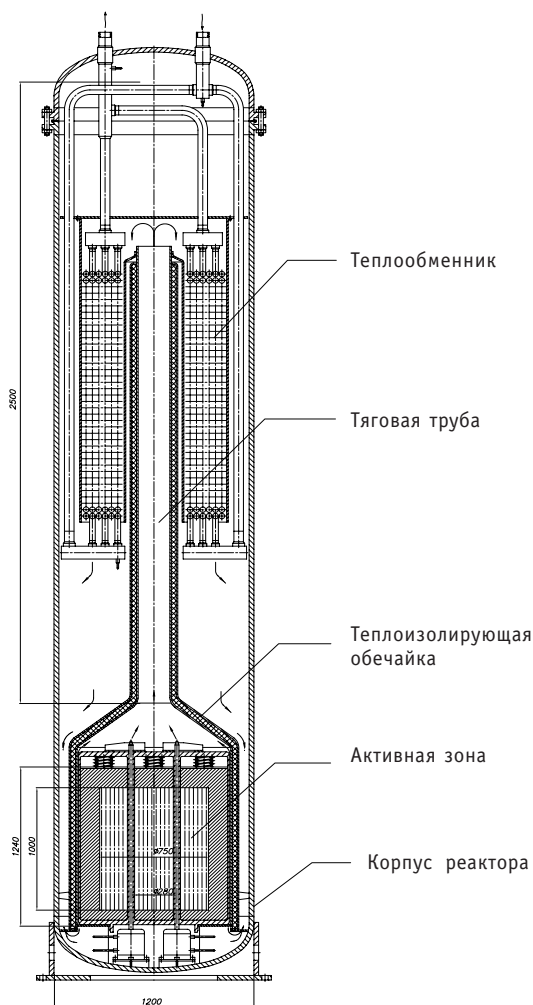


Рис. 2. Конструктивная схема реакторной установки «МАСТЕР»

ния зазоры между топливными таблетками и облочками твэлов, а также между оболочками твэлов и Al-Be-матрицей заполнены гелием.

Между внутренним и внешним модулями АЗ, а также между внешним модулем АЗ и обечайкой находятся кольцевые каналы системы охлаждения первого контура. Размещение внутреннего кольцевого канала и его толщина (25 мм) выбрана таким образом, чтобы теплопроводные матрицы (топливо-замедлитель) имели приблизительно одинаковые распределения температур как во внутреннем, так и во внешнем модулях АЗ реактора. Положение кольцевого канала внутри АЗ и его ширина существенно влияют не только на температурное распределение внутри активной зоны, но и на коэффициент реактивности по температуре теплоносителя. Как показали расчеты, увеличение ширины кольцевого канала приводит к росту коэффициента реактивности по температуре теплоносителя (в конце концов, он становится положительным). Но увеличение ширины кольцевого канала положительно влияет на теплогидравлические характеристики: увеличивается расход естественной циркуляции, что приводит к снижению температуры внутри активной зоны и позволяет увеличить мощность установки.

В зазоре между внешним модулем АЗ и внутренней поверхностью корпуса реактора расположена обечайка, заполненная теплоизолирующим материалом для того, чтобы исключить теплообмен между горячей и холодной ветвями воды первого контура. Над АЗ теплоизолирующая обечайка переходит в тяговую трубу. Высота тягового участка и поверхность теплообменника выбирались таким образом, чтобы не допустить кипения в первом контуре.

Таблица 1

Параметр	Значение
Тепловая мощность	1 МВт
Кампания реактора	60 лет
Высота АЗ	1000 мм
Внешний диаметр центрального модуля АЗ	286 мм
Внутренний диаметр периферийного модуля АЗ	336 мм
Внешний диаметр периферийного модуля АЗ	750 мм
Внешний диаметр периферийного модуля АЗ с отражателем	956 мм
Материал замедлителя и отражателей	Сплав Al(38%)+Be(62%)
Топливо	UO ₂
Масса топлива	1515 кг
Обогащение по ²³⁵ U	17 %
Количество твэлов	1355 шт.
Внешний диаметр твэла	13.5 мм
Толщина оболочки твэла	0.9 мм
Диаметр топлива	11.7 мм
Шаг решетки	18 мм
Материал оболочки твэла	Сплав Zr(99%)+Nb(1%)
Материал корпуса активной зоны и корпуса реактора	Сталь 12X18H10T
Материал внутреннего кольцевого канала охлаждения	Сталь 12X18H10T + 1.6% Dy
Высота тягового участка	2500 мм
Высота теплообменника первого контура	1600 мм

Примечание: состав материалов дан в процентах по массе.

