

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу  
**ПАВЛОВА Андрея Константиновича**  
**«Расчётное обоснование методологии перевода растворного реактора «Аргус» на низкообогащённое урановое топливо»,**  
представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по научной специальности 05.14.03 «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации»

### **Актуальность и цели работы**

Существующий растворный реактор «Аргус» предполагается к использованию в качестве прототипа для реактора с таким же названием, предназначенного для наработки изотопов, используемых для лучевой диагностики и терапии. Одним из требований к безопасному использованию таких реакторов является исключение в процессе эксплуатации реактора разрушения барьеров безопасности за счет несанкционированного ввода реактивности, приводящего к неуправляемой (самопроизвольной) цепной реакции (СЦР). Кроме того, в целях обеспечения нераспространения ядерных материалов исследовательские реакторы переводят на топливо, обогащением по U-235 ниже 20 %. В настоящее время реактор «Аргус» эксплуатируется с использованием высокообогащенного топлива (ВОУ). Перевод любого реактора на иной вид топлива представляет собой непростую инженерную задачу, включающую проведение исследований в области реакторной физики, а также обоснования безопасности предполагаемых проектных и конструкторских решений. Для того, чтобы реактор «Аргус» стал прототипом реактора для наработки изотопов, используемых в медицинских целях, его, с учетом сказанного выше, предполагается перевести на низкообогащенное топливо (НОУ). Рассматриваемая диссертация посвящена решению следующих актуальных задач:

- обоснование с точки зрения физики перевода реактора «Аргус» на НОУ топливо;

- обоснование безопасности реактора «Аргус» с НОУ топливом по отношению к авариям, в том числе, с несанкционированным вводом реактивности.

**Целью работы** являлась разработка математической модели растворного реактора «Аргус», проведение расчётного обоснования перевода указанного реактора на НОУ топливо, а также обоснование безопасности реактора, как в процессе перевода на новый вид топлива, так и в процессе его эксплуатации при использовании НОУ топлива. **Поставленная цель в диссертации достигнута.**

### **Содержание работы.**

Диссертация написана ясно и четко с использованием общепринятой научно-технической терминологии и определением специфических терминов.

Она состоит из введения четырех глав, заключения, списка литературы и 4х приложений.

Во **введении** обоснована актуальность работы, её научная новизна и практическая значимость, сформулирована цель работы. Представлены личный вклад автора и положения, вынесенные на защиту, приведены сведения о публикациях и апробации работы.

**В первой главе** приводится описание реактора «Аргус» с ВОУ топливом. Он предназначен для нейтронной радиографии, активационного анализа и наработки медицинских радионуклидов. Ставится задача о переводе реактора на НОУ топливо, которая вытекает из выполнения РФ международных договоров о нераспространении ядерных материалов. Указывается, что диссертация является частью методологии перевода реактора на НОУ топливо. Приводится описание ПС MCU-RFFI/A и расчетной модели реактора, использованной для проведения расчетных обоснований. В первой главе содержатся результаты верификации моделей реактора с ВОУ топливом. Из них следует наличие необходимого для практических целей соответствия

расчетов и измерений. Основным выводом к главе 1 является подтверждение применимости разработанной модели реактора для проведения дальнейших расчетов с НОУ топливом.

**Во второй главе** приведены требования, предъявляемые к реактору с НОУ топливом, описываются модели реактора с НОУ топливом, приводится порядок проведения расчетов нейтронно-физических характеристик реактора и результаты этих расчетов, дается характеристика распределения энерговыделения в топливном растворе. Расчетным путем показано отсутствия причин повышения альфа-активности топливного раствора при переводе на НОУ топливо. Делается вывод о возможности перевода реактора «Аргус» на НОУ топливе без ограничений его функционального назначения.

**В третьей главе** представлена расчётная методика планирования перевода реактора на НОУ топливо, в частности описана подготовка и последовательность проведения процедуры загрузки видов топлива и доведение его до уровня НОУ.

Описан способ расчёта ядерных концентраций элементов "водород" и "кислород" в топливном растворе при недостатке исходных данных. Даже при наличии всех данных расчет изотопов, содержащихся в водном растворе кислоты, является непростым.

