

**Международная молодежная  
школа-конференция по  
ядерной физике и  
технологиям**

19–20 ноября 2020 г.

**Сборник тезисов**

# Содержание

Исследование коррозии паяных соединений антидебризного фильтра ВВЭР 10 . . . . .	1
CsI[Na] response to nuclear recoils in energy range of 3-20 keV 11 . . . . .	1
Статус эксперимента РЭД-100 12 . . . . .	2
A methodology for determining the transmutation efficiency of minor actinides in nuclear reactors 13 . . . . .	2
Система бесперебойного источника питания ксенонового гамм-спектрометра и RASPBERRYPI 3 B+ 14 . . . . .	2
Изучение характеристик 27-дневных вариаций потока ГКЛ по данным эксперимента PAMELA с 2006 по 2016 г. 15 . . . . .	4
Status and future of neutrino astronomy and the Global Neutrino Network 16 . . . . .	4
Использование регенерированного урана и плутония в топливном цикле тепловых реакторов 17 . . . . .	5
Влияние геометрии вертикальных ребер на динамику десублимации гексафторида урана 18 . . . . .	6
Исследование мартенситного превращения при деформационном упрочнении аустенитной стали методом сканирующей контактной потенциометрии 19 . . . . .	7
Global hyperon polarization in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 27$ GeV in the STAR experiment 21 . . . . .	8
Разработка методики подготовки малогрупповых констант с помощью программ MCU и Serpent для повышения точности диффузионных расчетов реакторов ВТГР 22 . . . . .	9
Разработка моделей активной зоны реакторной установки со свинцовым теплоносителем в коде ATHLET 23 . . . . .	10
Кольцевой слой – обобщенный одномерный канал 24 . . . . .	11

Методы аналитического контроля америция-241 и урана в процессе их сорбции на твердофазном экстрагенте на основе ТОДГА 25 . . . . .	12
Молекулярно-динамическое исследование спекания диоксида урана 26 . . . . .	13
Исследование угловых распределений групп мюонов высокой плотности по данным координатно-трекового детектора на дрейфовых камерах 27 . . . . .	14
Calibration of CENNS-10 liquid argon detector with 83mKr source 28 . . . . .	14
Моделирование характеристик 27-дневных вариаций потоков ГКЛ 29 . . . . .	14
Параллельные вычисления нестационарных процессов в ядерном реакторе 30 . . . . .	15
Применение аморфного припоя Ti-Zr-Be для соединения «умного» вольфрамового сплава и стали 31 . . . . .	16
Разработка одномерной модели теплогидравлики, предназначенной для исследования устойчивости реактора с паровым теплоносителем сверхкритического давления 32 . . . . .	17
Investigating the microstructural homogeneity and deformation behavior of steel standard specimen 33 . . . . .	18
Influence of errors in one-group constants and / or neutron flux spectrum on uncertainty of nuclide number densities in the burn-up calculations in cells with different spectrum 34 . . . . .	19
Тестирование элементов сцинтилляционного мюонного годоскопа 35 . . . . .	20
Моделирование отклика детектора ТРЕК при регистрации групп мюонов от первичных космических лучей сверхвысоких энергий 36 . . . . .	20
Исследование возможности использования различных теоретических моделей для получения сечений ядерных реакций при промежуточных и высоких энергиях 37 . . . . .	21
Центральная трековая система эксперимента BM@N 38 . . . . .	22
Скорость генерации пара при кипении наножидкости под действием солнечного излучения 39 . . . . .	22
Исследование эффективности солнечного коллектора прямого поглощения 40 . . . . .	23
Влияние наведенной конвекции на теплоотдачу при кипении воды 41 . . . . .	25
Анализ перспективных методов трансмутации минорных актинидов в подкритических системах, управляемых внешним ускорителем заряженных	

частиц 42 . . . . .	26
Passive shielding of the RED-100 detector in an experiment to study the CENNS process 43 . . . . .	27
Investigation of the Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Ti joint microstructure, brazed with Ti-Zr-Co filler metal 44 . . . . .	27
Smart Grid technologies at nuclear power plants 45 . . . . .	28
Модульный реактор малой мощности с естественной циркуляцией МОДЕСТ 46 . . . . .	29
Оценка возможности снижения пустотного эффекта реактивности в реакторе ВВЭР-СКД 47 . . . . .	29
Сопряженный теплогидравлический и нейтронно-физический расчёт ТВС реактора ИР-8 с помощью кодов MCU-PTR/ATHLET 48 . . . . .	30
Восстановление параметров широких атмосферных ливней с помощью нейронных сетей по данным установки НЕВОД-ШАЛ 49 . . . . .	31
Система калибровочных телескопов Экспериментального комплекса НЕВОД как детектор ШАЛ 50 . . . . .	32
Мониторинг положения пучка заряженных частиц в тестовых экспериментах 51 . . . . .	33
Моделирование теплофизических параметров компонентов пучкового тракта системы дополнительного нагрева плазмы ТЯР в проекте ДЕМО-ТИН 52 . . . . .	33
Investigation of tracking chamber made of six layers of mylar drift tubes 53 . . . . .	34
Зависимость начальных условий столкновения релятивистских тяжелых ионов от энергии и типа ядер в модели Монте-Карло Глаубера 54 . . . . .	35
Исследование кипения наножидкостей различного состава под действием солнечного света 55 . . . . .	36
Разработка автоматизированного стенда для калибровки фотоэлектронных умножителей КАЛИФ-8 56 . . . . .	37
Point-like event discrimination in RED-100 57 . . . . .	37
Определение характеристик неупругого взаимодействия легких ядер с вольфрамом по измерениям космических лучей в эксперименте ПАМЕЛА 60 . . . . .	38
Оценка характеристик внутренней самозащищенности реактора типа БН 62 . . . . .	38
Томографический атомно-зондовый анализ дисперсно-упрочнённой оксидами стали при различных дозах облучения 63 . . . . .	39

Relative elliptic flow fluctuations at NICA energies 64 . . . . .	40
Beam energy dependence of elliptic flow in relativistic heavy-ion collisions in hybrid models and scaling relations 65 . . . . .	40
Идентификация лёгких ядер в космических лучах в эксперименте PAMELA по многократным измерениям потерь энергии вдоль трека 66 . . . . .	41
Расчет пусковых испытаний китайского экспериментального реактора на быстрых нейтронах CEFR 67 . . . . .	41
Применение методов глубокого обучения для исследования мюонов космических лучей 70 . . . . .	42
Исследование температурных полей реактора ВВЭР-СКД с использованием расчетного комплекса ANSYS CFX 71 . . . . .	43
Диагностика закипания теплоносителя на основе анализа флуктуаций теплогидравлических параметров 72 . . . . .	44
Способ очистки рабочего вещества для ксеноновых двухфазных эмиссионных детекторов 73 . . . . .	45
Вторичные антипротоны в околоземном пространстве по данным эксперимента ПАМЕЛА 74 . . . . .	46
First results and Current status of COHERENT experiment with LAr 75 . . . . .	47
Модели гелиосферы 76 . . . . .	47
Применение быстрозакаленных припоев для получения паяных соединений керамики ВК94-1 со сплавом 29НК 77 . . . . .	48
Поиск взаимосвязи высыпаний частиц из радиационного пояса Земли и космических гамма всплесков 78 . . . . .	48
Оптимизация отбора событий для процесса $Z(\ell)Z(\nu)\bar{j}j$ на данных эксперимента ATLAS C $\sqrt{S}=13$ ТэВ 79 . . . . .	49
Испытание мягкого водного бака для пассивной защиты экспериментальной установки РЭД-100 от фоновое излучения на площадке КАЭС 80 . . . . .	50
Исследование возможностей поиска гамма-излучения от карликовых галактик и галактик низкой поверхностной яркости по данным обсерватории Fermi 81 . . . . .	51
Исследование характеристик сцинтилляционных пластин для регистрации тепловых нейтронов на основе ZnS(Ag) с добавками $^6\text{Li}$ или $^{10}\text{B}$ 82 . . . . .	52
Моделирование проектируемого детектора переходного излучения Large TRD с помощью пакета программ GEANT4 83 . . . . .	53

Новый фотоэлектронный блок квазисферического модуля КСМ-6М 84 . . .	54
Cluster of antistars as a source of antihelium in a flux of galactic cosmic rays 85 .	55
Идентификация тепловых нейтронов в сцинтилляторах на основе ZnS с примесями ${}^6\text{Li}$ или ${}^{10}\text{B}$ 86 . . . . .	55
Моделирование потерь энергии VHE-мюонов в воде 87 . . . . .	56
Методика диагностики переходных режимов кипения на основе частотного анализа флуктуаций температуры в режиме реального времени 94 . . .	57
Study of elliptic and triangular flow of identified particles in Au+Au collisions $\sqrt{s_{NN}} = 11.5 - 62.4$ GeV in the STAR experiment 95 . . . . .	58
Актуальные вопросы анализа безопасности при авариях и управление авариями на атомных станциях 96 . . . . .	59
Применение методов обратной свертки для восстановления энергетического спектра космических лучей 97 . . . . .	59
Вариации потока ядер лития ГКЛ в диапазоне жесткостей от 0.5 до 100 ГВ по данным эксперимента PAMELA 98 . . . . .	60

Материаловедение и технологии материалов / 10

## Исследование коррозии паяных соединений антидебризного фильтра ВВЭР

**Authors:** Nikita Popov<sup>1</sup>; Milena Penyaz<sup>1</sup>; Alexander Ivannikov<sup>1</sup>; Oleg Sevryukov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРФИ

**Corresponding Author:** nspopov@mephi.ru

Ячеистые структуры, широко используемые в качестве фильтров и теплообменников, подвергаются воздействию высоких нагрузок и агрессивной коррозионной среды. Коррозионное воздействие может приводить к разрушению наиболее уязвимых элементов структуры и, как следствие к нарушению работы всего изделия. Данное исследование посвящено влиянию элементного состава никелевого припоя на коррозионную стойкость паяных соединений. Для исследования выбраны никелевые сплавы-припои на основе систем Ni-Cr-Si-B (BNi-2, BNi-5a) и Ni-Cr-P (BNi-7) и экспериментальные составы. Режимы пайки подобраны согласно дифференциальному термическому анализу (ДТА). Микроструктура соединений исследовалась с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) на растровом электронном микроскопе (РЭМ). Оценено влияние термического воздействия во время пайки на размер зерна и коррозионную стойкость. Коррозионные испытания проводились в кипящей смеси растворов CuSO<sub>4</sub> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в течение 8 часов. Проведено сравнение структур паяных соединений, полученных с помощью припоев различного состава и при разных временах выдержки, до и после коррозионных испытаний. Оценена эрозийная активность припоев, установлено, что увеличение количества хрома в бористых припоях увеличивает стойкость к коррозионным повреждениям. Выявлены зависимости между химическим составом припоя и паяного шва, структурно-фазовым состоянием неразъемного соединения и стойкостью к коррозии. Показано влияние таких элементов как: бор, кремний, молибден, хром, фосфор на коррозионную стойкость и механизм деградации паяного соединения. Установлено, что BNi-5a, BNi-7 и СТ20 показывают лучшую коррозионную стойкость. У паяных соединений, полученных припоями с низким содержанием хрома, обнаружено сильное растворение зоны, прилегающей к основному материалу. Целью исследования являлось определение влияния элементов, используемых в припоях, а также структурно-фазового состояния на коррозионную стойкость паяного соединения.

