

УДК 621.039.5

## ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТВЭЛОВ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ В ИГР

Котов В.М., Жанболатов О.М., Сулейменов Н.А.

*Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

В работе рассмотрены вопросы обеспечения представительных экспериментов с твэлами быстрых реакторов в центральном экспериментальном канале теплового импульсного реактора ИГР. Проведенные ранее расчеты показали возможность получения достаточно интенсивного поля быстрых нейтронов в ИГР с помощью конверторов различной конструкции. Для перехода к таким испытаниям твэлов быстрых реакторов в ИГР необходимо экспериментальное обоснование расчетных исследований. Предложено провести экспериментальное обоснование с использованием набора двух типов твэлов, один из которых работает в тепловом спектре нейтронов, другой в спектре нейтронов, полученном с помощью конвертора. Разработана конструкция такого экспериментального устройства, рассчитаны характеристики его работы. Проведено обоснование безопасности его испытаний в ИГР.

### ВВЕДЕНИЕ

Реактор ИГР [1] эксплуатируется более 50 лет. С его помощью были испытаны многие инновационные тепловыделяющие сборки атомной энергетики, исследованы характеристики различных процессов и технологий, в том числе аварийные ситуации на различных типах реакторов.

Со временем существенно совершенствовалась методология подготовки и проведения пусков реактора на основе развития понимания процессов, происходящих в реакторе, появления эффективных программ расчетов нейтронно-физических и теплофизических характеристик как объектов исследований, так и самого реактора.

ИГР является тепловым импульсным реактором. Высокое значение достижимого в нем потока нейтронов и энерговыделения в одном пуске позволяют проводить рекордные испытания для многих образцов реакторной техники. Однако, тепловой спектр нейтронов реактора ограничивает эти возможности для объектов быстрых реакторов. Проведенные исследования показали возможность создания области с быстрым спектром нейтронов в центральном канале реактора, во многом снимающую это ограничение.

Эти исследования основаны на использовании современных расчетных программ. Для представительного подтверждения возможностей испытаний твэлов быстрых реакторов необходимо проведение экспериментальных работ.

В данной работе представлены результаты подготовки исследовательского пуска с одновременно работающими твэлами с тепловым и быстрым спектрами нейтронов. Такая схема эксперимента позволяет провести комплексную проверку использованных нейтронно-физических и теплофизических программ расчета. В ходе проведения расчетов были выявлены эффекты, обеспечивающие возможность совершенствования технологии проведения пусков ИГР.

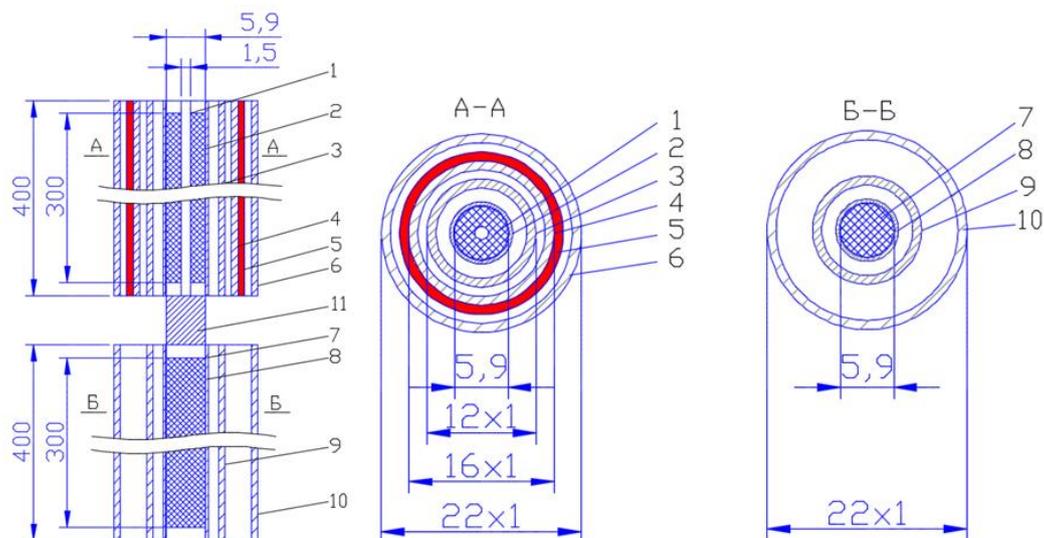
### 1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СБОРКА