В верхней части корпуса расположена теплообменная поверхность, выполненная из труб в виде змеевиков и объединенных во входном и выходном коллекторах.

Внутренняя часть корпуса реактора заполнена водой, являющейся теплоносителем 1-го контура. В верхней части корпуса оставлен газовый объем для компенсации объемного расширения воды 1-го контура.

Циркуляция теплоносителя в первом контуре реактора осуществляется по следующей схеме. Вода, находящаяся в зазоре между теплоизолирующей обечайкой и внешней поверхностью периферийного блока активной зоны, а также во внутреннем кольцевом канале охлаждения активной зоны нагревается. За счет естественной циркуляции она направляется по тяговой трубе на теплообменную поверхность, где передает тепло воде 2-го контура. Затем охлажденная вода 1-го контура направляется по зазору между корпусом и теплоизоляционной обечайкой на вход в активную зону.

Проведенные оптимизационные расчеты позволили выбрать основные размеры реакторной установки, приведенные в табл. 1. Используя эти геометрические размеры реактора и материалы, были рассчитаны теплогидравлические и нейтронно-физические характеристики реактора.

ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКТОРА «МАСТЕР»

При оптимальном выборе положения и ширины (25 мм) внутреннего кольцевого канала охлаждения, мощности во внутреннем и внешнем модулях активной зоны оказались равными соответственно 255 и 745 кВт. Массовые расходы теплоносителя по кольцевым каналам внутри и снаружи реактора – соответственно 5.9 и 4.1 кг/с; подогревы теплоносителя в каналах – 25 и 23°C.

На рис.3 и 4 показаны радиальное и аксиальные распределения температур для реактора в начале кампании при мощности 1 МВт. Из рисунков видно, что удалось существенно снизить температуру в активной зоне и значительно сократить перепады температур: максимальные температуры во внутреннем и внешнем модулях практически одинаковые (280°C). Следует отметить, что при мощности 1 МВт без кольцевого канала в активной зоне, температура в центре достигает 850°C, а перепад температур около 700°C.

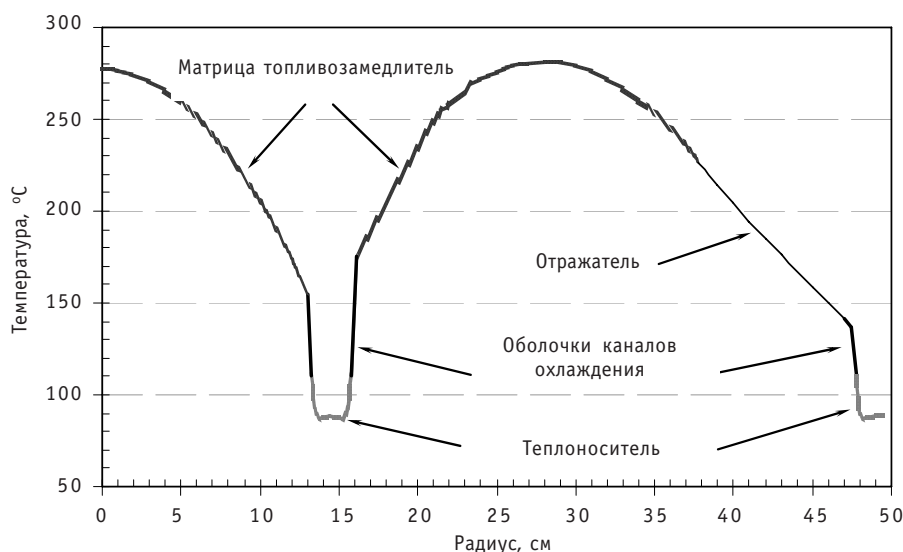


Рис. 3. Распределение температуры по радиусу среднего сечения реактора с двумя кольцевыми каналами охлаждения активной зоны