Приборы и методы экспериментальной ядерной физики / 11

## CsI[Na] response to nuclear recoils in energy range of 3-20 keV

**Author:** Alexey Kononov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ИТЕП / МЕРФИ

**Corresponding Author:** a\_kononov@itep.ru

We present results of CsI[Na] scintillation quenching factor measurements for nuclear recoils in the 3-20 keV energy range performed at TUNL facility in USA by COHERENT collaboration and discuss essential systematic effects together with an impact of the results on the coherent elastic neutrino-nucleus scattering experiment.

**Физика элементарных частиц / 12**

## Статус эксперимента РЭД-100

**Author:** Dmitry Rudik<sup>1</sup><sup>1</sup> МЕРФИ**Corresponding Author:** rudik.dmitry@mail.ru

Процесс упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах атомов (УКРН) был предсказан более 40 лет назад в рамках Стандартной модели элементарных частиц (СМ). Впервые данный процесс был зарегистрирован только в 2017 г. коллаборацией COHERENT на источнике Spallation Neutron Source (Ок-Ридж, США) в потоке 3 типов нейтрино с энергией до 50 МэВ. Двухфазный эмиссионный детектор РЭД-100 был создан для дальнейшего исследования УКРН на ядрах Хе в непосредственной близости от активной зоны реактора Калининской атомной электростанции (КАЭС). Одна из целей RED-100 – впервые обнаружить процесс УКРН для одного типа нейтрино (электронного антинейтрино) в области низких энергий до 8 МэВ. В этом докладе будет обсуждаться статус эксперимента RED-100.

**Ядерные энергетические установки и ядерный топливный цикл / 13**

## A methodology for determining the transmutation efficiency of minor actinides in nuclear reactors

**Authors:** O. Ashraf<sup>1</sup>; G. V. Tikhomirov<sup>1</sup><sup>1</sup> МЕРФИ**Corresponding Author:** osama.ashraf@edu.asu.edu.eg

The long-lived minor actinides (MAs); americium, neptunium, and curium are the major contributors, after a few centuries, to the long-term radiotoxicity of spent fuel. Therefore, the transmutation of these MAs is considered as an alternative way to the direct disposal. Up to now no definite internationally recognized quantitative criterion of MAs transmutation efficiency was worked out, although this would be highly desirable. The absolute and relative total mass reduction of MAs are completely inadequate because they ignore the accumulation of higher radiotoxic long-lived MAs from the transmuted nuclide. In the current work, we introduce a new criterion for transmutation efficiency of MAs in nuclear reactors and demonstrate its efficiency on the Single-fluid Double-zone Thorium-based Molten Salt Reactor (SD-TMSR). The proposed criterion takes into account the mass of all useful MAs, short-lived MAs, and short-lived fission products (FPs). In contrast, the mass parameters calculate the reduction in the MAs mass regardless of the produced nuclides. We introduce a new approach to load MAs into the SD-TMSR. The proposed approach merges the advantages of both homogeneous and heterogeneous approaches. The overall change in the actinides and FPs mass during the irradiation has been calculated using direct SERPENT-2 calculations. The results show that the transmutation efficiency of Am-241, the prime candidate for transmutation, in the SD-TMSR reaches 82.6 % after 1500 days of radiation.

## Приборы и методы экспериментальной ядерной физики / 14

**Система бесперебойного источника питания ксенонового гамма-спектрометра и RASPBERRYPI 3 B+****Author:** Azizbek Madjidov<sup>1</sup>**Co-author:** Alexader Shustov<sup>1</sup><sup>1</sup> МЕРФИ**Corresponding Author:** ma-azizbek44862@mail.ru

**Ключевые слова:** литий-ионные батареи, гамма-спектрометр, ионизационная камера, энергическое разрешение.

В настоящее время все шире используются технологии, связанные с использованием делящихся и радиоактивных материалов, что дает большой положительный эффект, но, к сожалению, приводит к накоплению опасных радиоактивных отходов и необходимости их утилизации. В связи с этим актуальным становится создание устройств, позволяющих безопасно и эффективно проводить работы по их утилизации. В связи с разработкой автоматизированного и роботизированного ксенонового гамма-спектрометрического комплекса (АРКГСК) для использования при снятии с эксплуатации ядерно-физических установок появляется необходимость в создании системы питания АРКГСК и одноплатного микрокомпьютера RASPBERRY PI 3 B+ с дистанционным управлением. В качестве детектирующей аппаратуры для АРКГСК выбран ксеноновый гамма-детектор (КГД) [1]. На катод и экранирующую сетку КГД подается высокое напряжение (20 кВ и 12 кВ соответственно) отрицательной полярности. Для передачи и приема данных, а также управления набором данных используется одноплатный микрокомпьютер RASPBERRY PI 3 B+. Для обеспечения безопасности работы КГД подключение его к системе питания осуществлялось через BMS-контроллер со встроенным балансиром зарядки и защиты для сборки аккумуляторных батарей, состоящей из 4 литиевых элементов с суммарным напряжением 14.4 В-16.8 В. BMS-контроллер совместим с литий-ионными и литий-полимерными элементами различных форматов и обеспечивает защиту от короткого замыкания, перезарядки, переразряда и перегрузки по току. В ходе испытаний система бесперебойного питания, подключенный к ней КГД, в течение 30 минут работал без снятия информации. После установления на электродах номинального напряжения КГД переводился в штатный режим работы. Напряжение на выходе рои этом составляло 15.7В. При работе с четырьмя литий-ионными батареями 18650 длительность автономной работы составила 2 часа. Напряжение на аккумуляторах упало с 16 до 13В. В течение этого времени были набраны спектры от источников <sup>60</sup>Со и <sup>137</sup>Cs. В дальнейшем планируется работать с 12 – 16 шт. литий-ионными батареями 18650 для обеспечения восьми часового рабочего режима работы КГД и микрокомпьютера Raspberry Pi 3 b+. Общая масса батарей (аккумулятор), для питания бесперебойного источника питания будет составлять около 500 гр., что составляет незначительную часть от полной массы АРКГСК, которая будет составлять около 50 кг. Система бесперебойного источника питания с четырьмя литий-ионными батареями 18650, была создана в процессе выполнения гранта Министерства науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор проекта RFMEFI61419X0003) на кафедре №7 “Экспериментальная ядерная физика и космофизика” в “Радиационной лаборатории”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Novikov A. S., Chernysheva I. V., Dmitrenko V. V., Ulin S. E., et al. Xenon gamma-ray detector's electrical signals digital processing technique // Proceedings of XXIV Int. Symp. on Nuclear Electronics & Computing (NEC'2013, Varna), E10, 11-136, 2013, pp. 192-197.

Космо- и астрофизика / 15

## Изучение характеристик 27-дневных вариаций потока ГКЛ по данным эксперимента PAMELA с 2006 по 2016 г.

**Authors:** Rustam Yulbarisov<sup>1</sup>; Norayr Galikyan<sup>1</sup>; Andrey Mayorov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРФИ

**Corresponding Author:** starwarskust@gmail.com

С июня 2006 года по январь 2016 года магнитный спектрометр PAMELA проводил прецизионные измерения потоков космических лучей на околоземной орбите. В эксперименте получены суточные дифференциальные энергетические спектры частиц различного типа в широком диапазоне энергий от нескольких десятков МэВ до сотен ГэВ, что позволяет изучать временную динамику их потоков. В течение 10 лет измерений обнаружены несколько эпизодов возникновения 27-дневных вариаций галактических космических лучей. В работе определены энергетическая и временная зависимости амплитуды вариаций в потоках протонов и гелия. Для определения амплитуды использован вейвлет-анализ, позволяющий работать с нестационарными временными рядами и выделять 27-дневные гармоники в различные моменты времени. Проведено сравнение полученных амплитудно-энергетических зависимостей, соответствующих разным случаям возникновения вариаций. Показано, что в области высоких энергий (> 1 ГВ) они могут быть описаны степенным законом с различными показателями степени. Обнаружено отклонение от этого закона в интервале 0.4-1 ГВ. Рассмотрение вариаций при низких энергиях (< 0.4 ГВ) по данным других экспериментов подтверждает эффект.

Пленарное заседание / 16

## Status and future of neutrino astronomy and the Global Neutrino Network

**Author:** Christian Spiering<sup>1</sup>

<sup>1</sup> DESY

**Corresponding Author:** christian.spiering@desy.de

The talk will describe detectors and main results of high-energy neutrino astronomy. It will also sketch the future detectors which hopefully will allow us to conquer an hitherto unexplored territory and pinpoint the sources of high-energy cosmic rays.

