

АВТОНОМНАЯ ТЕРМОЭМИССИОННАЯ ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ МОРСКИХ ГАЗО- И НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ ПЛАТФОРМ

А.Д. Кротов*, Г.Э. Лазаренко*, М.К. Овчаренко*, А.П. Пышко*,
А.В. Сонько*, В.И. Ярыгин*, Д.Г. Лазаренко**

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

*** Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск*



Обсуждается проект ядерной энергетической установки (ЯЭУ) прямого преобразования тепловой энергии в электрическую с выходной электрической мощностью 1–5 МВт, размещаемой на морской платформе в качестве основного или резервного источника энергоснабжения. Особенностью ЯЭУ является использование термоэмиссионного рабочего процесса преобразования энергии с к.п.д. 15–20% при температуре эмиттера ~1600 К и коллектора ~700 К.

Ключевые слова: методы прямого преобразования энергии, термоэмиссия, ЯЭУ.
Key words: methods of direct energy conversion, termionic, concept of NPP.

ВВЕДЕНИЕ

Автономное электроснабжение промышленных объектов ОАО «ГАЗПРОМ» осуществляется с помощью газопоршневых и дизельных генераторов с установленной мощностью до 2 МВт и ресурсом до 10-ти лет. В настоящее время Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» рассматривает возможность использования своего технологического и промышленного потенциала в нефтегазовой отрасли. Согласно соглашению «ГАЗПРОМ-Росатом» от 16.12.2008 г., компании планируют сотрудничать в освоении морских и шельфовых углеводородных месторождений. В соглашении предполагается сотрудничество в сфере энергообеспечения газотранспортных сетей, а также совместная разработка конкурентоспособной продукции для разведки, добычи, транспортировки, хранения, переработки природного газа и газового конденсата.

В ГНЦ РФ-ФЭИ разработаны низкотемпературные термоэмиссионные преобразователи (ТЭП) с высокоэффективными электродными материалами и газодинамической подачей цезия [1]. В ходе испытаний на стендах с электронагревом при температуре эмиттера $T_E \leq 1600$ К и $T_C \sim 700$ К было достигнуто значение к.п.д. 18–22% при средней плотности генерируемой электрической мощности $W_{эл} \leq 1$ Вт/см². Выполненные экспериментальные исследования позволили создать новую технологическую платформу высокоэффективных низкотемпературных ТЭП. На базе новой технологической платформы в ГНЦ РФ-ФЭИ с 2005 г. ведутся проектные рабо-

© А.Д. Кротов, Г.Э. Лазаренко, М.К. Овчаренко, А.П. Пышко, А.В. Сонько, В.И. Ярыгин,
Д.Г. Лазаренко, 2011

ты по созданию термоэмиссионной ЯЭУ для атомной станции теплоэлектроснабжения [2]. В термоэмиссионной ЯЭУ использован водо-водяной реактор бассейнового типа (прототип – исследовательские реакторы серии ИРТ) со встроенной в активную зону (а.з.) термоэмиссионной электрогенерирующей системой (ТЭС). Отвод непреобразованного тепла из а.з. к теплообменникам теплофикационного контура осуществляется естественной циркуляцией теплоносителя. Тепловая мощность реактора составляет 10 МВт, оцененная электрическая – 2 МВт.

В статье обсуждается развитие концепции атомной станции прямого преобразования энергии АИСТ-МП с выходной электрической мощностью 2 МВт применительно к размещению на морской платформе (МП). Отличительной особенностью рассматриваемого варианта исполнения ЯЭУ является отсутствие второго контура охлаждения. Отвод непреобразованного тепла осуществляется непосредственно через стенку корпуса в водную (морскую) среду.

ИНТЕГРАЦИЯ ЯЭУ АИСТ-МП В СОСТАВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ МОРСКИХ ПЛАТФОРМ ШТОКМАНОВСКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Среди широкого спектра возможных применений ядерных технологий для нужд ОАО «ГАЗПРОМ» и других производственных структур газо- и нефтедобычи и транспортировки углеводородов наиболее привлекательной представляется ЯЭУ прямого преобразования тепловой энергии в электрическую для нужд освоения Штокмановского газоконденсатного месторождения, проект освоения которого находится в стадии активной разработки и поиска оптимальных технических решений, в том числе по энергообеспечению МП различных типов.