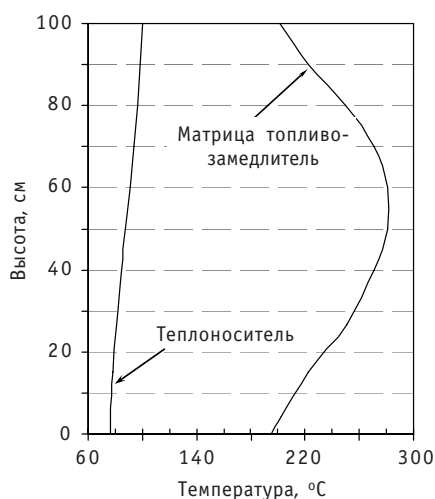


Рис. 4. Распределение температур по высоте активной зоны реактора

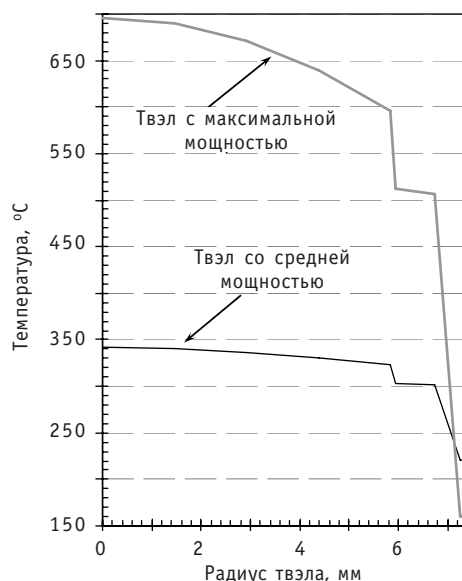


Рис. 5. Распределение температуры по радиусу твэлов в центральной части активной зоны

Распределение температур по высоте активной зоны, как видно на рис. 4, меняется незначительно и не превышает 80°C .

Расчетные теплогидравлические характеристики контуров установки «МАСТЕР» приведены в табл. 2.

Температурные радиальные распределения внутри твэлов, находящихся во внутреннем блоке активной зоны, показаны на рис. 5. Верхняя кривая для твэлов с максимальной мощностью, нижняя кривая – для твэлов со средней мощностью. При проведении расчетов принималось, что величина гелиевого зазора между замедлителем и твэлом составляет 0.5 мм. Твэлы с максимальной мощностью расположены вблизи кольцевого зазора, где температура матрицы замедлителя самая низкая, около 160°C (см. рис. 3), а твэлы со средней мощностью расположены на радиусе около 5 см, где температура матрицы замедлителя примерно 250°C .

Полученные данные позволяют сделать прогноз о возможности увеличения мощности для реактора с двумя теплопроводными блоками и при естественной

Таблица 2

Параметр	Значение
Средняя температура теплоносителя 1-го контура на входе в АЗ	76°C
Средняя температура теплоносителя 1-го контура на выходе из АЗ	100°C
Расход теплоносителя 1-го контура	10 кг/с
Поверхность теплообменника 2-го контура	47 м ²
Средняя температура воды на входе в теплообменник 2-го контура	59°C
Средняя температура воды на выходе из теплообменника 2-го контура	90°C
Расход теплоносителя 2-го контура	7.7 кг/с
Поверхность теплообменника контура потребителя	53 м ²
Средняя температура воды на входе в теплообменник контура потребителя	50°C
Средняя температура воды на выходе из теплообменника контура потребителя	80°C

циркуляции теплоносителя за счет радиального профилирования концентрации топлива и увеличения высоты подъемного участка.

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКТОРА «МАСТЕР»

Расчет эффективного коэффициента размножения, пространственных распределений плотностей потоков нейтронов, пространственного энерговыделения и других характеристик выполнены для начала кампании при разных уровнях мощности с помощью программы MCNP-4C [2], с библиотекой ядерных данных ENDF/B-VI и температурными распределениями, полученными из стационарных теплофизических расчетов.

Плотность потока нейтронов при номинальной мощности в пределах активной зоны реактора изменяется в интервале $(1-1.6) \cdot 10^{13} \text{ н/см}^2 \cdot \text{с}$. Спектр нейтронов достаточно жесткий – более половины нейтронов имеют энергию выше 100 кэВ. Доля тепловых нейтронов настолько мала, что можно пренебречь переходными процессами, обусловленными накоплением ядер ксенона и самария. Равновесное отравление реактора ядрами ксенона не превышает 0.01β .

Флюенсы быстрых нейтронов не достигают критических значений – максимальный флюенс составляет около $2 \cdot 10^{22}$. При таком флюенсе распухание достаточно чувствительного к облучению бериллия составляет всего 0.3%.