Ядерные энергетические установки и ядерный топливный цикл / 17

## Использование регенерированного урана и плутония в топливном цикле тепловых реакторов

**Author:** Ольга Дячэк<sup>1</sup>

**Co-author:** Александр Мухин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Белорусский национальный технический университет*

**Corresponding Authors:** ljolja@list.ru, mast.muha@gmail.com

Будущее атомной энергетики связано с разработкой и реализацией эффективных способов использования в реакторах регенерированного топлива, обеспечивая снижение использования природного урана, сокращение накопленного отработавшего ядерного топлива и оружейного плутония. Одним из решений по возвращению регенерированного топлива в реакторы ВВЭР является использование REMIX топлива. REMIX топливо производится из смеси отработавшего урана и плутония без их разделения, а также обогащенного природного урана с содержанием U-235 около 16-17%. Это дает топливо с содержанием примерно 1% Pu-239 и 4% U-235, которое имеет выгорание 50 ГВт/т в течение четырех лет. Отработанное REMIX-топливо через четыре года состоит из около 2% Pu-239 и 1% U-235, а после охлаждения уран и плутоний повторно перерабатываются после добавления низкообогащенного урана. Отходы (продукты деления и второстепенные актиниды) остекловывают и складироваются для геологического захоронения. РЕМИКС топливо может многократно перерабатываться, используя одно и то же топливо, с перезарядкой низкообогащенного урана. Использование РЕМИКС-топлива по сравнению с открытым топливным циклом снижает расход природного урана в ВВЭР примерно на 20% при каждой рециркуляции. Тепловыделяющая сборка REMIX-топлива ВВЭР-1000 будет содержать 86 кг свежего обогащенного урана вместо 433 кг. В данный момент проводятся испытания в реакторе ВВЭР-1000 на 3 энергоблоке Балаковской АЭС. В июле 2016 года в реактор были загружены три ТВС, каждая из которых содержит по 6 опытных ТВЭЛов с REMIX-топливом. Планировалось, что топливо пробудет в реакторе не менее трех лет - 2 топливные компании. В 2018-2019 годах представители Росатома сообщили, что испытания на идут без замечаний и продлили испытания на третий топливный цикл, он стартовал в 2020 году. После выгрузки из реактора ТВС поместят в бассейн выдержки на полтора года, а затем их доставят в ульяновский НИИЯР для дальнейшего исследования. Преимущества топливного цикла ВВЭР-1000 с REMIX топливом по сравнению с открытым урановым топливным циклом: для получения REMIX топлива используется весь уран и плутоний, находящийся в ОЯТ; уменьшение количества ОЯТ; не нужно выделять плутоний в чистом виде при переработке ОЯТ; есть возможность полной загрузки реактора ВВЭР-1000 REMIX топливом благодаря низкому содержанию плутония, и как следствие этого – экономия природного урана; технология переработки ОЯТ одинаковая как для реакторов на быстрых нейтронах, так и тепловых; возможность переработки ОЯТ реакторов на тепловых нейтронах неядерных государств и изготовление REMIX-топлива. Недостатком REMIX топлива является прирост стоимости изготовления ТВС на 20-25% по сравнению с топливом UO<sub>2</sub>. Это связано с высокими уровнями активности REMIX топлива.

## Прикладная ядерная физика и теплофизика / 18

**Влияние геометрии вертикальных ребер на динамику десублимации гексафторида урана**

Author: Дарья Леонтьева

Co-author: Максим Верлинский

Corresponding Author: dasha-cherry96@mail.ru

Процесс десублимации  $UF_6$  является неотъемлемой частью технологии обогащения урана. На разделительных производствах выходящие потоки  $UF_6$ , обедненные и обогащенные по изотопу  $^{235}U$ , подаются на участок конденсационно-испарительных установок, где десублимируются в вертикальные погружные емкости без оребрения, с вертикальным или горизонтальным оребрением. На практике наибольшее распространение получил способ десублимации  $UF_6$  в вертикальные погружные емкости с вертикальным оребрением. Целью данного исследования являлось численное моделирование процесса десублимации газообразного  $UF_6$  в вертикальные погружные емкости объемом 1.0...4.0 м<sup>3</sup> для определения возможности повышения их производительности при изменении ширины и длины вертикальных ребер. Объектом исследования являлись вертикальные погружные емкости с вертикальным оребрением объемом от 1 до 4 м<sup>3</sup>. Количество ребер во всех емкостях – 12, толщина ребер 4 мм, толщина стенок емкостей  $8 \times 10^{-3}$  м. В процессе исследования проводился расчет зависимости средней производительности и степени заполнения емкости объемом 1.0...4.0 м<sup>3</sup> от ширины и длины вертикальных ребер с использованием упрощенной трехмерной математической модели процесса десублимации  $UF_6$  [1]. Данная модель не использует эмпирические данные, учитывает движение газообразного  $UF_6$  внутри емкости, десублимацию  $UF_6$  на торцевых стенках емкости, эллиптичность этих стенок, а также нестационарность процессов тепло- и массообмена. Определение оптимальной ширины и максимальной длины ребер проводили на основе критерия обеспечения максимальной средней производительности емкости при ее заполнении до 70% свободного объема. Найденные оптимальные значения размеров вертикальных ребер представлены в таблице 1.

Таблица 1. Оптимальные значения ширины и длины вертикальных ребер емкостей различных объемов.

V, м <sup>3</sup>	L <sub>опт</sub> , м	d <sub>опт</sub> , м	d <sub>опт</sub> /R	q, кг/час
1.0	1.132	0.317	0.7044	19.363
1.5	1.412	0.355	0.7100	25.565
2.0	1.564	0.391	0.7109	30.286
2.5	1.604	0.427	0.7117	33.627
3.0	1.622	0.462	0.7108	36.643
3.5	1.582	0.497	0.7100	38.806
4.0	1.542	0.532	0.7093	40.925

В таблице: V – объем емкости, L – оптимальная длина вертикальных ребер, d – оптимальная ширина вертикальных ребер, R – внутренний радиус емкости, q – средняя производительность емкости. Показано, что при увеличении объема емкостей от 1.0 до 4.0 м<sup>3</sup> средняя производительность увеличивается примерно в 2 раза, оптимальная ширина ребер увеличивается на 68%. Наибольшая средняя производительность наблюдается при максимальной длине ребер.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов А.А., Цимбалюк А.Ф., Малюгин Р.В. Десублимация  $UF_6$  в емкостях с вертикальным оребрением // Теоретические основы химической технологии. – 2020. – Т. 54. - № 1. – С. 52-61.

Материаловедение и технологии материалов / 19

## Исследование мартенситного превращения при деформационном упрочнении аустенитной стали методом сканирующей контактной потенциометрии

**Authors:** Iliia Konstantinov<sup>1</sup>; Robert Gaptrakhmanov<sup>1</sup>; Mikhail Baranov<sup>1</sup>; Vitaliy Surin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРФИ

**Corresponding Author:** konstaniliya@gmail.com

При испытаниях на растяжение аустенитной стали *in situ* исследован процесс образования мартенситной фазы методом сканирующей контактной потенциометрии (СКП). Образец из стали ЭИ847 был испытан на растяжение при комнатной температуре в широком интервале нагрузок (50-650 МПа) в течение нескольких недель с интервалами от одного до пяти дней, в течение которых образец находился в ненагруженном состоянии. Обнаружены три стадии формирования мартенситной фазы. Построены и проанализированы потенциограммы в интервале напряжений от 150 до 650 МПа. Впервые процесс образования мартенситной фазы в аустенитной стали 12X18H10T был исследован методом СКП и дифракции тепловых нейтронов в работах [1,2]. Методика проведения эксперимента на растяжение стали ЭИ847, аппаратура исследования и методы обработки результатов подробно описаны в работах [3-6]. В докладе представлены результаты исследования стадий формирования мартенситной фазы в аустенитной стали ЭИ847 на уровне фиксации  $S=2.523$ . Первая стадия соответствует интервалу напряжений 150-375 МПа. Данной стадии предшествовала процедура начального упрочнения, которая была связана с нагружением образца по прямоугольному профилю и полной разгрузкой перед выходом на более высокий уровень нагрузки. Кроме этого интервалу нагрузок 150-375 МПа предшествовали два периода старения в течение одной недели каждый, после цикла испытаний при нагрузках 12-40 МПа и 46-150 МПа соответственно. Первые признаки мартенсита деформации появляются уже при напряжении 150 МПа на уровне фиксации  $SLS=2.456$  и 2.523. При этой нагрузке шестиугольные концентрические рефлекссы заполняют поле потенциограммы практически однородно. Амплитуда регистрируемого сигнала имеет достаточно высокое значение. Поскольку данная нагрузка соответствует упругой деформации, скольжение дислокаций начинается в отдельных зернах по первичным системам скольжения, которые предпочтительно ориентированы относительно направления нагрузки. Таким образом, уже на этой стадии запускается механизм деформационного упрочнения, приводящий к возникновению в отдельных зернах достаточного по величине напряжения для начала образования мартенсита деформации. При напряжении 150 МПа на потенциограмме видны рефлекссы в виде правильных шестиугольников, большая диагональ которых ориентирована в направлении действующего напряжения (суперпозиция нормального и касательного

напряжений). В центре шестиугольников располагается область высокой деформации, которую окружает область с меньшим значением деформации. Процесс образования смешанной (негомогенной) деформации носит эстафетный характер. В соседнюю область деформационные сдвиги проникают через границу двух областей. Когда шестиугольников на потенциограмме становится много, происходит их объединение в полосы (начало уже при 170 МПа). При дальнейшем увеличении нагрузки продолжается рост числа шестиугольников, а также их объединение в полосы (180 МПа). Сформированная полосовая структура мартенсита особенно заметна при напряжении 190 МПа. Полосы ориентированы под углом 45 градусов относительно направления приложенной нагрузки. Механизм образования пластической деформации и мартенситной фазы тесно взаимосвязаны, что отмечается в работе [7]. Мартенситное превращение происходит под действием упругой деформации. Зародышами мартенсита служат области дислокационных ядер, в которых значение механических напряжений близко к теоретическому пределу прочности. Мартенситное превращение чувствительно к изменению внешнего напряжения: резкое изменение нагрузки в сторону повышения или ее уменьшения может остановить данный процесс, привести к распаду образующейся структуры. Другие стадии формирования мартенсита деформации наблюдаются при более высокой нагрузке от 420 МПа до разрушения образца при напряжении 630 МПа. На языке Python была написана программа, позволяющая определить процентное соотношение различных фаз (цветов) на потенциограмме. Изменение процентного соотношения различных фаз носит некоторый периодический характер, что может представлять научный интерес для дальнейшего исследования этого явления. Данная работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований и выделенным грантом по договору №19-08-00266/20 от 10.01.2019.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абу Газал А.А., Сурин В.И., Бокучава Г.Д., Папушкин И.В. Исследование структурных превращений в сталях с помощью методов сканирующей контактной потенциометрии и дифракции тепловых нейтронов// VII Международная научная школа-конференция (Современные проблемы физики и технологии). Тезисы докладов, ч.2. – М.: НИЯУ МИФИ, 2018. с.179-180.
2. Abu Ghazal A.A., Bokuchava G.D., Papushkin I.V., Surin V.I., Shef E.A. The application of scanning contact potentiometry method and diffraction of thermal neutrons at physico-mechanical tests of materials// KnE Engineering, XIII International Youth Scientific and Practical Conference “FUTURE OF ATOMIC ENERGY - AtomFuture 2017” – Materials of innovative energy.– Dubai, UAE, 2018 («Knowlegde E»), pp. 109-126 (<https://knepublishing.com/index.php/KnE-Engineering/article/view/1611/3814>).
3. Сурин В.И., Польский В.И., Осинцев А.В., Джумаев П.С. Применение метода сканирующей контактной потенциометрии для регистрации образования зародышевой трещины в сталях/ Дефектоскопия, №1, 2019, с. 53-60.
4. Абу Газал А.А., Джумаев П.С., Осинцев А.В., Польский В.И., Сурин В.И. Экспериментальное исследование процесса разрушения стали ЭИ847 методами структурного анализа// Письма о материалах, 2019, выпуск 1, №9, с. 33-38.
5. Алвахеба А.И., Сурин В.И., Иванова Т.Е., Иванов О.В., Бекетов В.Г., Беленок С.К. Результаты обнаружения структурных неоднородностей в сварных соединениях электрофизическим методом в условиях воздействия внешних факторов/ Информационные технологии в проектировании и производстве, М.: ФГУП ВИМИ, выпуск № 1, 2020.
6. Alwaheba A.I., Surin V.I., Ivanova T.E., Ivanov O.V., Beketov V.G., Goshkoderov V.A. Detection of defects in welded joint by scanning contact potentiometry/ Nondestructive Testing and Evaluation, 2020.
7. Штремель М.А. Прочность сплавов. Часть II. М.: МИСИС, 1997.