Проведение экспериментов на ИГР с твэлами быстрого реактора является затруднительным, так как поток тепловых нейтронов не адекватен быстрым нейтронам по воздействию на материалы топлива. В частности, в случае облучения твэлов тепловыми нейтронами проявляются эффекты блокировки, вследствие чего равномерное радиальное энерговыделение в твэлах, присущее твэлам быстрых реакторов, становится невозможным.

В результате многочисленных расчетов в обоснование конструкции устройства, обеспечивающей достижение требуемых параметров в ходе реакторных испытаний, предложена конструкция испытательной секции конвертора [2–5]. Нейтронно-физические расчеты обеспечивали получение данных о спектре нейтронов в центральной области конвертора, распределении потока нейтронов в испытываемом твэле, в поглотителе тепловых нейтронов и во внешней области конвертора. Теплофизические расчеты обеспечивали получение данных о температурном поле в твэле и элементах самого конвертора при заданных расходах теплоносителей, омывающих эти элементы.

Необходимость использования многочисленных программ, обеспечивающих получение полного набора данных о работе конвертора, вызывает снижение доверия к точности окончательных параметров. Для решения проблемы необходим представительный эксперимент.

Идея такого эксперимента заключается в одновременном испытании двух тепловыделяющих сборок с близкими значениями мощности, одна из которых работает на тепловых нейтронах, другая на быстрых с использованием конвертора. В этом случае проверяются, как минимум, результаты нейтронно-физических расчетов - путем измерения энерговыделения в сборках, теплофизических расчетов – путем измерения полей температур в твэлахборок и иных элементах.



1 – топливо 17%; 2 – оболочка «быстрого» твэла; 3 – рубашка охлаждения «быстрого» твэла; 4 – тепловой экран; 5 – кадмиевый поглотитель; 6 – корпус теплового твэла; 7 – топливо 0,27%; 8 – оболочка теплового твэла; 9 – рубашка охлаждения теплового твэла; 10 – корпус теплового твэла, 11 – фиксатор

Рисунок 1. Эскиз конструкции испытательной секции

Для реализации такой задачи предложено установить тепловыделяющие сборки с твэлами различного содержания  $^{235}\text{U}$  на различных высотах в центральном экспериментальном канале реактора. Сборка с конвертором устанавливается в верхней части активной зоны, а сборка без конвертора в нижней части активной зоны. В сборке с конвертором необходимо использовать твэлы с большим содержанием делящихся веществ. Из имеющихся твэлов для конвертора были выбраны твэлы с содержанием  $^{235}\text{U}$  17%, для сборки без конвертора твэлы с содержанием  $^{235}\text{U}$  0,27%.

На основании нейтронно-физических расчетов вариантов размещения сборок на различных высотах была установлена оптимальная геометрия размещения сборок, обеспечивающая равенство энерговыделения в них.

На рисунке 1 представлены геометрия и размеры элементов предлагаемого экспериментального устройства. Поглотитель нейтронов конвертора выполнен из листового кадмия. Низкая температура плавления кадмия потребовала введения тракта его охлаждения. Тракты теплоносителя тепловыделяющих сборок раздельные с идентичной геометрией по газовому потоку.

Твэлы обеих сборок набираются из топливных таблеток типа БН-350, высота топливного столба в обоих твэлах одинакова и равна 300 мм. Топливные таблетки из диоксида урана расположены в оболочке, которая представляет собой трубку с размерами  $6,9 \times 0,4$  мм, выполненную из стали X16H15M3Б. С торцов твэлы закрываются заглушками. Центр верхнего твэла находится на высоте +800 мм относительно центра активной зоны, середина нижнего твэла совпадает с центром активной зоны.