Приводятся результаты верификации расчетной методики планирования последовательности перевода на НОУ топливо, показывающие хорошее согласование расчетных и измеренных значений эффективного коэффициента размножения. Приводятся измеренные значения параметров реактора с НОУ топливом. Они определялись по ранее разработанным и верифицированным методикам. Это эффекты реактивности, характерные для реактора Аргус и плотности потоков тепловых и быстрых нейтронов.

Основным выводом к главе 3 является то, что параметры, определяемые по расчетной методике планирования перевода реактора «Аргус» на НОУ топливо,

согласуются с измеряемыми в ходе перевода параметрами с необходимой для практики точностью.

Применение разработанной расчетной методики позволило произвести перевод реактора с ВОУ на НОУ топливо без выгрузки ВОУ топлива.

**В четвертой главе** приведена методика расчетно-экспериментального обоснования ядерной безопасности реактора с НОУ топливом. В части экспериментального обоснования безопасности описаны примеры саморегулирования реактора с ограничением спонтанного нарастания мощности при экспериментах на импульсном реакторе «Гидра». Показано, что физические свойства реактора «Гидра» близки к соответствующим свойствам реактора «Аргус» с ВОУ топливом. Далее дано краткое описание ПС «ДАРЕУС», предназначенного для нейтронно-физического и теплогидравлического расчетов динамических процессов в реакторе «Аргус». Нейтронно-физической частью программы «ДАРЕУС является программа, обеспечивающая решение нестационарного уравнения переноса методом Монте-Карло. Диссертант провел верификация ПС «ДАРЕУС» на базе архивных данных по измерениям на реакторах «Аргус» и «Гидра». Для обоснования ядерной безопасности реактора «Аргус» с НОУ топливом в части несанкционированного ввода реактивности рассмотрены постулированные аварии, в том числе с разгоном на мгновенных нейтронах. Показано, что свойства внутренней самозащищенности реактора «Аргус» с НОУ топливом таковы, что проектные пределы разрушения основного барьера безопасности (корпуса реактора) не достигаются. Это является основным выводом главы 4.

**Научная новизна, практическая ценность, достоверность  
результатов и личный вклад автора.**

**Научная новизна работы** заключается в разработке и верификации расчетной методики перевода растворного реактора «Аргус» на НОУ топливо без выгрузки ВОУ топлива. Следует особо отметить представленное в

диссертации обоснование безопасности растворного исследовательского реактора (не импульсного) путем рассмотрения аварий с несанкционированным вводом реактивности, при которых рассмотрен разгон на мгновенных нейтронах.

**Практическая значимость** диссертационной работы заключается в том, что методология, расчетное обоснование которой представлено в диссертации, использована при переводе реактора «Аргус» на НОУ топливо. Так же высокую практическую ценность представляют представленные в диссертации результаты верификации программного средства «ДАРЕУС», в разработке которого принимал участие диссертант. Нейтронно-физическая часть этого ПС является может быть использована для обоснования ядерной безопасности других типов реакторов, в том числе не растворных.

**Личный вклад автора** в представленной работе является **определяющим**. Им разработаны и верифицированы математические и компьютерные модели реактора «Аргус» с ВОУ и НОУ топливными композициями для разных этапов перехода с одного вида топлива на другой, расчетные модели для обоснования безопасности как самого перехода на новый вид топлива, так и для эксплуатации с новым топливом, проведена работа по подготовке материалов верификации для ПС «ДАРЕУС» и проведена верификация ПС для расчета реактора «Аргус».

**Достоверность** полученных результатов и выводов подтверждается данными измерений и соответствием измеренных значений результатам выполненных диссертантом расчётов по ПС MCU-RFFI/A нейтронно-физических характеристик растворных реакторов «Аргус» и его импульсного аналога «Гидра» с ВОУ топливом с определенной погрешностью. Погрешность расчетов позволяет выбрать проектные параметры для реактора «Аргус» с НОУ топливом и обосновать его безопасность на основе принципа консерватизма.

**Апробация работы** является представительной. Диссертант является соавтором ряда докладов, представленных на различных конференциях, в том

числе на отраслевом семинаре «НЕЙТРОНИКА». Результаты диссертации представлены в **трех публикациях** в изданиях, которые учитываются ВАК РФ при защите диссертаций.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Реализованная последовательность загрузки с контролем попадания каждого значения подкритичности в интервал допустимых значений при переводе реактора «Аргус» на НОУ топливо, впервые проведённая в корпусе реактора, исключившая возможные риски переоблучения персонала и возникновения СЦР при выгрузке и хранении ВОУ топлива.