Физика элементарных частиц / 21

## Global hyperon polarization in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 27$ GeV in the STAR experiment

Author: Egor Alpatov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРФИ

Corresponding Author: egroker1@gmail.com

STAR collaboration measured a global polarization of  $\Lambda$  hyperons in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 7.7 - 200$  GeV. Global hyperon polarization, appearing in non-central nucleus-nucleus collisions due to spin-orbit coupling, reflects initial angular momentum and vorticity of the system. While different theoretical approaches are able to successfully describe global hyperon polarization energy dependence, it is still important to obtain new experimental input for understanding of global polarization nature, especially in the multistrange hyperon sector. In this talk, we will report results of  $\Xi$  hyperon global polarization ( $P_{\Xi^- + \Xi^+}$ ) measurement via different methods for high-statistics Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 27$  GeV.

Ядерные энергетические установки и ядерный топливный цикл / 22

## Разработка методики подготовки мало групповых констант с помощью программ MCU и Serpent для повышения точности диффузионных расчетов реакторов ВТГР

Author: Антон Кругликов<sup>1</sup>

Co-authors: Мария Щуровская <sup>2</sup>; Юрий Волков <sup>2</sup>; Владимир Невиница <sup>3</sup>; Петр Фомиченко <sup>3</sup>; Михаил Зизин <sup>3</sup>

<sup>1</sup> НИЯУ МИФИ, НИЦ Курчатовский институт

<sup>2</sup> НИЯУ МИФИ

<sup>3</sup> НИЦ Курчатовский институт

Corresponding Author: kruglikovantone@gmail.com

В данной работе представлена методика подготовки мало групповых макроконстант с помощью программ MCU и Serpent, реализующих метод Монте Карло, для диффузионных расчетов высокотемпературных ядерных реакторов. Для разработки методики рассмотрены экспериментальные конфигурации критического стенда АСТРА с кольцевой активной зоной и ряд модельных задач, позволяющих протестировать основные методы гомогенизации, реализуемые в MCU и Serpent, для реакторных систем данного типа. Также с использованием модельных задач проведена кросс-верификация программ MCU и Serpent. Помимо модельных задач рассмотрены две экспериментальные конфигурации, для которых выполнен расчетный анализ экспериментов по определению весов органов регулирования и пространственных распределений скоростей реакций деления урана-235 с помощью интеллектуальной

системы SHIPR с применением макроконстант, подготовленных с помощью программы MCU. Сравнивая результаты диффузионных расчетов модельных задач с расчетами методом Монте Карло, сделан вывод о методах подготовки констант и способах гомогенизации для топливных и не топливных областей реактора, для которых обеспечивается наилучшая сходимость результатов диффузионного и прецизионного расчетов. Также представлено сравнение результатов расчетного анализа экспериментальных конфигураций с использованием разработанной методики с ранее выполненными расчетами с использованием макроконстант, подготовленных с помощью программы WIMS и расчетами, выполненными с помощью программы MCU.

Прикладная ядерная физика и теплофизика / 23

## Разработка моделей активной зоны реакторной установки со свинцовым теплоносителем в коде ATHLET

**Authors:** Виктория Алексеевна Чудинова<sup>1</sup>; Сергей Павлович Никонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИЯУ МИФИ

**Corresponding Author:** vachudinova@mephi.ru

В данной работе рассматриваются разработки расчетных теплогидравлических схем активной зоны реактора со свинцовым теплоносителем для кода ATHLET. Исходные данные получены на основе открытой информации по реакторной установке БРЕСТ-ОД-300. Основная цель работы - показать влияние детализации моделирования установки в системе параллельных каналов на распределение параметров теплоносителя в пространстве. В предыдущих работах [1,2] внутриреакторное пространство фактически представляло собой один канал переменного сечения по высоте, нижняя часть которого соединяла четыре независимых опускных камеры каждого контура, а из общего распределительного коллектора реактора поток направлялся к каждой секции контура парогенератора. В данной работе опускной участок моделируется системой параллельных гидравлических взаимосвязанных в поперечном направлении каналов часть из которых непосредственно связана с петлями установки. Кроме того, активная зона от нижнего напорного коллектора реактора до верхнего распределительного коллектора реактора также разделена на систему параллельных взаимосвязанных гидравлических каналов. Разделение на параллельные каналы соответствует группам основных элементов активной зоны. При моделировании активной зоны рассматриваются две гидравлические модели: без поперечных связей параллельных каналов в активной зоне и со связями между каналами. Данные модели будут в дальнейшем использоваться для анализа переходных режимов в реакторной установке с целью оценки влияния используемых моделей на пространственное распределение параметров теплоносителя в активной зоне. Основные результаты работы показывают необходимость дальнейших исследований в направлении 3D моделирования и гидродинамики (учет конвективного и турбулентного межканального обмена) внутриреакторного пространства для реакторов с жидкометаллическим теплоносителем. Для проведения расчетов использовался код улучшенной оценки ATHLET, входящий в программный комплекс АС2, официально полученный Национальным исследовательским ядерным университетом МИФИ на основании ли-

цензионного соглашения с Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Германия. Код ATHLET сертифицирован в России для проведения расчетов стационарных и переходных режимов в реакторах с водяным теплоносителем, однако возможности кода позволяют использовать его с другими типами теплоносителей, включая расплавленный свинец.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chudinova V.A., Nikonov S.P., Thermal-hydraulic model of the reactor facility with lead coolant in the ATHLET code, ICNRP Volga-2018, International conference for young scientists, specialists and post-graduates on Nuclear Reactor Physics, September, 2018г., IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1133 (2018) 012013
2. Чудинова В.А., Никонов С.П., Исследование переходного процесса в реакторе со свинцовым теплоносителем при течи из второго контура в первый, XXI Международная конференция молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам, АО ОКБ "ГИДРОПРЕСС", Подольск, 10-11 апреля 2019 г

Прикладная ядерная физика и теплофизика / 24

## Кольцевой слой – обобщенный одномерный канал

**Authors:** Pisarevskij Maksim

Юлия Писаревская

**Co-author:** Вячеслав Федосеев

**Corresponding Author:** fedvn59@mail.ru

В настоящей работе вводится понятие нового обобщенного одномерного канала – кольцевого слоя. Он включает в себя твердую цилиндрическую стенку и примыкающую к стенке слоя жидкости или газа, на внешней поверхности которого отсутствует поток импульса и достигается максимум скорости. Согласно определению, существует два кольцевых слоя: внешний и внутренний. Для каждого в работе представлены расчётные формулы их геометрических характеристик: площади, смоченного периметра, гидравлического диаметра, кривизны слоя. В зависимости от параметра кривизны кольцевого слоя канал может переходить в плоский, круглую трубы или эквивалентную ячейку пучков стержней различного относительного шага. Рассмотрены задачи распределения скоростей и определения коэффициента гидравлического сопротивления при ламинарном режиме течения теплоносителя в кольцевом слое. Полученные соотношения с высокой точностью согласуются с предельными случаями. Распределение скорости при турбулентном течении теплоносителя в кольцевом канале описывается универсальным профилем скорости. С помощью него получены соотношения для определения отношения максимальной скорости к средней, отклонения максимальной скорости от средней, коэффициента гидравлического сопротивления канала в зависимости от его кривизны. Они, в зависимости от значения параметра кривизны  $\alpha$ , обобщают данные по турбулентному режиму течения жидкости или газа в плоском канале, круглой трубе, кольцевом канале и пучках стержней при гладкой и шероховатой поверхности канала. Указано, что для заданной формы и геометрии шероховатости необходимо знать зависимость второй константы логарифмического профиля от безразмерной высоты. Полученные расчётные формулы могут быть использованы в инженерных расчётах гидравлики теплообменного оборудования.