## 2 НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ КОНВЕРТОРА

При проведении нейтронно-физических расчетов использовалась модель реактора ИГР [6], детально описывающая его конструкцию, и учитывающая реальное распределение концентрации урана в объеме активной зоны. Расчеты выполнялись с использованием расчетного кода MCNP5 [7] с библиотеками ядерных констант и сечений ENDF/B-VII.

Вычисления выполнялись для холодного (температура графитовой кладки реактора 294 К) и ряда горячих состояний реактора в диапазоне температур 400–1200 К. Учитывалось влияние разогрева графитовой кладки и положения стержней регулирования на распределение энерговыделения в объеме реактора и испытываемого экспериментального устройства. В таблице 1 представлена мощность твэлов, рассчитанная для различных температур активной зоны, при мощности реактора 1 МВт.

Расчеты показывают, что при возрастании температуры активной зоны ИГР от 294 до 1200 К мощность конверторного (быстрого) твэла снижается на 9,56%, а мощность теплового увеличивается на 12,47%. Изменение мощности теплового твэла согласуется с эффектом просветления кладки [8], но с различием в численной величине эффекта.

Расчитаны спектры нейтронов и энерговыделения в этих твэлах для различных энергий нейтронов. Зависимости энерговыделений в твэлах от энергии нейтронов для холодной кладки реактора представлены на рисунке 2. Заметно смещение энерговыделения в сторону высоких энергий для твэла, установленного в конвертор.

Таблица 1. Мощности реактора и твэлов при различных состояниях активной зоны ИГР

Температура АЗ, К	294	400	500	600	700	800	1000	1200
Мощность реактора, МВт	1							
Мощность быстрого твэла, Вт	14,90	14,79	14,68	14	13,82	13,74	13,6	13,6
Мощность теплового твэла, Вт	14,19	14,81	15,16	15,66	16,1	16,75	17,7	17,7

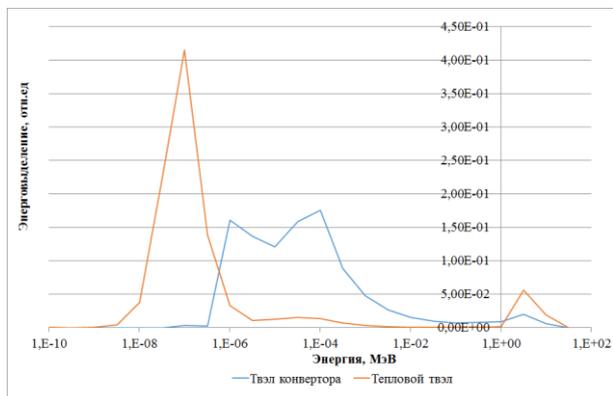


Рисунок 2. Зависимости энерговыделения от энергии нейтронов в твэлах

Для твэла с конвертором отношение энерговыделения в его центре к энерговыделению на периферии составляет 0,95. Для твэлов с таким содержанием <sup>235</sup>U, работающих в потоке тепловых нейтронов, это отношение не больше 0,7.

### 3 ПУСК РЕАКТОРА С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ УСТРОЙСТВОМ

В ходе пуска ИГР предложено установить такую мощность твэлов и расход теплоносителя (азот), чтобы расчетный подогрев твэлов был на уровне ~1000–1200 °С при длительности работы, близкой к 100 секундам. Разогрев теплоносителя на выходе должен обеспечивать достаточную точность измерения его температуры на большей части пуска.

На основании нейтронно-физических расчетов была выбрана мощность каждой сборки твэлов на уровне 700 Вт, длительность работы реактора на пуске 100 секунд при полном выборе его интеграла мощности. Расход теплоносителя в каждом твэле составил 2 г/с. Диаграмма пуска реактора представлена на рисунке 3.