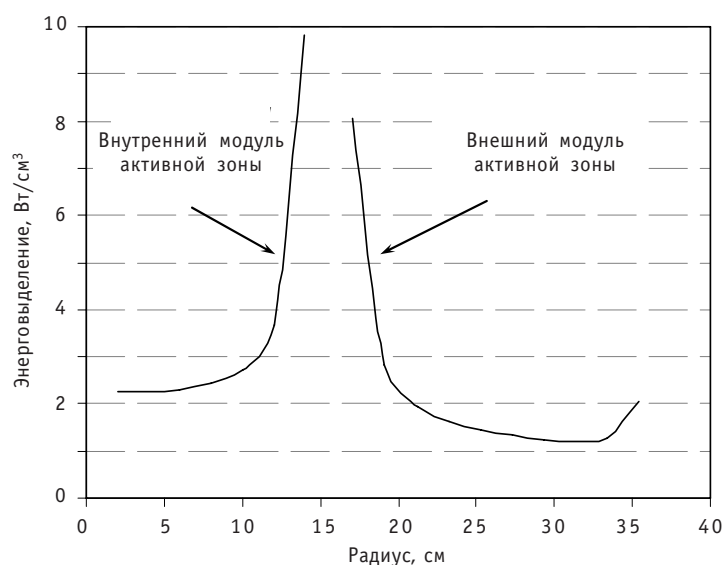


Рис. 6. Распределение энерговыделения по радиусу активной зоны реактора «МАСТЕР»

Распределение энерговыделения по радиусу во внутреннем и внешнем модулях активной зоны реактора показано на рис. 6. Здесь приведены расчеты для конца кампании, т.е. когда выгорающий поглотитель практически выгорел и наблюдается наибольшая неравномерность энерговыделения по радиусу. Существенная радиальная неравномерность энерговыделения связана с расположением внутри теплопроводной активной зоны кольцевого канала с теплоносителем. В дальнейшем намечается изучить возможность уплощения энерговыделения за счет профилирования обогащения топлива в активной зоне.

Отметим низкий уровень энергонапряженности: максимальная энергонапряженность примерно в 20 раз ниже средней энергонапряженности такого реактора, как ВВЭР-1000.

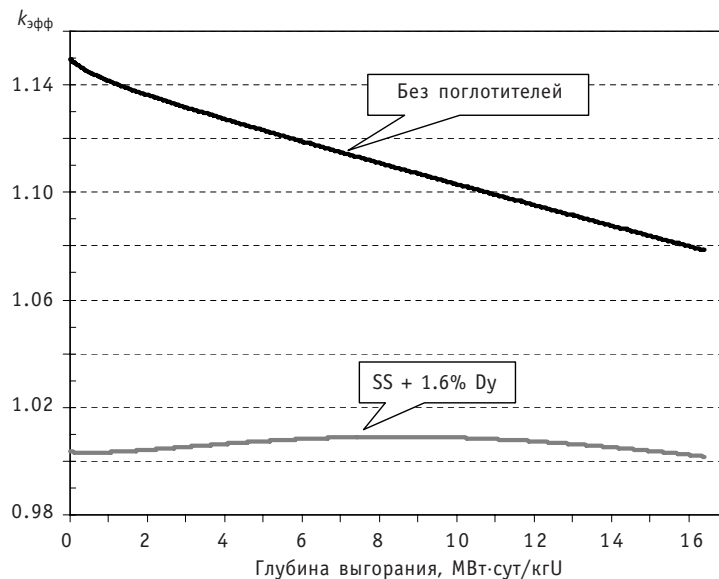


Рис. 7. Зависимость эффективного коэффициента размножения от времени работы реактора для двух случаев: без поглотителя (верхняя кривая) и с диспрозиевым поглотителем, размещенным в стенках внутреннего и внешнего модулей активной зоны

Для расчетов выгорания топлива, а также коэффициентов реактивностей использовалась транспортная программа WIMS-D4 [3] с библиотекой констант ENDF/B-VII [4]. На рис.7 показана зависимость $k_{эфф}$ от выгорания топлива. Верхняя кривая получена при расчете без выгорающего поглотителя в АЗ.

Для компенсации избыточной реактивности в стальную оболочку кольцевого канала охлаждения введен выгорающий поглотитель (естественная смесь изотопов диспрозия). Диспрозий был выбран после вариантных расчетов с различными поглотителями (B, Gd, Er, Eu, Dy). При добавлении 1.6% Dy в стальную оболочку канала начальное значение эффективного коэффициента размножения становится равным 1.0036, а выбег реактивности за время кампании не превышает 0.9% $\Delta k/k$ (нижняя кривая на рис. 7). При этом глубина выгорания за 60 лет работы реактора составляет 16.4 МВт·сут/кгU.

В табл. 3 представлены значения $k_{эфф}$ и коэффициентов реактивности на начало и конец кампании. Температура во всех частях реактора при холодном состоянии одинакова и равна 300 К. Горячее состояние соответствует мощности 1 МВт и температурам, полученным при теплофизических расчетах стационарного состояния.