Прикладная ядерная физика и теплофизика / 25

## Методы аналитического контроля америция-241 и урана в процессе их сорбции на твердофазном экстрагенте на основе ТОДГА

**Author:** Aleksandr Savelev<sup>1</sup>

**Co-authors:** Valeriy Rachkov<sup>1</sup>; Natalia Klochkova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> МЕРФИ

<sup>2</sup> Leading Research Institute of Chemical Technology (VNIKhT)

**Corresponding Author:** aasavelev@mephi.ru

Для исследования массопереноса америция-241 и урана в процессе их сорбции с использованием твердофазного экстрагента на основе N, N, N', N' – тетраоктилдигликольамида (ТВЭКС ТОДГА) использовался метод ограниченного объема. Данный метод предполагает исследование обменного процесс в некотором реакторе с постоянным объемом перемешиваемого раствора. На основании выбранного метода была рассмотрена кинетика сорбции америция-241 и урана на опытных образцах ТВЭКС ТОДГА. Были приготовлены два модельных раствора, в соответствии с предполагаемым составом жидких радиоактивных отходов. Состав этих растворов: 100 г/л или 10 г/л NaNO<sub>3</sub>, ~ 1 г/л U, ~ 0.4 мг/л 241Am, pH 3.4. Аналитический контроль величины объемной активности америция-241 и урана в модельных растворах проведен в лаборатории ИЛРК АО «ВНИИХТ». Контроль величины активности америция-241 проведен с использованием гамма-спектрометрического автоматизированного спектрометра Гамма-1П (ЗАО НПЦ «АСПЕКТ») с широкополосным детектором из особо чистого германия типа BE 2820 фирмы «Canberra». Идентификация спектров и расчет активности произведен с помощью сертифицированной программы SpectraLineGP фирмы ООО «ЛСРМ» для прецизионной обработки спектров. При измерении объемной активности америция-241 использовали гамма-линию 59.54 кэВ. Измерения производили в геометрии флакон-100 мл. Погрешность каждого измерения составила не более 12–13%. Определение урана в модельных растворах, содержащих америций-241, проводили с использованием метода ICP-MS (масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой) на аттестованном приборе Sola фирмы Fennigan MAT. Погрешность каждого измерения составила не более 5%. Все измерения – гамма-спектрометрические с определением америция-241 и масс-спектрометрические для определения урана проводили с использованием соответствующих методик, внесенных в область аккредитации. Содержание америция-241 и урана в образцах ТВЭКС ТОДГА было рассчитано, исходя из уравнений материального баланса. В результате определения содержания америция-241 и урана в процессе их сорбции на ТВЭКС ТОДГА были определены кинетические параметры данного процесса.

## Молекулярно-динамическое исследование спекания диоксида урана

**Authors:** Yuliia Orlova<sup>1</sup>; Lada Kolotova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *ИИТ RAS*

**Corresponding Author:** juliaov00@gmail.com

Благодаря своим уникальным свойствам и разнообразным приложениям в энергетической промышленности, диоксид урана представляет большой технологический интерес. Спекание считается одним из основных процессов при изготовлении таблеток диоксида урана. Несмотря на то, что в данное время существует много работ посвященных спеканию диоксида урана, зависимость данного процесса от взаимной кристаллографической ориентации зерен остается изученной не до конца. В нашей работе рассмотрено влияние различных углов взаимной кристаллографической ориентации наночастиц на коэффициенты поверхностной и зернограничной диффузии урана. Исследование проводилось с использованием потенциала Поташникова, Боярченко [1]. Все расчеты проведены в *nve*-ансамбле в диапазоне температур от 1700 К до 2500 К. Для устранения поверхностных дефектов были использованы периодические граничные условия. Из зависимости коэффициентов диффузии от температуры были получены энергии активации различных механизмов диффузии. Была проверена возможность обобщения результатов, полученных для зависимости уплотнения от времени на двухчастичной модели, на многочастичную систему. Также, была построена модель для оценки вклада различных кристаллографических ориентаций в общий коэффициент зернограничной диффузии. Все расчеты проведены с использованием пакета LAMMPS [2].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поташников С.И. и др. Моделирование массопереноса в диоксиде урана методом молекулярной динамики с использованием графических процессоров // АЭЭ. 2007. Т. 5. С. 86-93.
2. Plimpton S.J. Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics // J Comp Phys. 1995. V. 117. P. 1-19.

Приборы и методы экспериментальной ядерной физики / 27

## Исследование угловых распределений групп мюонов высокой плотности по данным координатно-трекового детектора на дрейфовых камерах

**Authors:** Иван Трошин<sup>1</sup>; Egor Zadeba<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРФ

**Corresponding Author:** i.y.troshin@gmail.com

В НИЯУ МИФИ создается крупномасштабный координатно-трековый детектор ТРЕК на дрейфовых камерах, предназначенный для регистрации околоразнональных групп мюонов высокой плотности. Установка будет состоять из двух плоскостей по 132 дрейфовые камеры. Общая эффективная площадь детектора 250<sup>2</sup>. Совместная работа ТРЕК и ЧВД НЕВОД позволит измерить поток первичных космических лучей в диапазоне энергий от 10<sup>14</sup> до 10<sup>19</sup>эВ. Для исследования групп заряженных частиц высокой плотности, регистрируемых в направлениях близких к вертикальному, определения возможностей полноразмерного детектора и отладки методов реконструкции многочастичных событий, зарегистрированных в нем, создан прототип ТРЕК, состоящий из 14 дрейфовых камер и рабочей площадью 13<sup>2</sup>. Прототип повторяет геометрию расположения дрейфовых камер в полномасштабном детекторе ТРЕК. Доклад посвящен результатам разработки методов реконструкции событий с группами мюонов высокой плотности, зарегистрированных в новом детекторе. Представлены первые результаты исследования групп мюонов в диапазоне зенитных углов от 0° до 60° на данной установке.

Физика элементарных частиц / 28

## Calibration of CENNS-10 liquid argon detector with 83mKr source

**Author:** Ekaterina Kozlova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ИТЕР/МЕРФ

**Corresponding Author:** aspelene@gmail.com

Abstract: CENNS-10 is scintillation-only liquid argon detector which is stationed at the Spallation Neutrino Source (SNS) at Oak Ridge Laboratory as part of COHERENT collaboration CEvNS research. Knowledge of detector response in the low energy region (5-40 keVee) is extremely important for CEvNS study. To that end, the 83mKr source was prepared and the calibration of CENNS-10 with that source was performed. In this work, the technique of 83mKr source development is presented. Calibration results as well as its possible application to other low-energy-threshold detectors are discussed. Two different methods of 9.4 keV and 32.1 keV lines separation are presented. Also comparison with argon version of Noble Element Simulation Technique (NEST) prediction is shown.

Космо- и астрофизика / 29

## Моделирование характеристик 27-дневных вариаций потоков ГКЛ

**Author:** Norayr Galikyan<sup>1</sup>

**Co-authors:** Andrey Mayorov<sup>1</sup>; Rustam Yulbarisov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРФИ

**Corresponding Author:** norayrgalikyan@gmail.com

Работа посвящена воспроизведению 27-дневных вариаций потока галактических космических лучей (ГКЛ), наблюдавшихся в эксперименте PAMELA, при помощи моделирования распространения ГКЛ в гелиосфере. Построена карта электромагнитного поля в межпланетном пространстве в соответствии с моделью Паркера и экспериментальными измерениями, сделанными космическим аппаратом ACE. Создан алгоритм, который численно решает уравнение движения космических лучей в этом поле и восстанавливает их траекторию. Генерируются заряженные частицы на границе гелиосферы и осуществляется их трассировка с использованием разобранного алгоритма. Начальные характеристики частиц таковы, что формируется их изотропное и однородное распределение. В результате расчетов получены временные зависимости потока космических лучей для нескольких энергий в околоземном пространстве в период с 2007 по 2008 год и проведено сравнение с измерениями в эксперименте PAMELA.

Ядерные энергетические установки и ядерный топливный цикл / 30

## Параллельные вычисления нестационарных процессов в ядерном реакторе

**Author:** Soldatov Evgenii<sup>1</sup>

**Co-authors:** Volkov Yuri<sup>1</sup>; Kruglikov Anton<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРФИ

**Corresponding Author:** eo-soldatov@mail.ru

В РНЦ «Курчатовский институт» имеется критический стенд АСТРА, на котором проводятся эксперименты по изучению нейтронно-физических особенностей реакторов типа ВТГР. Информация по оцененным экспериментам в настоящее время существует только для стационарных экспериментов и отсутствует для нестационарных, более того, в настоящее время еще не выполнен расчетный анализ большинства нестационарных экспериментов. Последняя задача требует расчета при помощи нейтронно-физического кода, который может решать нестационарные задачи с учетом пространственного распределения поля нейтронов. При рассмотрении сложных нейтронно-физических систем с числом расчетных точек более 1 миллиона, время расчета может составлять час и более, а в случае нестационарного процесса с малым шагом по времени ожидание может составлять месяц. АСТРА является сложной системой с количеством расчетных точек порядка 1 миллиона. Для ускорения нестационарного расчета могут быть использованы параллельные технологии. Целью

исследования является внедрение эффективных методов стационарного вычислительного моделирования с использованием технологии распараллеливания в модуль для расчета нестационарных процессов. Разработана схема распараллеливания с разделением расчетных слоев по высоте. Проведен расчет нестационарных экспериментов с использованием параллельных технологий. Исследована эффективность разработанной параллельной схемы.

Материаловедение и технологии материалов / 31

## Применение аморфного припоя Ti-Zr-Be для соединения «умного» вольфрамового сплава и стали

**Author:** Диана Бачурина<sup>1</sup>

**Co-authors:** Алексей Сучков ; Олег Севрюков

<sup>1</sup> НИЯУ МИФИ

**Corresponding Author:** dmbachurina@mephi.ru

Из-за возможного возникновения аварии с потерей теплоносителя в термоядерном реакторе DEMO в настоящее время разрабатывают, так называемые, самопассивирующиеся «умные» вольфрамовые сплавы (Smart Alloys) [1]. Их основное преимущество – предотвращение окисления чистого вольфрама. Один из них – сплав W-Cr-Y. Данный сплав разрабатывается, как материал, обращенный к плазме, следовательно, он должен быть соединен с конструкционным материалом – сталью. Для этого в данной работе применяли высокотемпературную пайку. Пайка имеет несколько преимуществ: она не требует высокого давления и дешевле по сравнению с горячим изостатическим прессованием (ГИП). Более того, пайка позволяет производить локальную замену конкретного поврежденного компонента, что важно, поскольку количество панелей в элементах плазменной установки достаточно велико [2]. Для этой цели удобны сплавы-припои в виде тонкой фольги. Однако, состав таких сплавов должен состоять только из малоактивируемых элементов [3] из-за требований к материалам DEMO. В настоящее время не существует сплава-припоя, состоящего только из таких элементов и подходящего к задаче соединения стали с вольфрамовыми сплавами. Кроме того, невозможно добиться прямого соединения вольфрама и стали из-за сильной разницы в их физических свойствах, особенно в коэффициенте теплового расширения. Эта разница вызывает высокие термические напряжения и дальнейшее разрушение [4]. Поэтому, обычно используются прослойки, снижающие напряжения. Для этих целей в данной работе использовали прослойку из тантала. Пайку проводили с помощью полностью малоактивируемого припоя 48Ti-48Zr-4Be мас. %. Применяемые режимы пайки: № 1 - 950 °C / 30 мин, № 2 - 1100 °C / 60 мин + 720 °C / 180 мин. № 2 был использован для исследования влияния традиционной термической обработки стали на микроструктуру «умного» вольфрамового сплава и паяного шва. Показано, что одновременная пайка и термообработка стали с температурой выше 1000 °C невозможна из-за распада твердого раствора W-Cr. Однако пайка даже при 950 °C сохраняет микроструктуру «умного» сплава. Паяное соединение с промежуточным слоем Ta может выдерживать не менее 100 циклов нагрева и охлаждения в интервале 600 °C-300 °C и, как ожидается, даже больше, поскольку не

наблюдалось макродеградации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. F. Koch, H. Bolt, Self passivating W-based alloys as plasma facing material for nuclear fusion, Phys. Scr. T. T128 (2007) 100–105. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/2007/T128/020>.
2. N. Litunovsky, E. Alekseenko, A. Makhankov, I. Mazul, Development of the armoring technique for ITER Divertor Dome, Fusion Eng. Des. 86 (2011) 1749–1752. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2011.02.050>.
3. M.R. Gilbert, J.C. Sublet, Handbook of activation, transmutation, and radiation damage properties of the elements simulated using FISPACT-II & TENDL-2015 for Magnetic Fusion Plants, Culham, 2016.
4. D. Bachurina, A. Suchkov, B. Kalin, O. Sevriukov, I. Fedotov, P. Dzhumaev, A. Ivannikov, M. Leont'eva-Smirnova, E. Mozhanov, Joining of tungsten with low-activation ferritic-martensitic steel and vanadium alloys for demo reactor, Nucl. Mater. Energy. 15 (2018) 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2018.03.010>.