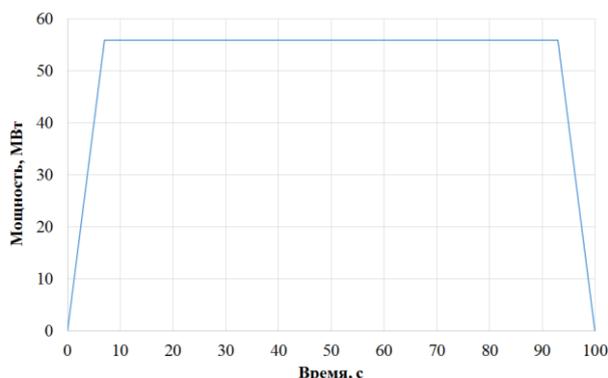


Рисунок 3. Изменение мощности реактора в ходе рабочего пуска

Результаты комплексного нейтронно-физического и теплофизического расчета в виде изменения температур основных элементов экспериментального устройства представлены на рисунке 4.

Анализ этих данных показывает:

- максимальные уровни температур твэлов близки к заданным значениям;
- в ходе пуска подтверждается различие зависимостей энерговыделения от температуры кладки в твэлах двух типов, представленных в таблице 1;
- обеспечивается безопасный уровень нагрева кадмия в ходе пуска;
- подогрев теплоносителя обеспечивает определение его температуры на большей части эксперимента с достаточной точностью.

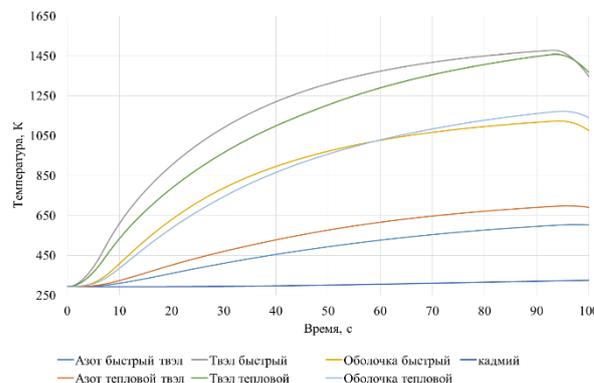


Рисунок 4. Изменение температуры элементов экспериментального устройства на пуске

При меньшем различии в содержании <sup>235</sup>U в твэлах обоих типов возможно увеличение мощности экспериментального устройства. Максимальная мощность будет реализована при содержании 17% <sup>235</sup>U в твэле конвертора и 0,54% в тепловом твэле. При этом твэл конвертора будет установлен в центре активной зоны, а центр теплового твэла смещен от центра активной зоны на ~800 мм. Мощность твэлов увеличится в ~2 раза при той же мощности реактора.

### 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ СПЕКТРОВ НЕЙТРОНОВ В ТВЭЛАХ

Для оценки достоверности расчетов конвертора нейтронов необходимо экспериментальное подтверждение его результатов. Для используемого экспериментального устройства такие измерения следует провести в твэлах обоих типов, обеспечивая повышение достоверности расчетов и экспериментов. В таком варианте достаточно использовать небольшой набор пороговых детекторов с использованием методик [9]. В данных измерениях используется набор активационных детекторов, представленный в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики пороговых реакций и излучения активируемых нуклидов

Элемент	Реакция	$T_{1/2}$ радиоактивного изотопа	Пороговая энергия, МэВ	Эффективная пороговая энергия, МэВ	Энергия регистрируемого $\gamma$ -излучения, кэВ	Выход $\gamma$ -квантов на распад, %
Al	$^{27}\text{Al} (n, \alpha) ^{24}\text{Na}$	15 ч	3,26	8,15	1368,5 2754,1	99,999 99,862
Fe	$^{56}\text{Fe} (n, p) ^{56}\text{Mn}$	2,578 ч	2,95	7,7	846,75 1810,7 2113,1	98,87 27,2 14,3
Fe	$^{54}\text{Fe} (n, p) ^{54}\text{Mn}$	312,7 сут	*	3,75	834,83	99,98
Ni	$^{58}\text{Ni} (n, p) ^{58}\text{Co}$	79,8 сут	*	3,45	511,0 810,76	29,86 99,43
Ni	$^{58}\text{Ni} (n, 2n) ^{57}\text{Ni}$	36,08 ч	12,0	14,0	511,0 1377,6 1919,4	80,2 77,9 14,72
In	$^{115}\text{In} (n, n') ^{115m}\text{In}$	4,36 ч	0,335	1,65	336,3	47,606
Cu	$^{63}\text{Cu} (n, 2n) ^{62}\text{Cu}$	9,8 мин	10,9	13,2	511	196
Cu	$^{65}\text{Cu} (n, 2n) ^{64}\text{Cu}$	12,8 ч	10,1	11,7	511	35,7

