



НАУКА
И ИННОВАЦИИ
РОСАТОМ

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

**РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНОГО АНАЛИЗА ТЕСТОВ
ДЛЯ КРОСС-ВЕРИФИКАЦИИ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ
ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**



**ОПИСАНИЕ НАБОРА
ИЗ ТРЕХ РАСЧЕТНЫХ ТЕСТОВ
ДЛЯ КРОСС-ВЕРИФИКАЦИИ
ПРОГРАММНЫХ
СРЕДСТВ ТЕХНИКО-
ЭКОНОМИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ЯЭС**

**АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ
РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ,
СОЗДАННЫХ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ЧЕТЫРЕХ РОССИЙСКИХ
ПРОГРАММНЫХ
СРЕДСТВ ТЕХНИКО-
ЭКОНОМИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ЯЭС**

**СВОДНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
РАСЧЕТОВ И АНАЛИЗ
РАСЧЕТНЫХ РАСХОЖДЕНИЙ
В МАТЕРИАЛЬНЫХ
И ЭКОНОМИЧЕСКИХ
ПОКАЗАТЕЛЯХ**

Государственная корпорация
по атомной энергии «Росатом»
Частное учреждение «Наука и инновации»
Центр аналитических исследований
и разработок

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
Частное учреждение «Наука и инновации»
Центр аналитических исследований и разработок

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНОГО АНАЛИЗА ТЕСТОВ ДЛЯ КРОСС-ВЕРИФИКАЦИИ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЯДЕРНО- ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Москва
2022

УДК 621.311

ББК 31.47

Р 34

Р 34 Результаты расчетного анализа тестов для кросс-верификации программных средств технико-экономического моделирования ядерно-энергетических систем. Аналитический отчет / Алтынникова У.Ф., Андрианов А.А., Гурин А.В., Дырда Н.Д., Купцов И.С., Макеева И.Р., Муравьев Е.В., Птицын П.Б., Фомиченко П.А. – М.: ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2022. – 104 с.

ISBN 978-5-498-00899-8

© ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2022

Подписано в печать 2.09.2022. Формат 60x84 1/8. Бумага мелованная.

Гарнитура Rosatom. Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,09.

Тираж 100 экз. Заказ № 6176.

Отпечатано в ООО «Элефант»:

610040, г. Киров, ул. Мостовая, д. 32/7,

www.hibox.pro

НАЗВАНИЕ РАБОТЫ:

Результаты расчетного анализа тестов для кросс-верификации программных средств технико-экономического моделирования ядерно-энергетических систем.

АВТОРЫ:

Алтынникова У.Ф., научный сотрудник ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина». **Андрянов А.А.**, руководитель группы разработки АИ и ИИ отраслевого Центра аналитических исследований и разработок частного учреждения «Наука и инновации». **Гурин А.В.**, советник группы разработки АИ и ИИ отраслевого Центра аналитических исследований и разработок частного учреждения «Наука и инновации», старший научный сотрудник ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». **Дырда Н.Д.**, начальник лаборатории ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина». **Купцов И.С.**, советник группы разработки АИ и ИИ отраслевого Центра аналитических исследований и разработок частного учреждения «Наука и инновации». **Макеева И.Р.**, начальник отдела ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина».

Муравьев Е.В., главный научный сотрудник АО «Прорыв».

Птицын П.Б., заместитель директора – директор отраслевого Центра аналитических исследований и разработок частного учреждения «Наука и инновации». **Фомиченко П.А.**, заместитель руководителя комплекса ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

РЕФЕРАТ:

В настоящем документе представлены результаты расчетного анализа тестов для кросс-верификации программных средств технико-экономического моделирования ядерно-энергетических систем с использованием четырех программных средств: АТЭК-ЯТЦ (ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ»), ППМ ЯЭС (версия для Stella Architect) (ЦАИР частного учреждения «Наука и инновации»), УСМ-1 (АО «Прорыв»), STEM (НИЦ «Курчатовский институт»). В каждом программном средстве разработаны расчетные модели, которые описывают схемы движения материальных потоков, структуру и динамику изменения установленной мощности ядерно-энергетической системы, предположения, касающиеся обращения с облученным ядерным топливом и вторичными делящимися материалами, в соответствии с техническими и экономическими данными, приведенными в описаниях тестовых задач. Разработанные модели позволяют рассчитать материальные показатели, включающие потоки материалов и потребности в услугах топливного цикла, а также экономические показатели. В документе приводятся сводные результаты анализа расчетных расхождений, а также обсуждаются вероятные причины их возникновения. Работа выполнена в рамках реализации меморандума отраслевого семинара «Технико-экономическое моделирование

многокомпонентных ядерно-энергетических систем» (Госкорпорация «Росатом», г. Москва, 13 февраля 2020 г., п. 4).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

технико-экономическое моделирование, сценарный анализ, атомная энергетика, ядерно-энергетическая система, ядерные реакторы, ядерный топливный цикл, программное обеспечение.