МП состоит из опорной части и верхнего строения, в состав которого входит энергетический комплекс, обеспечивающий энергией и теплом технологические процессы, жилой комплекс и комплекс жизнеобеспечения. Основные технические требования к энергетическому комплексу и составу его оборудования включают в себя обеспечение режимов работы МП, ее оборудования и персонала электроэнергией и теплом. Энергетический комплекс обеспечивает следующие режимы работы МП: бурение нефтегазовых скважин, бурение и одновременная добыча нефти и газа, бурение, добыча и транспортировка нефти и газа, добыча нефти и газа, добыча и транспортировка нефти и газа, аварийный режим работы, учитывающий отключение основного энергоисточника. В качестве источников тепла обычно используются утилизационные котлы, устанавливаемые на газоотводах дизелей и турбин.

Важной особенностью проекта освоения Штокмановского месторождения является его гибкость по отношению к необходимости изменений в технологической инфраструктуре на различных этапах разработки и эксплуатации.

В технологическую инфраструктуру месторождения, для которой необходимы энергоисточники с установленной электрической мощностью до 2 МВт, хорошо вписываются малые автономные ЯЭУ. Особенно привлекательны ЯЭУ с внутризонной ТЭС как обладающие высокой компактностью и простотой в обслуживании. Специализированная ЯЭУ малой мощности с термоэмиссионным генерированием электроэнергии, предназначенная для работы в качестве автономного энергоисточника МП, получила обозначение АИСТ-МП.

КОНЦЕПЦИЯ ТЕРМОЭМИССИОННОЙ ЯЭУ АИСТ-МП

В проекте ЯЭУ АИСТ-МП предусматривается использование водо-водяного реактора бассейнового типа с естественной циркуляцией теплоносителя. Была принята следующая конструктивно-компоновочная схема рассматриваемой ЯЭУ. Ос-

новная часть АИСТ-МП – ядерно-энергетический блок (ЯЭБ) – размещена в прочном корпусе под агрегатным отсеком (АО), в котором размещается аппаратура системы автоматического управления (САУ).

Радиационная обстановка вокруг ЯЭУ в рабочем положении определяется требованиями к допустимым уровням излучения в дозовой поверхности, совпадающей с внешней поверхностью корпуса. Особо чувствительная к радиации радиоэлектронная аппаратура в АО защищается локальными защитами.

Активная зона (а.з.) реактора набрана из электрогенерирующих сборок (ЭГС), размещенных в гексагональной упаковке, и по периметру ограничена корзиной реактора. Нижние хвостовики ЭГС размещены в опорной решетке, покрывающей напорный коллектор охлаждающего теплоносителя в форме граненого стакана с отверстиями в боковых гранях для пропуска теплоносителя. Коллектор стоит в поддоне для сбора расплава из компонентов ЭГС, образующихся при запроектной аварии реактора с расплавлением а.з.

Верхние хвостовики ЭГС соединены с технологическими штангами, содержащими трубопроводы цезиевой (межэлектродная среда) и вакуумной систем, а также токонесущие шины. Технологические штанги выведены выше уровня теплоносителя и шестью пакетами заведены в коммутационные доски. На внешней поверхности штанг имеются (по крайней мере, на двух уровнях по высоте) шестигранные приливы, примыкающие друг к другу, для организации подъемного течения теплоносителя и захватные головки для проведения операций по перегрузке а.з. Выше поверхности бассейна выведены приводы органов регулирования и аварийной защиты. Бак реактора имеет цилиндрическую форму (диаметр 4,5 м, высота 10,6 м) и выполнен из листовой стали толщиной 3 мм. Активная зона погружена в теплоноситель на глубину около 7 м, тем самым обеспечивается биологическая защита персонала при посещении приборного отсека. Охлаждение а.з. осуществляется за счет естественной циркуляции теплоносителя внутри бака реактора.