Ядерные энергетические установки и ядерный топливный цикл / 32

## **Разработка одномерной модели теплогидравлики, предназначенной для исследования устойчивости реактора с паровым теплоносителем сверхкритического давления.**

**Author:** Artavazd Sujyan

**Corresponding Author:** artavazd1994@gmail.com

Проблема устойчивости работы ядерных реакторов с теплоносителями сверхкритического давления представляет интерес на протяжении длительного времени. Однако, она по сей день считается недостаточно изученной и регулярно включается в перечень задач МАГАТЭ в рамках проектов по разработке ядерных энергетических установок данного типа. Неустойчивость может возникать при вносимых в систему возмущениях. Существует два основных ее типа: теплогидравлическая, которая характеризуется несохранением параметров движения и параметров теплоотдачи в процессе работы реактора и нейтронно-теплогидравлическая, которая заключается в несохранении стабильности процессов энерговыделения и съёма тепла в активной зоне. Разработка численной модели, предназначенной для решения текущей задачи, вызывает сложности. Стандартный алгоритм SIMPLE для связи давления и скорости принят во многих коммерческих кодах CFD. Однако, он сталкивается с проблемой сходимости, когда используется для численного анализа нестационарных течений сжимаемых теплоносителей в обогреваемых каналах. Для создания одномерной модели теплогидравлики реактора с паровым теплоносителем сверхкритического давления был создан модифицированный алгоритм, на основании SIMPLE. При построении расчетной модели применялся подход, заключающийся в использовании основных уравнений теплогидравлики, представленных в конечных разностях. Объектом моделирования являлась труба цилиндрической формы с заданным внутри нее энерговыделением и гидравлическим сопротивлением (имитация твэлов). В качестве входных параметров использовались данные для концепции реактора ПСКД-600. По окончании расчета ожидалось выйти на стационарный режим, соответствующий номинальному для этой концепции ЯЭУ. В результате работы алгоритма была получена картина установления полей скорости, давления и температур. Было выполнено сравнение получившихся значений с ожидаемыми. Сделан вывод о корректной работе модели и возможности ее применения для анализа устойчивости реактора с паровым теплоносителем сверхкритического давления.

## Investigating the microstructural homogeneity and deformation behavior of steel standard specimen

**Authors:** Ayman Abu Ghazal<sup>1</sup>; Vitaly Surin<sup>2</sup>

**Co-authors:** Z Qudah<sup>1</sup>; Anas Alwaheba<sup>1</sup>; Isam Alomar<sup>1</sup>; Sara AlKhdour<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Jordan Atomic Energy Commission*

<sup>2</sup> *MEPhI*

<sup>3</sup> *Jordan University of Science and Technology*

**Corresponding Author:** gazal.ayman@yandex.ru

### INTRODUCTION

Steel is an integral alloy used in many applications due to its superior properties that makes it the best choice. The fields where Steel can be used are enormous ranging from the production of sealed radioactive source capsules in research reactors up to the huge reactor vessel in a nuclear power plant. Such wide range of applications makes non-destructive testing (NDT) a fundamental part of the life-cycle of a nuclear industry. It supports, the purpose of investigating and identifying any discontinuities that might or might not be present. Discontinuities are of various types, including cracks, pores or any non-homogeneity that might have an effect on the performance of the test object while in service [1]. NDT would be the ultimate tool for monitoring such discontinuities and understanding the mechanisms which affect the mechanical properties of the component in order to be able to stay updated with the current status of the test object, in addition to the prediction of the expected lifetime for it too [2].

### EXPERIMENTAL PROCEDURE

Scanning contact potentiometry (SCP) is a new non-destructive testing method that provides the opportunity to assess the internal structure of a test object's material without causing any damage. SCP technique opens up the opportunity for real-time NDT of surface stress and strain, plastic deformation mechanisms, stages of development of internal flaws up to the point of material failure [3,4]. In the Material Testing Laboratory, at Jordan Atomic Energy Commission, experiments were conducted under ambient conditions using standard reference specimen made up of steel. In order to perform the SCP test, a semi-automated scanner device, was designed and manufactured. Measured data is automatically recorded and saved to a special measuring information system (MIS). SCP was performed before and after a tensile test was conducted on a steel specimen. The uni-axial tensile test was performed using the universal testing machine H50KS existed in the laboratory [5]. In order to study the early stages of deformation, the tensile test was terminated when the specimen exceeded the elastic region and entered the plastic one, where the values of both stress and strain were ( $\sigma_{max}=354.5$  MPa,  $\epsilon_{max}=5.2$  %), respectively. The test using the SCP was conducted at a scanning speed of 0.3 mm/s along the surface of the specimen using 6 tracks which covered most of the surface area of the gauge.

### RESULTS

Results obtained from the, SCP, performed on the steel standard reference material specimens, were represented using potentiograms [6]. The potentiograms obtained show clearly the moment of formation of micro-deformations within the internal structure of the specimen, due to the tensile strain it is exposed to, causing the detection of a structural level signal (SLS  $\approx 5$ ) which is equivalent to 10  $\mu$ V. The moment at which micro-deformations appeared was further proved by the results obtained from full width at half maximum (FWHM) of distribution histograms at (SLS $\approx 5$ ) before and after the tensile test was conducted. The values obtained from the FWHM distribution histograms of contact potential differences, measured at the surface, were found to be lower after the tensile test. Furthermore, it was

observed that new micro-deformations peaks appeared in the histograms after the tensile test have been performed, which were not present before the test, confirming the efficiency of this method in detecting materials' deformation.

## REFERENCES

1. Charles Hellier (2003). Handbook of Nondestructive Evaluation. McGraw-Hill. p. 1.1. ISBN 978-0-07-028121-9.
2. Application of non-destructive testing and in-service inspection to research reactors: Results of a co-ordinated research project. (2001). Vienna: International Atomic Energy Agency.
3. A.A. Abu Ghazal, P.S. Dzhumaev, A.V. Osintsev, V.I. Polsky, V.I. Surin. Experimental investigation of the failure of steel AISI 316 by the methods of structural analyses. Lett. Mater., 2019, 9(1) 33-38 BibTex <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2019-1-33-38>
4. V I Surin et al 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1636 012017
5. Ayman Abu Ghazal (2020) The Process of Maintenance and Assessment of The Universal Testing Material Machine H50KS. J Mater sci Appl 4: 1-12.
6. Abu Ghazal, A.; Surin, V.; Bokuchava, G.; Papushkin, I. In international conference Condensed Matter Research at the IBR-2; Joint Institute for Nuclear Research: Dubna, Russia, 2020; pp 115-116.

**Ядерные энергетические установки и ядерный топливный цикл / 34**

## **Influence of errors in one-group constants and / or neutron flux spectrum on uncertainty of nuclide number densities in the burn-up calculations in cells with different spectrum**

**Author:** Александр Писарев

**Corresponding Author:** a.n.pisarev93@gmail.com

The main researches on the assessment of the influence of uncertainties in nuclear data on re-actor calculations were devoted to the influence of these uncertainties on the effective multiplication factor by introducing the so-called sensitivity coefficients. Only a small part of them were devoted to their influence on the nuclide number densities. On the other hand, uncertainties in reaction rates, neutron flux density, and other quantities can lead to significant distortions in the results; therefore, it is important to be able to determine the effect of such uncertainties on different nuclear densities during burn-up calculations. Computational studies have been performed showing a complex time dependence of the uncertainties of nuclide number densities due the errors in one-group constants and / or neutron flux spectrum in the burn-up calculations in cells with different spectrum. In our calculations, we used the VisualBurnOut program developed at the IATE NRNU MEPhI, which allows us to estimate these uncertainties arising from inaccurate knowledge, for example, of one-group constants. Uncertainties in one-group constants can be estimated, for example, using the ERROR module, the NJOY software package. It was found that this uncertainty not only depends on the burn-up time in a complicated way, but also depends on the neutron spectrum. Variants of a cell with a thermal and fast neutron spectrum are considered.

Приборы и методы экспериментальной ядерной физики / 35

## Тестирование элементов сцинтилляционного мюонного годоскопа.

**Author:** Максим Целиненко<sup>1</sup>

**Co-author:** Nikita Pasiuk<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИЯУ МИФИ

**Corresponding Author:** makson.tsel@gmail.com

В настоящее время в НИЯУ МИФИ создается мюонный годоскоп для мюонографии различных объектов. Годоскоп представляет собой многослойную многоканальную детектирующую систему, состоящую из тонких длинных сцинтилляционных стрипов со светосбором на основе спектросмещающих оптических волокон (файберов). Измерение сигналов со стрипов осуществляется с помощью кремниевых фотоумножителей (SiPM). Сборка из 64 сцинтилляционных стрипов, уложенных в единый светоизолированный корпус, образует базовый модуль детектирующей системы годоскопа. Два смежных базовых модуля образуют отдельный детектирующий слой. Два детектирующих слоя, уложенных перпендикулярно друг другу, формируют координатную плоскость. Конечная конструкция годоскопа включает в себя четыре координатных плоскости из 1024 сцинтилляционных стрипов и соответствующего количества SiPM. В докладе обсуждаются методика и результаты массового тестирования и отбора сцинтилляционных стрипов и кремниевых фотоумножителей, из которых был создан полноразмерный прототип базового модуля нового мюонного годоскопа.