В предлагаемом экспериментальном устройстве удобно использовать никелевые индикаторы, выполненные в виде дисков диаметром 5,9 мм, толщиной 0,1 мм. Такие индикаторы имеют удовлетворительные значения периода полураспада, измеряемых энергий гамма-квантов и выхода этих квантов на распад. Эти диски можно устанавливать между топливными таблетками в твэлах, в местах с равным расчетным энерговыделением. Возможна установка дополнительных активационных дисков по обе стороны от указанных мест, с равным удалением от них.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ИГР

Величина эффекта «просветления» кладки, рассчитанная в различных работах ([8], [9]) отличается от приведенных в главе 2 изменений мощности теплового твэла от температуры кладки. Причиной этому может быть различие в конфигурации центрального экспериментального канала. В [8] он пустой, в настоящих расчетах и в [9] имеется набор твэлов, отличающийся содержанием топливных материалов. Это говорит о важности детального исследования эффектов, связанных с разогревом кладки импульсного реактора ИГР.

Для эксплуатации ИГР важным является изменение потока нейтронов в местах размещения датчиков СУЗ реактора в зависимости от температуры кладки и положения органов регулирования реактора. Проведенные в настоящей работе расчеты показали меньшую зависимость изменения потока надтепловых нейтронов от температуры кладки. Этот эффект необходимо исследовать дополнительно, в том числе и в отношении зависимости потоков в местах размещения датчиков СУЗ. Такие комплексные расчеты позволят получить достоверные данные о мощности реактора в ходе его работы и снизить ошибку определения мощности.

Для датчиков СУЗ ожидается меньшее влияние загрузки на зависимость от температуры кладки. Возможно определенное влияние положения стержней

регулирования на показания датчиков СУЗ. В работе [9] показано существенное изменение азимутального потока нейтронов в области датчиков СУЗ. Детальное исследование влияния таких факторов, как температура кладки, положение органов регулирования и расположение датчиков СУЗ позволят создать компьютерную систему, обеспечивающую представление точного значения мощности в режиме «on-line».

#### ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТА

В ходе расчетных работ были определены параметры экспериментального устройства при реализации максимальной аварийной ситуации – когда происходит работа реактора в режиме вспышки. Мощность реактора и температура элементов экспериментального устройства в ходе такой аварийной ситуации представлены на рисунке 5.

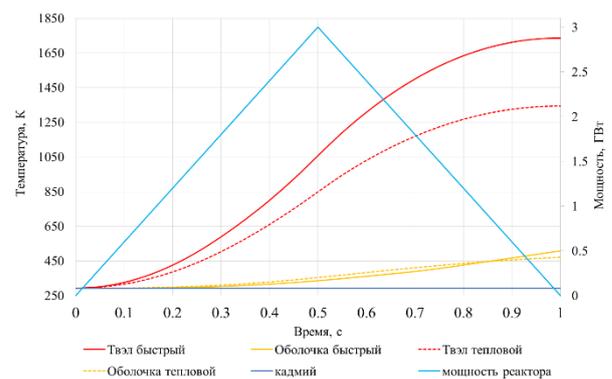


Рисунок 5. Мощность реактора и температура элементов экспериментального устройства в ходе аварийной ситуации

В этом аварийном режиме отсутствует охлаждение твэлов. Видно, что максимальная температура твэлов и их оболочек, определяющих негативные проявления аварии, близка к максимальным значениям, достигаемым в рабочем режиме (рисунок 4). Даже температура кадмия в аварийном режиме не приближается к температуре его плавления.