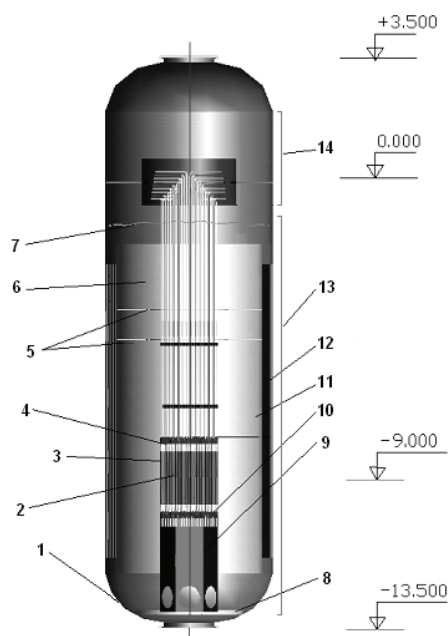


Рис. 1. Конструктивно-компоновочная схема ЯЭУ АИСТ-МП: 1 – корпус ЯЭУ; 2 – активная зона; 3 – корзина активной зоны; 4 – хвостовики ЭГК; 5 – горизонтальные перегородки; 6 – теплоноситель; 7 – уровень теплоносителя; 8 – поддон; 9 – коллектор; 10 – трубная решетка; 11 – кольцевая перегородка; 12 – теплообменник; 13 – реакторный отсек; 14 – агрегатный отсек

Отвод непреобразованного тепла осуществляется через стенку корпуса реактора к заборной воде от теплоносителя, опускающегося по кольцевому проходу между корпусом реактора и вставленной в него цилиндрической обечайкой. На подъемной ветви контура теплоносителя выше а. з. размещены горизонтальные перегородки, замедляющие выход теплоносителя на поверхность бака реактора после прохождения им а.з., что необходимо для обеспечения нормальной радиационной обстановки в АО.

Для регулирования реактора предусмотрены семь органов регулирования (РО СУЗ) в виде стержней с поглощающим материалом из карбида бора с естественным изотопным составом.

Схема ЯЭУ АИСТ-МП приведена на рис. 1, технические характеристики – в табл. 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики ЯЭУ АИСТ-МП

Параметр или характеристика	Размерность	Значение
Габариты ЯЭУ:		
- максимальный диаметр корпуса ЯЭУ, не более	мм	4500
- осевой габарит ЯЭБ, не более	мм	14000
Масса транспортная (без теплоносителя), не более	кг	20000
Продолжительность кампании, не менее	лет	30
Полезная электрическая мощность, не менее	кВт	2000
Электрическая мощность	кВт	2400
Тепловая мощность, не более	кВт	8000
Рассеиваемая тепловая мощность	кВт	6000
Напряжение на клеммах ЭГС	В	120
Допустимые уровни ионизирующих излучений на АО:		
- флюенс нейтронов с энергией > 0,1 МэВ, не более	н/см ² рад	1·10 ¹²
- поглощенная доза фотонов		1·10 ⁶
Температура теплоносителя на выходе а.з., не более	°С	90

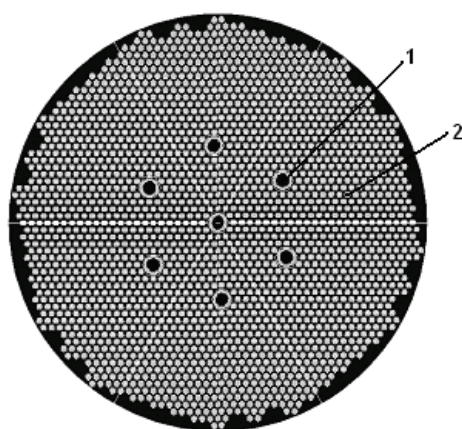


Рис. 2. Поперечное сечение а.з. ЯЭУ АИСТ-МП: 1 – РО СУЗ; 2 – ЭГС

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКТОРА-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЯЭУ АИСТ-МП

Рассматривался реактор с тепловым спектром нейтронов, водой в качестве теплоносителя и замедлителя, с охлаждением а.з. за счет естественной циркуляции. В качестве теплоносителя, замедлителя, бокового и торцевых отражателей используется вода. Приведенный диаметр а.з. – 142,5 см, высота а.з. – 149,5 см. Поперечное сечение а.з. приведено на рис. 2.