Приборы и методы экспериментальной ядерной физики / 36

## Моделирование отклика детектора ТРЕК при регистрации групп мюонов от первичных космических лучей сверхвысоких энергий

**Author:** Roman Nikolaenko<sup>1</sup>

**Co-authors:** Egor Zadeba<sup>1</sup>; Иван Трошин<sup>1</sup>; Евгений Хомчук<sup>1</sup>; Владислав Воробьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРФ

**Corresponding Author:** rvnikolaenko@mephi.ru

В НИЯУ МИФИ создаётся крупномасштабный координатно-трековый детектор на дрейфовых камерах ТРЕК, предназначенный для регистрации околоразрывного потока мюонов широких атмосферных ливней (ШАЛ), образованных взаимодействием космических лучей сверхвысоких энергий с атмосферой Земли. ТРЕК состоит из двух плоскостей, в каждой из которых размещены 132 дрейфовые камеры. В одной плоскости камеры расположены вертикально, а в другой – горизонтально, что позволяет определять пространственные углы регистрируемой группы. Для правильной интерпретации получаемых на установке данных, в частности, оценки влияния окружающих детектор конструкций на образование вторичных частиц в

региструемых событиях, создан комплекс программного обеспечения для Монте-Карло моделирования детектора ТРЕК, включающий в себя программы CORSIKA, Geant4 и Garfield++. Геометрия детектора, его несущих конструкций и здания достаточно сложна, и задать их в Geant4 методами самого пакета моделирования затруднительно. По этой причине в САПР (КОМПАС-3D) создана твердотельная модель детектора, которая затем транслирована в физические тела Geant4 с помощью дополнительного пакета CADMesh. Моделирование большинства задач, которые будут решаться на создаваемом детекторе, требует использования пространственного и энергетического распределений частиц, близких к тем, которые наблюдаются в ШАЛ. Для генерации таких событий в программе CORSIKA моделируются ШАЛ от космических лучей сверхвысоких энергий под большими зенитными углами. Поскольку напрямую использовать данные CORSIKA для загрузки в программу моделирования ТРЕК в Geant4 проблематично, разработан алгоритм смены формата записи данных о частицах ШАЛ, получивший название IGESICA. Данный алгоритм позволяет генерировать большие серии событий ( $\sim 10^5$  для ливней от первичной частицы энергии  $10^{18}$ ), пригодные для загрузки в программу моделирования детектора в Geant4, на основе единственного ШАЛ. В докладе представлена общая схема программного комплекса, описание конструкции детектора ТРЕК, результаты трансляции его геометрии в Geant4 и описание текущей работы с CORSIKA. В докладе разобраны методы, используемые для первичного анализа событий в Geant4 и передачи данных о проходящих через камеры частицах в Garfield++, описано устройство алгоритма IGESICA и приведены результаты моделирования регистрации групп мюонов в установке.

Физика элементарных частиц / 37

## **Исследование возможности использования различных теоретических моделей для получения сечений ядерных реакций при промежуточных и высоких энергиях**

Author: Viet Vu

Corresponding Author: vkinds93@gmail.com

В настоящее время одним из перспективных и практических способов расчета выходов ядер и характеристик частиц, образующихся в реакциях глубокого расщепления, является метод внутриядерного каскада нуклонов, дополненный испарительной моделью и моделью деления (для делящихся ядер), и иногда предравновесной экситонной моделью. Расчёт с помощью современных программ TALYS, CEM03, CASCADE/INPE с использованием различных комбинаций моделей (модели внутриядерного каскада, экситонной модели, испарительной модели Вайскопфа-Ивинга или Хаузера-Фешбаха) показывает, что при увеличении массового числа ядер выход частиц увеличивается; а роль стадии реакции, описываемой предравновесной экситонной моделью, в эмиссии частиц уменьшается. Для легких ядер мишени эта стадия реакции имеет важную роль при моделировании ядерных реакций нуклон + ядро. При относительно небольших энергиях падающих частиц расчёты сечений продуктов образования остаточных ядер по испарительной модели Хаузера-Фешбаха дают заметно лучшие результаты, чем при использовании модели Вайскопфа-Ивинга. Примеры расчетов по разным моделям взаимодействия протонов с энергиями от нескольких десятков МэВ до ГэВ, налетающих на ядра, представлены.

Приборы и методы экспериментальной ядерной физики / 38

## Центральная трековая система эксперимента BM@N

**Author:** Andrei Galavanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРИ, JINR

**Corresponding Author:** wazold@bk.ru

Эксперимент BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) является стартовым экспериментом в рамках мегасайенс проекта NICA в Объединенном Институте Ядерных Исследований. Целью эксперимента является изучение взаимодействий пучков тяжелых ионов (вплоть до Au) с фиксированными мишенями в диапазоне энергий  $\sqrt{(S_{NN})} = 2.3 \div 3.5$  ГэВ. Такие энергии хорошо подходят для изучения мезонов и гиперонов, имеющих в составе s-кварки, а также для изучения рождения гиперядер, образующихся при слиянии  $\Lambda$ -гиперонов с нуклонами. Импульсы заряженных частиц, рожденных в ядро-ядерных столкновениях, определяются по кривизне их траекторий в магнитном поле. Траектории движения заряженных частиц определяются при помощи центральной трековой системы. Основой центральной трековой системы эксперимента BM@N являются газовые электронные умножители (GEM). Детекторы такого типа обладают высоким пространственным разрешением, способны работать в сильных магнитных полях и в условиях высокой множественности заряженных частиц (до 105 Гц/см<sup>2</sup>). Центральная трековая система эксперимента BM@N располагается внутри анализирующего магнита (с магнитным полем до 1 Тл) после мишени. В полной конфигурации трековая система будет состоять из четырнадцати GEM-детекторов, объединенных в семь плоскостей. В докладе представлено описание трековой системы эксперимента, приведены результаты тестирования детекторов на пучках Нуклотрона, текущее состояние работ и дальнейшие планы.

Прикладная ядерная физика и теплофизика / 39

## Скорость генерации пара при кипении наножидкости под действием солнечного излучения

**Author:** Дмитрий Кузьменков<sup>1</sup>

**Co-authors:** Павел Стручалин<sup>1</sup>; Кирилл Куценко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный Исследовательский Ядерный Университет МИФИ

**Corresponding Author:** dmkuzmanov@mephi.ru

В последнее время широкое распространение получила идея применения мелкодисперсных суспензий с характерным размером твердой фракции от 10 до 500 нм (т. н. наножидкости) в солнечных коллекторах для локализации поглощения излучения непосредственно в рабочем теле (теплоносителе). В зависимости от типа и назначения солнечного коллектора рабочее тело может претерпевать фазовые превращения, а полученный пар может быть использован для совершения работы на турбине. В научной литературе показана принципиальная возможность создания таких солнечных коллекторов [1-4], однако не представлено общих рекомендаций по выбору

оптимальных технологических параметров и характеристик наножидкости. В этом случае, для определения оптимального состава наножидкости требуется проведение большого количества однотипных экспериментов, которые жестко связаны с конкретными условиями протекания процесса (геометрия, состав наножидкости и пр.) и, следовательно, ограничивающих область применимости результатов. Целью настоящей работы является разработка и валидация упрощенной аналитической модели кипения наножидкости под действием солнечного излучения (модель кипения НЖ), которая позволит рассчитывать скорость генерации пара и зависимость этой величины от основных параметров наножидкости. Предлагаемая модель кипения НЖ основана на базовом предположении о том, что паровой пузырь образуется вокруг перегретого агломерата наночастиц в области жидкости, прилегающей к облучаемой поверхности, в которой происходит поглощение большей части падающего излучения (зона кипения) [4]. Паровой пузырь растет и достигает размеров зоны кипения в некоторый (критический [5]) момент времени, после чего покидает объем наножидкости без дальнейшего изменения размера. Скорость генерации пара при этом можно рассчитать, как отношение количества пара в зоне кипения к критическому времени [5]. Предложенная модель кипения НЖ была валидирована по двум наборам экспериментальных данных, полученным на лабораторной установке и на прототипе солнечного коллектора с замыканием цикла конденсата. В экспериментальном исследовании использовалась наножидкость на основе воды с добавлением частиц оксида железа Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (средний размер агломератов ~1.3 мкм). Модель кипения НЖ описывает экспериментальные данные со средней невязкой 4.2% при максимальной – 11%. Предложенная модель может быть использована для простой оценки скорости генерации пара при фототермическом кипении НЖ и оптимальных параметров НЖ, при которых скорость генерации пара максимальна. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90306.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. O. Neumann, et al. Compact solar autoclave based on steam generation using broadband light-harvesting nanoparticles // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, vol. 110 (29), pp. 11677-11681.
2. T.P. Otanicar, et al. Nanofluid-based direct absorption solar collector // *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2010, vol. 2 (3), 33102.
3. L. Shi, Y. He, Y. Huang, B. Jiang. Recyclable Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@CNT nanoparticle for high-efficiency solar vapor generation // *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 149, pp. 401-408.
4. E.T. Ulset, et al. Photothermal boiling in aqueous nanofluids // *Nano Energy*, 2018, vol. 50, pp. 339-346.
5. M. Dietzel, D. Poulikakos, On vapor bubble formation around heated nanoparticles in liquids // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, vol. 50, pp. 2246-2259.