ЦИТИРОВАНИЕ:

Результаты расчетного анализа тестов для кросс-верификации программных средств технико-экономического моделирования ядерно-энергетических систем. / Алтынникова У.Ф., Андрянов А.А., Гурин А.В., Дырда Н.Д., Купцов И.С., Макеева И.Р., Муравьев Е.В., Птицын П.Б., Фомиченко П.А.. – М.: ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2022. – 104 с. – Рус. – Деп. 28.04.2022, № 16-B2022.

TITLE:

The results of cross-verification of software tools for technical and economic modelling of nuclear energy systems.

AUTHORS:

Altynnikova U.F., Andrianov A.A., Dyrda N.D., Fomichenko P.A., Gurin A.V., Kuptsov I.S., Makeeva I.R., Muravyev E.V., Ptitsyn P.B.

ABSTRACT:

This document presents the results of a computational analysis of tests for cross-verification of software tools for technical and economic modelling of nuclear energy systems. The following tools were involved in the study: ATEC-NFC (RFNC - VNIITF), NESAPP (version for Stella Architect) (CARD, Science and Innovations), USM-1 (JSC Proryv), STEM (NRC KI). In each software tool, models have been developed to specify the patterns of movement of material flows, the evolution of the installed capacities of the nuclear energy system, assumptions regarding the management of irradiated nuclear fuel and secondary fissile materials in accordance with the technical and economic data given in the test specifications. The developed models make it possible to calculate material indicators, including material flows and needs for nuclear fuel cycle services, as well as economic performance metrics. The report also considers the calculation discrepancies and discusses the probable reasons for their occurrence. The report was prepared as part of the memorandum of the Rosatom Seminar on “Technical and economic modelling of multicomponent nuclear energy systems” (SC “Rosatom”, Moscow, February 13, 2020, item 4).

KEYWORDS:

technical and economic modelling, scenario analysis, nuclear energy, nuclear energy system, nuclear technologies, nuclear fuel cycle, software tool.

Светлой памяти д.т.н., г.н.с. Е.В. Муравьева

17 января 2022 года в возрасте 83 лет ушел из жизни выдающийся ученый, доктор технических наук, главный научный сотрудник АО «Прорыв» Муравьев Евгений Владиславович.

Евгений Владиславович родился 11 мая 1938 года в городе Петропавловске Хабаровского края. В 1962 году окончил Московский авиационный институт по специальности «Двигатели летательных аппаратов». Евгений Владиславович являлся одним из ведущих специалистов отечественной науки в области использования атомной энергии, автором монографии «Системные исследования в обоснование стратегии развития ядерной энергетики», автором и соавтором более 90 научных трудов в отечественных и зарубежных изданиях и свыше 20 изобретений.

Сфера научной деятельности Евгения Владиславовича – разработка инновационных технологий и системные исследования в области ядерной энергетики, в том числе космических энергоустановок, термоядерных реакторов и новой технологической платформы ядерной энергетики с реакторами на быстрых нейтронах и замкнутым ядерным топливным циклом.

Евгений Владиславович являлся участником международного проекта ИТЭР по созданию экспериментального термоядерного реактора на стадии разработки технического проекта (1992–2001 гг.), осуществлял интеграцию оценок стоимости многочисленных систем сложного объекта, выполнявшихся в разных странах-участницах проекта. Им были созданы автоматизированные электронные формы для описания структуры систем ИТЭР и сбора данных, позволившие автоматизировать обработку результатов и создать единую базу данных, послужившую основой для распределения вкладов партнеров при заключении соглашения о строительстве ИТЭР.

Евгением Владиславовичем разработан уникальный программный комплекс «Генератор системных моделей УСМ-1», дающий возможность создавать динамические технико-экономические модели, ориентированные на описание сложных развивающихся систем типа отраслей промышленности страны, в частности, ядерной энергетики. При создании генератора УСМ-1 были развиты оригинальные подходы к оценкам на системном уровне, как традиционных экономических, так и внеэкономических показателей, относящихся к безопасности в плане тяжелых аварий, экологическим воздействиям и нераспространению ядерных материалов.