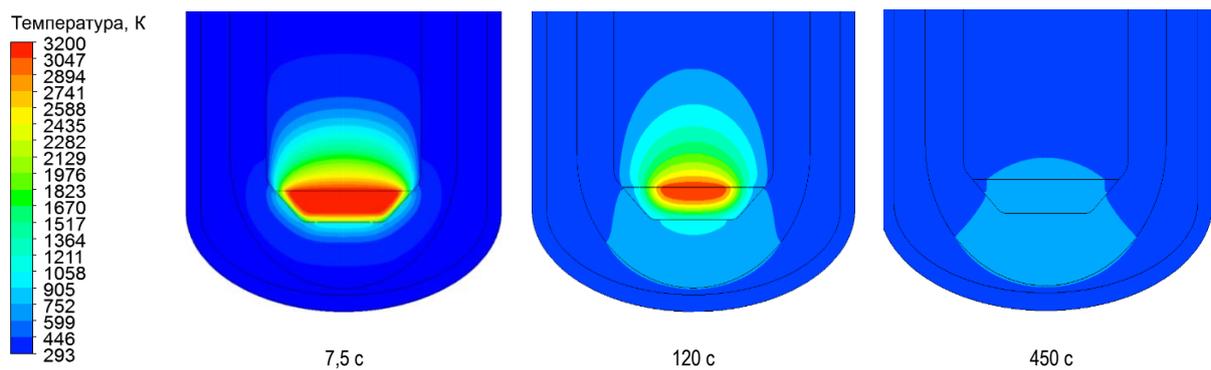


Рисунок 6. Изменение поля температур в приемнике расплава во времени

Экспериментальное устройство снабжено приемником расплава топлива в его нижней части. Проведено расчетное определение изменения температурного поля в приемнике расплава при поступлении в него всего объема топлива с температурой 3200 К. Такой случай возможен гипотетически при проведении пуска реактора в штатном режиме, но без подачи теплоносителя. На рисунке 6 представлены поля температур приемника расплава от момента поступления расплава до 450 секунды.

Малое количество топлива в экспериментальном устройстве обеспечивает быстрый спад температур в приемнике расплава, и, соответственно, сохранность внешнего корпуса экспериментального устройства и всего реактора.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены нейтронно-физические и теплофизические расчеты характеристик работы предложенной конструкции экспериментального устройства, предназначенного для проверки работоспособности конвертора тепловых нейтронов ИГР в быстрые, обеспечивающего возможность представительных испытаний твэлов быстрых реакторов.

Особенностью экспериментального устройства является установка в центральный экспериментальный канал ИГР двух сборок твэлов, одну в конверто-

ре, другую без конвертора, с равной мощностью. Такой подход обеспечивает получение максимума информации, характеризующей проведенный комплекс расчетов.

Показано, что никелевые активационные индикаторы, установленные в обоих типах твэлов, способны обеспечить получение данных о характере спектра нейтронов в твэлах в постэкспериментальных исследованиях.

Показаны различия зависимостей изменения мощности обоих типов твэлов от температуры кладки реактора. В твэле на тепловых нейтронах происходит рост их мощности с ростом температуры кладки. Однако, темп роста отличается от темпа, представленного в работе [8].

Показана необходимость проведения дополнительных расчетов для определения влияния температуры кладки, положения органов регулирования и азимутального размещения органов СУЗ на показания детекторов СУЗ реактора с целью увеличения точности их показаний.