Активная зона набрана из 306 ЭГС. Каждая ЭГС включает в себя по 105 термоэмиссионных электрогенерирующих элементов (ЭГЭ), размещенных по семь штук на 15-ти

уровнях по высоте, разделенных коммутационными промежутками высотой 2 см. Высота каждого ЭГЭ – 8,1 см.

Суммарное количество ЭГЭ в реакторе – 32130 шт. Общая эмиссионная поверхность составляет 158,6 м². Диаметр ЭГЭ – 2,4 см. ЭГЭ расположены в узлах правильной треугольной решетки с шагом 3,0 см.

В качестве топливной композиции используется диоксид урана плотностью 10,4 г/см³ с обогащением по урану-235 4,4%. Загрузка урана-235 составляет 159,6 кг. Загрузка диоксида урана – 4160 кг. Топливная композиция занимает 65% объема эмиттерного узла. Продолжительность кампании обеспечивается введением композиции из выгорающих поглотителей. Основные характеристики реактора приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные технические характеристики реактора

Характеристика	Размерность	Значение
Загрузка урана-235	кг	159,6
Обогащение по урану-235	%	4,4
Площадь эмиссионной поверхности ТРП	м ²	158,6
Шаг решетки ЭГЭ	мм	30
Количество сборок в реакторе	шт.	306
Количество ЭГЭ в сборке	шт.	105
Количество ЭГЭ в реакторе	шт.	32130
Высота а.з.	см	149,5
Приведенный диаметр а.з.	см	142,5

ТЕРМОЭМИССИОННАЯ ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЮЩАЯ СИСТЕМА ЯЭУ АИСТ-МП

ТЭС ЯЭУ АИСТ-МП состоит из 306 ЭГС, конструктивно объединяющих базовые элементы – ЭГЭ – в более крупные сборочные единицы. Вторая функция ЭГС – последовательная электрическая коммутация ЭГЭ с целью максимального увеличения выходного напряжения и снижения величины генерируемого тока для уменьшения омических потерь в токопроводах и коммутационных шинах. Соединение ЭГЭ в ЭГС схематически представлено на рис. 3.

Как следует из рис. 3, ЭГЭ в ЭГС объединены в 15 поясов по семь ЭГЭ в каждом. Количество ЭГЭ в поясе выбрано равным семи для того, чтобы обеспечить ввод тока в пояс по одному торцу, а вывод тока – по другому, что позволяет соединять пояса напрямую, без дополнительных токонесущих шин. В пределах каждого пояса



Рис. 3. ТЭС ЯЭУ АИСТ-МП: а) – вид сбоку; б) – сечение:
1 – пояса ЭГЭ, 2 – хвостовики с тоководами,
3 – периферийный ЭГЭ, 4 – центральный ЭГЭ,
5 – коммутационные перемычки

ЭГЭ соединены последовательно перемычками (три внизу, три вверху и одна радиальная). Указанная схема соединений позволяет получить на клеммах ЭГС выходное напряжение порядка 120 В.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДИКИ

При обосновании характеристик ЯЭУ АИСТ-МП были использованы следующие методики, коды и программные комплексы:

- для расчета электротеплофизических и гидравлических характеристик – методы и коды, разработанные авторами статьи [3];
- для расчета нейтронно-физических характеристик – программный комплекс MCNP [4] с системой констант ENDF/B-VI;
- для расчета ресурсных изменений реактивности – программные комплексы MCNP, ORIGEN2 [5] и Monteburns [6];
- расчет характеристик радиационной защиты – программные комплексы MCNP и КАСКАД [7].