Евгением Владиславовичем лично и под его научным руководством выполнен ряд системных исследований, посвященных стратегии развития отечественной и мировой ядерной энергетики с ориентацией на внедрение быстрых реакторов естественной безопасности и замкнутого ядерного топливного цикла. Подготовка настоящего аналитического отчета стала одной из последних работ Евгения Владиславовича.

Вечная память о Евгении Владиславовиче навсегда останется в сердцах его близких, друзей и коллег.



СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ И РАСЧЕТНЫХ КОДОВ	9
1.1. АТЭК-ЯТЦ (РФЯЦ – ВНИИТФ)	9
1.2. ППМ ЯЭС (версия для Stella Architect) (ЦАИР, ЧУ «НИИ»)	11
1.3. УСМ-1 (АО «Прорыв»)	15
1.4. STEM (НИЦ КИ)	20
2. ОПИСАНИЕ ТЕСТОВЫХ ЗАДАЧ	23
2.1. Список рассчитываемых параметров	23
2.2. Описание тестовой задачи 1	27
2.3. Описание тестовой задачи 2	30
2.4. Описание тестовой задачи 3	34
3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ	39
3.1. Результаты расчетов для тестовой задачи 1	41
3.2. Результаты расчетов для тестовой задачи 2	52
3.3. Результаты расчетов для тестовой задачи 3	67
4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ	81
4.1. Анализ расчетных расхождений	81
4.2. Модельные особенности программных систем, приводящие к расчетным расхождениям	90
4.3. Предложения по углубленной кросс-верификации	93
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	95
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	97
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	99



ВВЕДЕНИЕ

Расчетно-аналитический инструментарий технико-экономического моделирования ядерно-энергетических систем (ЯЭС) предназначен для обоснования направлений стратегического развития отрасли, комплексной оценки, сопоставления и выбора перспективных ядерных энерготехнологий и технологий топливного цикла для их развертывания в будущем, информационно-аналитической поддержки экспертизы и подбора новых продуктов и услуг для внутреннего и внешнего рынков. Однако задачам верификации существующих программных средств технико-экономического моделирования ЯЭС в РФ не уделялось достаточного внимания [1, 2]. Ситуация усугубляется отсутствием оцененных и рекомендованных тестовых задач, на которых такая верификация в принципе возможна. В настоящее время примеры такой верификации носят единичный характер. Это приводит к взаимному непризнанию результатов системного моделирования, полученных разными группами специалистов. В конечном итоге сложившаяся ситуация сдерживает практическую взаимосвязь результатов вариативных сценарно-аналитических исследований на базе таких программных средств в решении практических задач при реализации ключевых отраслевых программ.

С целью содействия в решении указанной проблемы в документе [3], подготовленном отраслевым Центром аналитических исследований и разработок (ЦАИР) частного учреждения «Наука и инновации», представлено описание на-

бора из трех расчетных тестов для кросс-верификации программных средств технико-экономического моделирования ЯЭС (акцент сделан на верификацию расчетных методик и алгоритмов, способов их реализации в конкретном инструменте). Каждая тестовая задача содержит описание схемы движения материальных потоков, структуру и динамику изменения установленной мощности ЯЭС, предположения, касающиеся обращения с облученным ядерным топливом (ОЯТ) и вторичными делящимися материалами, исходные технические и экономические данные, наборы предлагаемых к расчету параметров. Данные тесты предназначены для выявления особенностей расчетных методик и алгоритмов оценки материальных потоков и потребностей в услугах ядерного топливного цикла (ЯТЦ), экономических показателей в инструментах технико-экономического моделирования.

В настоящем документе представлены результаты расчетного анализа тестов для кросс-верификации программных средств технико-экономического моделирования ЯЭС из документа [3]. Разработанные расчетные модели на базе четырех программных средств (АТЭК-ЯТЦ (РФЯЦ – ВНИИТФ), ППМ ЯЭС (версия для Stella Architect) (ЦАИР, ЧУ «НиИ»), УСМ-1 (АО «Прорыв»), STEM (НИЦ КИ)) позволяют оценить все описанные в документе [3] материальные показатели, включающие потоки материалов и потребности в услугах топливного цикла, а также экономические показатели. В настоящем документе приводятся сводные результаты анализа расчетных расхождений, а также обсуждаются вероятные причины их возникновения.

С полными версиями аналитических отчетов отраслевого Центра аналитических исследований и разработок можно ознакомиться на следующих ресурсах:

1. Портал отраслевого Центра аналитических исследований и разработок (доступ осуществляется через внутреннюю сеть КСПД Росатома)



2. Раздел отраслевого Центра аналитических исследований и разработок на портале «Страна Росатом» (доступ осуществляется через внутреннюю сеть КСПД Росатома)