Таблица 3

Параметр	Начало кампании	Конец кампании
$k_{эфф, хол}$	1.0048	1.0065
$k_{эфф, гор}$	1.0036	1.0018
$\alpha_f, \text{pcm/K}$	-2.0	-3.4
$\alpha_{тепл}, \text{pcm/K}$	14.7	11.4
$\alpha_w, \text{pcm/\%}$	-1.2	-10.5

Примечание:

$\text{pcm} = \frac{(k_2 - k_1)}{(k_2 \times k_1)} \cdot 10^{-5}$; α_f – температурный коэффициент по топливу; $\alpha_{тепл}$ – температурный коэффициент по теплоносителю; α_w – мощностной коэффициент

Приведенные в табл. 3 данные показывают, что реактор обладает отрицательной обратной связью по мощности и температуре топлива. Кроме того, потеря теплоносителя первого контура приводит к уменьшению $k_{эфф}$ на 1% и в холодном и в горячем состояниях, т.е. реактор переходит в подкритическое состояние.

Коэффициент реактивности по температуре теплоносителя оказался положительным. В будущем желательно найти пути уменьшения его значений. Тем не менее, проведенные оценки с использованием программы и методики аналогичной [1] показали, что введение положительной реактивности при увеличении подогрева теплоносителя или входной температуры теплоносителя (аварийное состояние контура потребления: уменьшение расхода или потеря теплоносителя) не приводит к аварийной ситуации, т.к. мощность реактора снижается за счет роста средней температуры активной зоны в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате оптимизации теплогидравлических характеристик за счет введения кольцевого канала теплоносителя в активную зону, а также изменения конструкции теплообменника первого контура, высоты подъемного участка, изменения химического состава топлива, мощность реактора увеличена втрое, т.е. повышена до 1 МВт. Перечисленные изменения позволили существенно улучшить температурные распределения в активной зоне реактора. В частности, снижена температура топлива почти на 100°C и выровнены температуры во внутреннем и внешнем модулях активной зоны (ранее различие в максимальных температурах достигало 200°C).

В табл. 4 приводятся сравнительные характеристики первоначального проекта «МАСТЕР» мощностью 300 кВт, который был назван «однотвэльный» с усовершенствованным реактором мощностью 1 МВт. Видно, что усовершенствованный вариант имеет значительные преимущества, сохраняя все положительные особенности реактора с теплопроводной зоной, естественной циркуляцией теплоносителя и допустимым с позиций нераспространения уровнем обогащения урана.

Таблица 4

Параметр	«Однотвэльный»	«Усовершенствованный»
Мощность	300 кВт	1 МВт
Диаметр активной зоны	1.02 м	0.75 м
Высота активной зоны	1.6 м	1.0 м
Объем активной зоны	1.31 м ³	0.44 м ³
Топливо	UBe ₁₃ +Mg	UO ₂
Обогащение урана	40%	17%
Масса урана	502 кг	1122 кг
Масса ²³⁵ U	201 кг	191 кг
Масса Be	3362 кг	509 кг
$k_{эфф}$ в начале кампании	1.4018	1.0036
Глубина выгорания топлива	13.1 МВт·сут./кг	16.4 МВт·сут./кг
Максимальная температура замедлителя в АЗ	650°C	275°C

В работе [5] для реакторов сверхмалой мощности введено понятие «эффективность использования топлива», которое определяется как отношение стоимости выработанной энергии к стоимости топлива, γ . Этот показатель имеет определяющую

щие значения в тех случаях, когда стоимость топлива в капитальных затратах превалирует. Этот показатель для усовершенствованного реактора превышает аналогичный более чем вдвое и достигает 5.7.

В статье приведены результаты научно-исследовательской работы, выполненной при финансовой поддержке гранта РФФИ 05-02-08030-офи_э.

Литература

1. Казанский Ю.А., Левченко В.А., Матусевич Е.С., Юрьев Ю.С. и др. Саморегулируемый реактор сверхмалой мощности для теплоснабжения – «МАСТЕР ИАТЭ» // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2003. – № 3. – С. 63.
2. Judith F. Briesmeister MCNP (A General Monte Carlo N-Particle Transport Code) Users Manual, Los Alamos National Laboratory Report, LA-13709-M, Version 4C UC 700 (April 10, 2000).
3. Winfrith Improved Multigroup Scheme Code System (WIMS-D4), C00576, Radiation Safety Information Computational Center (RSICC), ORNL, USA, 1991.
4. Final report of a coordinated research project WIMS-D Library Update IAEA, Decemder 2003.
5. Иванов В.В., Казанский Ю.А., Левченко В.А. Реактор теплоснабжения сверхмалой мощности «Мастер»: условия экономической целесообразности / Тезисы докладов Международной научно-практической конференции «Малая энергетика 2006». – М., 2006. – С. 85.

Поступила в редакцию 5.02.2007