ОСОБЕННОСТИ И ПРЕИМУЩЕСТВА ЯЭУ АИСТ-МП

Рассматриваемая ЯЭУ АИСТ-МП в полной мере отвечает требованиям МАГАТЭ по физической защите, причем в нашем случае целесообразно использовать для физической защиты АИСТ-МП бетонные полости в кессонах морских платформ. Для обеспечения охлаждения ЯЭУ забортной водой эти полости должны быть снабжены отверстиями для организации её естественной циркуляции и, тем самым, выноса тепла из кессона в окружающую морскую среду.

Кроме того, отсутствие подвижных электрогенерирующих и охлаждающих технических систем, взрыво- и пожаробезопасность, относительная простота монтажа ЯЭУ в состоянии заводской готовности и отсутствие эксплуатационного обслуживающего персонала АИСТ-МП, работающей в режиме «ядерной батарейки», создают предпосылки для высокой рентабельности установки. Согласно нашим предварительным оценкам, ожидаемая стоимость ЯЭУ без учета остаточной стоимости а.з. и корпуса (металлолома) не превысит 100 млн. долларов США, а себестоимость генерируемой электрической энергии – 0,3 дол. США/кВт-ч.

Простое устройство реактора, отсутствие турбогенераторов, циркуляционных насосов, несущего давление корпуса, применение дешевого теплоносителя (воды), незначительное количество активируемых конструкционных материалов, относительная компактность установки в целом, а также небольшой объем строительных работ делают ЯЭУ привлекательной не только с технической, но и с экономической точек зрения.

ЯЭУ обладает высоким уровнем безопасности, в большей степени основанной на свойствах внутренней самозащищенности и пассивной безопасности. Данное требование реализовано в ЯЭУ использованием достаточно простой, но в тоже время надежной конструкции. Более того, устройство а.з. и продолжительная бесперегрузочная кампания (до 30-ти лет) позволяют решить вопросы нераспространения делящихся материалов.

Экспортный потенциал обеспечивается применением топлива с обогащением ниже 20% по урану-235, что соответствует рекомендациям МАГАТЭ по режиму нераспространения. АИСТ-МП имеет обогащение по урану-235 4,4% и, следовательно, удовлетворяет данному требованию.

Объем строительно-монтажных работ при сооружении АИСТ-МП незначителен и выполняется без привлечения специального оборудования и техники. Наиболее крупным узлом является корпус ЯЭУ, однако его массогабаритные характери-

стики допускают транспортировку любым (в том числе авиационным) транспортом. Все оборудование изготавливается на заводах и поставляется в виде готового к монтажу комплекта. Время монтажа ЯЭУ в составе МП оценивается в срок до трех месяцев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокотехнологичный проект освоения Штокмановского газоконденсатного месторождения, ориентированный на использование передовых, в первую очередь, отечественных технологий и разработок, открывает широкие перспективы по использованию малых ядерных энергетических установок в качестве источников электро- и теплоснабжения комплекса сооружений морского газового промысла.

Выполненное обоснование ЯЭУ АИСТ-МП с внутризонной термоэмиссионной электрогенерирующей системой подтвердило ряд привлекательных особенностей по сравнению с известными проектами малых АЭС на основе турбомашинного способа преобразования энергии по безопасности, надежности, простоте монтажа и обслуживания, экологии, экономической привлекательности. Отсутствие машинного зала с турбогенераторными установками значительно уменьшает объем регламентных работ и позволяет рассматривать полностью автоматический режим управления без сменного обслуживающего персонала.

ЯЭУ АИСТ-МП на основе системы прямого преобразования тепловой энергии в электричество с выходной электрической мощностью в диапазоне 1–5 МВт с реактором бассейнового типа, ориентированная на интеграцию в состав технологического и энергетического оборудования морских платформ Штокмановского газоконденсатного месторождения, по мнению авторов и экспертов ОАО «ГАЗПРОМ», может быть рекомендована к практической реализации в краткосрочной перспективе.