*Данная работа выполнена в рамках бюджетной программы «Развитие атомных энергетических проектов», тема «Исследование поведения твэлов быстрых реакторов в тяжелых авариях».*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Курчатов И.В., Фейнберг С.М., Доллежалъ Н.А. и др. Импульсный графитовый реактор ИГР. // Атомная энергия, 1964, т. 17, вып. 6, с. 463–474.
2. Котов В.М., Жанболатов О.М. Конвертор нейтронов для испытания твэлов быстрых реакторов. // Патент на изобретение РК № 33207 от 15.10.2018, бюл. № 40.
3. Котов В.М., Жанболатов О.М. Конвертер нейтронов ИГР для испытаний твэлов быстрых реакторов. // Вестник НЯЦ РК. 2017. № 1(69). С. 98–102.
4. Котов В.М., Жанболатов О.М. Изучение возможности проведения экспериментов в реакторе ИГР с твэлом на быстрых нейтронах. // Вестник НЯЦ РК.– 2018.– № 4(76).– С. 18–21.
5. Котов В.М., Жанболатов О.М. Конвертор тепловых нейтронов в быстрые реактора ИГР. // V Международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики». Москва, 2-5 октября 2018, АО «НИКИЭТ». С.336–342.
6. Вурим А.Д., Котов В.М., Иркимбеков Р.А. и др. Компьютерная модель реактора ИГР для стационарных нейтронно-физических расчетов. // А.с. № 2738 РК, 27.12.2016.
7. MCNP-5.1.40 Monte-Carlo N-Particle Transport Code: Los Alamos National Laboratory; Los Alamos, New Mexico. – April 24, 2003.
8. Горин Н.В., Кандиев Я.З., Козыбаев Р.М. и др. «Эффект просветления» уран-графитового топлива ИГР. // Атомная энергия, 1998, т. 85, вып. 5, с. 419–421.

9. Котов В.М., Курпешева А.М., Иркимбеков Р.А. Расчет характеристик ИГР. // Атомная энергия, 2011, т. 111, вып. 2, с. 116–119.
10. Ломакин С.С., Петров В.И., Самойлов П.С. Радиометрия нейтронов активационным методом. // М.: Энергоатомиздат, 1983. –144 с.

### **ИГР-де ЖЫЛДАМ РЕАКТОРЛАРДЫҢ ТВЭЛДЕРІН ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН НЕГІЗДЕУ**

**В.М. Котов, О.М. Жанболатов, Н.А. Сулейменов**

*ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан*

Бұл жұмыста ИГР жылу импульсті реакторының орталық эксперименттік арнасында жылдам реакторлардың твэлдерімен жүргізілетін өкілдік эксперименттерді қамтамасыз ету сұрақтары қарастырылған. Бұрын жүргізілген есептеулер, конструкциясы әртүрлі конверторлардың көмегімен ИГР-да жылдам нейтрондардың жеткілікті қарқынды өрісін алу мүмкіндігін көрсетті. Осындай ИГР-де жылдам реакторлардың твэлдерін сынауға өту үшін есептік зерттеулердің эксперименттік негіздемесі қажет. Твэлдердің - біреуі нейтрондардың жылу спектрында жұмыс істейтін, екіншісі конвертордың көмегімен алынған нейтрондар спектрында жұмыс істейтін екі типінің жинағын пайдалану арқылы эксперименттік негіздеме жүргізу ұсынылды. Осындай эксперименттік құрылғының конструкциясы әзірленді, оның жұмыс сипаттамалары есептелінді. Оны ИГР-де сынау қауіпсіздігіне негіздеме жүргізілді.

### **SUBSTANTIATION OF AN EXPERIMENTAL STUDY TECHNOLOGY OF FUEL RODS OF FAST REACTORS IN THE IGR**

**V.M. Kotov, O.M. Zhanbolatov, N.A. Suleymenov**

*Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

The paper addresses issues of providing the representative experiments with fuel rods of fast reactors in central experimental channel of the IGR thermal pulse reactor. Preliminary calculations demonstrated a possibility to receive quite intensive field of fast neutrons in the IGR using converters of various designs. For a shift to such tests of fuel rods of fast reactors in the IGR, experimental substantiation of calculation studies is required. It was suggested to implement the experimental substantiation using a set with two types of fuel rods, one of which operates in thermal spectrum of neutrons and another one – in a neutron spectrum obtained using the converter. The design of such an experimental device has been developed; its performance has been calculated. The safety justification for its testing in the IGR has been carried out.