2. Проведенные расчёты по ПС MCU-RFFI/A при помощи математической модели реактора «Аргус» с ВОУ и НОУ топливом, составленной и верифицированной по результатам эксплуатации реактора.

3. Реализованная процедура определения ядерных концентраций элементов материала «топливный раствор».

**Вынесенные на защиту положения диссертации соответствуют целям диссертации и полученным в ней результатам.**

**Замечания по диссертационной работе.**

1. Таблица 2.2 на стр. 49 является основополагающей для проекта и обоснования безопасности (в том числе эксплуатационной) реактора «Аргус» с НОУ топливом. При этом, как видно из указанной таблицы и рисунка 3.2, предложенная оцененная погрешность является завышенной. Следует пояснить, почему при оценке погрешности выбрано значение доверительной вероятности, равное 0,9. Кроме того целесообразно привести в диссертации значения эффектов реактивности, в том числе, связанных с уровнем раствора в реакторе и концентрацией делящегося материала в растворе.
2. На стр. 54 приводятся выводы об уровне альфа активности в НОУ топливе со ссылкой на расчетные исследования. Объем диссертации позволил бы

привести сведения о программных средствах, которые были использованы для расчета и цепочки превращений изотопов, приводящих к образованию альфа активных ядер.

3. В разделе 4.2 приводится описание программы «ДАРЕУС». При этом подобно описывается нейтронно-физическая часть программы «ДАРЕУС» - модуль КИР, а также использованная для стационарных расчетов программа MSU-RFFI/A. Теплогидравлическая часть программы ДАРЕУС – программа ГАРД, описана общими фразами. Заложенные в нее алгоритмы следовало бы описать более подробно, особенно в части описания механизма самогашения импульса для реактора «Гидра» и самогашения разгона на мгновенных нейтронах при обосновании безопасности реактора «Аргус».
4. В п.4.3 представлены результаты анализа запроектной аварии с несанкционированным вводом положительной реактивности. По представлению информации имеются следующие замечания:
  - а) не указывается значение  $\beta_{эфф}$ , а также характеристики разгона реактора на мгновенных нейтронах (период разгона на мгновенных нейтронах и т.д.);
  - б) Разгон на мгновенных нейтронах начинается при вводе реактивности  $0,5 \beta_{эфф}$  (значение взято из рисунка), однако не указано, является ли эта величина реактивности предельно возможной для несанкционированного ввода перед самогашением;
  - в) не указано какой вклад в результаты расчетов вносит т скорость ввода реактивности;
  - г) в качестве нейтронно-физической части динамического расчета используется решение нестационарного уравнения переноса методом Монте-Карло, однако не указано, какие уточнения или различия были получены по сравнению с ранее использованными подходами.

## **Заключение.**


Высказанные выше замечания не снижают высокого уровня проведённой диссертантом работы, особенно следует отметить значительную ценность результатов работ по определению последствий разгона реактора на мгновенных нейтронах при анализе аварии с несанкционированным вводом реактивности. Из этого следует, что диссертационная работа **ПАВЛОВА А.К. «Расчётное обоснование методологии перевода растворного реактора «Аргус» на низкообогащённое урановое топливо»** является завершённой научно-квалифицированной работой. Полученные автором результаты являются достаточно новыми, обоснованными и достоверными. Она вносит существенный вклад в развитие физики и техники растворных реакторов.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Работа отвечает требованиям ВАК РФ о порядке присуждения ученых степеней, а её автор **ПАВЛОВ Андрей Константинович**, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 "Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации".

Официальный оппонент

к.ф.-м.н, с.н.с.

 Попыкин Александр Иванович  
«11» октября 2018 г.

Тел./факс: +7 (499) 753-05-24

e-mail: popykin@secnrs.ru

Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (ФБУ «НТЦ ЯРБ»);

Россия, 107140, г. Москва, ул. Малая Красносельская, дом 2/8, корпус 5;

Тел.: +7 (499) 264-00-03; факс: +7 (499) 264-28-59

e-mail: secnrs@secnrs.ru

Адрес официального сайта организации: [www.secnrs.ru](http://www.secnrs.ru)

Подпись Попыкина А.И. удостоверяю

Ученый секретарь, к.т.н.



В.А. Гремячкин

18 г.