Литература

1. Ярыгин В.И., Сидельников В.Н., Касиков И.И. и др. Экспериментальное изучение возможности образования конденсата возбужденных состояний вещества (ридберговской материи)//Письма в ЖЭТФ. – 2003. – Т. 77. – Вып. 6. – С. 330 – 334.
2. Yarygin V.I., Lazarenko G.E., Mironov V.S. et al. Concept of Direct Energy Conversion Nuclear Cogeneration Plant/Proc. of ICAPP08 Anaheim, CA USA, June 8-12, 2008, paper 8193.
3. Виноградов Е.Г., Линник В.А., Лазаренко Д.Г. и др. Методика расчета вольт-амперных характеристик термоэмиссионных ЭГК сложной геометрии//Атомная энергия. – 2009. – Т. 106. – Вып. 5. – С. 257 – 262.
4. Briesmeister J. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B// LA-12625-M, 1997.
5. Groff A.G. ORIGEN2 – a revised and updated version of the Oak Ridge isotope generation and depletion code//ORNL, Oak Ridge, Tennessee, 37830.
6. Trellue H.R. Development of MonteBurns: a Code that Links MCNP and ORIGEN2 in an Automated Fashion for Burnup Calculations//Los Alamos National Laboratory document LA-13514-T, 1998.
7. Волощенко А.М., Швецов А.В. КАСКАД-1.5 – программа для решения уравнения переноса нейтронов, фотонов и заряженного излучения в двумерных геометриях/Сборник тезисов докладов VII Российской научной конференции «Защита от ионизирующих излучений ядерно-технических установок» (Обнинск, 22-25 сентября 1998 г.). – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1998. – С. 62 – 64.

Поступила в редакцию 9.03.2011

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.51

Burnout Calculation in Complicated Geometry Region with Strong Absorption by First-flight Collision Probabilities Method \T.Yu. Karpushkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 7 pages, 4 illustrations. – References, 6 titles.

A recovery method of first-flight collision probabilities matrixes in burnout process using average chords calculated for some states by stochastic neutron rays is presented. The calculation of infinite neutron breeding factor for transport reactor assembly in burnout process of materials using this method and comparison with calculation by other methods and programs is presented.

УДК 621.039.51

Option of IVG.1M Reactor Modernization with Partial Replacement of Process Channels \V. Kotov, I. Prozorova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 1 table, 6 illustrations. – References, 4 titles.

Treatments of mixed core usage including installation of not complete set of new process channels in reactor but only parts of them are stated. It is shown that partial reactor channel replacement allows reactor upgrading and enhancing its functional capabilities.

УДК 621.039.5: 621.362

Self-Contained Thermionic Nuclear Power Plant for Offshore Gas and Oil Production Platforms \A.D. Krotov, G.E. Lazarenko, M.K. Ovcharenko, A.P. Pyshko, A.V. Sonko, V.I. Yarygin, D.G. Lazarenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 7 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References, 7 titles.

The reactor unit for direct conversion of thermal energy into electrical energy with the electrical output between 1-5 MW oriented onto integration into equipment for offshore platforms have been discussed. A distinguishing feature of the reactor unit is the use of a thermionic conversion process with the thermodynamic cycle upper temperature of ~1600 K and lower temperature of ~700 K with the efficiency 15-20%.

УДК 621.039.519

Tests of SM Reactor Experimental Fuel Assemblies with Increased Uranium Load \V.A. Starkov, M.N. Svyatkin, A.V. Klinov, A.P. Malkov, V.E. Fedoseev, A.L. Petelin, Yu.B. Chertkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 1 table, 9 illustrations. – References, 8 titles.

This paper presents the results of determination of power density and burnup distribution throughout the sections of three experimental fuel assemblies with increased uranium content in the rods (6g U235), obtained under calculated and experimental simulation of their operation conditions in the SM research reactor core. The mode of these distributions change during irradiation is analyzed. Thermal physic parameters of experimental FA rod operation are examined. The essential controlled tested parameters are given. It is shown that the reactor FA with increased fuel load stood well the total cycle of the reactor tests retaining its operational integrity under energy release, thermal load and fuel burnup appropriate to operational conditions of the modernized reactor core.