Прикладная ядерная физика и теплофизика / 40

## Исследование эффективности солнечного коллектора прямого поглощения

**Author:** Vladimir Yunin

**Corresponding Author:** vsyunin@gmail.com

Солнечный коллектор представляет собой устройство для сбора тепловой энергии Солнца (гелиоустановка). В отличие от солнечных батарей, производящих электричество, солнечный коллектор предназначен, как правило, для фототермического на-

грева теплоносителя для нужд горячего водоснабжения и отопления помещений [1,2]. Ещё одной областью применения солнечного коллектора может быть опреснение воды [3,4]. Несмотря на достаточно большой процент поглощенного коллектором падающего света (порядка 95% [5]), запасённая теплоносителем энергия для выработки электричества почти не используется. К тому же из-за высоких капитальных и эксплуатационных затрат технология коллекторов не пользуется популярностью. В работах [6-9] рассматривается вопрос повышения эффективности солнечных коллекторов посредством зачернения (нанесением на поверхность особой чёрной краски либо специального раствора), увеличением площади поверхности рабочего участка (т.н. абсорбера – резервуара с теплоносителем, который и поглощает солнечный свет) и варьированием теплоносителя. Целью работы было изучение влияния температуры окружающей среды, зачернения (покрытия поверхности стеклянных трубок непрозрачной фольгой черного цвета) и расхода теплоносителя на перепад температур между входом и выходом из рабочего участка коллектора для определения эффективности коллектора и её сравнения с эффективностью промышленных установок. Для выполнения поставленной задачи был создан опытный солнечный коллектор из системы стеклянных трубок с возможностью изменения угла наклона абсорбера. В качестве теплоносителя использовалась дистиллированная вода. Над рабочей поверхностью была установлена система прожекторов, моделирующих солнечный свет, с возможностью изменения яркости. Таким образом, была создана система, позволяющая проводить исследования в условиях, максимально приближенных к реальным. В ходе экспериментов на прозрачных трубках и трубках, покрытых непрозрачной чёрной фольгой, изменялись, расход и температура окружающей среды (поднималась и понижалась). Анализ полученных экспериментальных данных позволил сделать вывод, что эффективность созданного солнечного коллектора близка к эффективности промышленных образцов. Поскольку созданный коллектор обладает простой конструкцией и, как было выяснено в ходе экспериментов, по эффективности почти соответствует промышленным, его можно использовать для дальнейшего исследования эффективности солнечного коллектора прямого поглощения с использованием наножидкости в качестве теплоносителя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айдаров З.М., Тигиев А.Т. Применение солнечных коллекторов для теплоснабжения сельскохозяйственных и коммунально-бытовых объектов//Научные труды студентов Горского государственного аграрного университета “Студенческая наука – агропромышленный комплекс”, М: Горский государственный аграрный университет (Владикавказ), 2019, с.67-68.
2. Орзиматов Ж.Т., Каршиев Ш.Ш., Жураев О.А. Солнечный воздушный коллектор с отводом тепла от фотоэлектрического модуля для круглогодичного использования теплоснабжение зданий // Актуальные проблемы строительства, жилищно-коммунального хозяйства и техносферной безопасности. Материалы VI Всероссийской (с международным участием) научно-технической конференции молодых ученых. Под общей редакцией Н. Я. Ермиловой, И. Е. Степановой., М: Волгоградский государственный технический университет (Волгоград), 2019, с.394-396.
3. D.M.Kuzmenkov, M.I.Delov, K.Zeynalyan, P.G.Struchalin, S.Alyaev, Y.He, K.V.Kutsenko, B.V.Balakin Solar steam generation in fine dispersions of graphite particles//Renewable Energy, Volume 161, December 2020, Pages 265-277.
4. P.G.Struchalin, H. Thon, D.M. Kuzmenkov, K.V. Kutsenko, P.Kosinski, B.V. Balakin Solar steam generation enabled by iron oxide nanoparticles: Prototype experiments and theoretical model// International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 158, September 2020, 119987.
5. Лапина С.Д., Поспелова И.Ю. Солнечные коллекторы как альтернативные источники энергии // Развитие науки и техники: механизм выбора и реализации приоритетов.

Сборник статей Международной научно-практической конференции. - Уфа: АЭТЕРНА, 2017. - С. 110-111.

6. Villicana-Ortiz E, Gutierrez-Trashorras AJ, Paredes-Sanchez JP, Xiberta-Bernat J. Solar energy potential in the coastal zone of the Gulf of Mexico. *Renewable Energy* 2015; 81:534–42.

7. Singh RV, Kumar S, Hasan M, Khan ME, Tiwari G. Performance of a solar still integrated with evacuated tube collector in natural mode. *Desalination* 2013; 318:25–33.

8. Sharma N, Diaz G. Performance model of a novel evacuated tube solar collector based on minichannels. *SolEnergy* 2011; 85:881–90.

9. Kalogirou S. The potential of solar industrial process heat applications. *Appl Energy* 2003; 76:337–61.

## Прикладная ядерная физика и теплофизика / 41

### **Влияние наведенной конвекции на теплоотдачу при кипении воды**

**Author:** Nihat Yanar<sup>1</sup>

**Co-authors:** Soufiane Laouar <sup>2</sup>; Кирилл Куценко <sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРФ

<sup>2</sup> Nuclear Research Centre of Birine

**Corresponding Author:** nihatyandar@yandex.com

Работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию влияния внешней наведенной конвекции на теплоотдачу от горизонтальных нагревателей в условиях большого объема насыщенной воды при атмосферном давлении. Для проведения экспериментов по определению влияния наведенной конвекции на теплоотдачу к воде в условиях большого объема была разработана и изготовлена экспериментальная установка. Установка состояла из термостата LOIP LT-424В, автоматизированной системы управления экспериментами и рабочих участков. Нагрев рабочих участков производился за счет джоулева нагрева при пропускании по ним переменного электрического тока. Два нагревателя располагались горизонтально относительно поля силы тяжести один над другим в одной плоскости с вектором силы тяжести. Конструкция рабочего участка позволяла изменять расстояния между тепловыделяющими элементами и задавать тепловой поток  $q$  независимо на каждом из нагревателей. При проведении экспериментов измерялись значение транспортного тока  $I$  и падение напряжения  $U$  на каждом нагревателе, по которым рассчитывалась плотность теплового потока  $q$ , а также измерялись температуры их теплоотдающих поверхностей. При проведении экспериментов на нижнем нагревателе фиксировалась плотность теплового потока  $q_2$ , которая задавала интенсивность внешней конвекции. Далее на верхнем нагревателе задавалась плотность теплового потока  $q_1$ , а по показаниям трех термопар определялся средний перегрев теплоотдающей поверхности. Далее плотность теплового потока  $q_1$  увеличивалось на величину, не превышающую 5% от предыдущего и все измерения повторялись. В экспериментах можно было менять расстояние между тепловыделяющими элементами  $b$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ АНАЛИЗ

В результате анализа экспериментальных данных было найдено, что наведенная конвекция существенно увеличивает коэффициент теплоотдачи в режиме естественной конвекции и практически не влияет на теплоотдачу в режиме пузырькового кипения. Для количественного описания эффекта интенсификации теплоотдачи в зависимости от условий внешней наведенной конвекции (тепловых потоков  $q_1$ ,  $q_2$  и расстояния между нагревателями  $b$ ) была разработана физическая модель. Результаты расчета по модели хорошо согласуются с экспериментальными данными авторов.

### ВЫВОДЫ

1. Наведенная конвекция увеличивает коэффициент теплоотдачи в режиме естественной циркуляции, но практически не влияет на теплоотдачу в режиме пузырькового кипения. 2. Предложенная физическая модель для расчета интенсификации теплоотдачи за счет наведенных конвективных токов хорошо описывает результаты экспериментального исследования. Полученные результаты представляют интерес при расчете горизонтальных теплообменников и парогенераторов.

## Ядерные энергетические установки и ядерный топливный цикл / 42

### **Анализ перспективных методов трансмутации минорных актинидов в подкритичных системах, управляемых внешним ускорителем заряженных частиц**

**Author:** Sergey Ryzhov

**Co-author:** Vyacheslav Pershukov

**Corresponding Author:** snryzhov@mephi.ru

Среди различных методов трансмутации минорных актинидов (МА), существует и развивается методика трансмутации и выжигания МА в подкритичных системах с внешним ускорителем заряженных частиц (ПСУ). Системы трансмутации, управляемые ПСУ, состоят из высокоинтенсивного ускорителя, мишени из тяжёлого металла, преобразующей ускоренные заряженные частицы в нейтроны, и подкритической сборки с эффективным коэффициентом размножения нейтронов меньше единицы. На данный момент можно выделить три основных направления использования ПСУ: - использование ПСУ для уменьшения количеств отработавшего ядерного топлива или его элементов, а также радиоактивных отходов (РАО), путём их трансмутации; - использование ПСУ для производства энергии в качестве ядерного реактора с активной зоной, находящейся в подкритическом состоянии; - использование ПСУ для производства нового топлива из сырьевых нуклидов, путем облучения данных нуклидов в поле свободных нейтронов. При этом нейтроны образуются в результате реакции деления в мишени, состоящей из делящихся и сырьевых нуклидов. Системы трансмутации, управляемые ускорителем заряженных частиц, состоят из высокоинтенсивного ускорителя, мишени из тяжёлого металла, преобразующей ускоренные заряженные частицы в нейтроны, и подкритической сборки с эффективным коэффициентом размножения нейтронов ниже единицы. На данный момент, имеется множество научных работ, исследующих возможность трансмутации МА в ПСУ. Одним из наиболее перспективных проектов в данной области, является совместная работа технологического университета Брно и Лаборатории вопросов ядерной безопасности Объединённого института ядерных исследований. С начала 1990 года здесь осуществляется проект “Энергия и трансмутация радиоактивных отходов” (Э&Т РАО). Над этим проектом работает международная группа, которая занимается экспериментами

по трансмутации, измерением сечений реакций, вычислением нейтронных потоков и моделированием по методу Монте-Карло. На данный момент были достигнуты значительные успехи в данной области. Подобные эксперименты также проводятся во многих странах, таких как Япония, Китай и Франция, однако пока они находятся на стадиях подготовки или проведения экспериментов. В ходе работы, был проведен анализ преимуществ и недостатков данного метода трансмутации и выжигания МА. Были рассмотрены наиболее перспективные направления, а также выделены текущие проблемы, уменьшающие эффективность метода.

**Приборы и методы экспериментальной ядерной физики / 43**

## **Passive shielding of the RED-100 detector in an experiment to study the CENNS process**

**Authors:** Anton Lukyashin<sup>1</sup>; on behalf of the RED collaboration

<sup>1</sup> МЕРФИ / MSU

**Corresponding Author:** lukyashin.anton@physics.msu.ru

A combined passive shielding of the RED-100 two-phase emission detector has been developed and created, which provides protection from external gamma background and neutron background. The shield is a 5 cm thick copper layer (the inner layer is near the detector) and a water layer with a total thickness of ~ 70 cm. The shielding efficiency has been obtained via the Monte Carlo simulation. Also experimental verification in laboratory conditions using a NaI(Tl) scintillation detector has been done. So the calculated gamma-background attenuation coefficient for the copper shielding, and the complete shielding has been estimated at both approach.

**Материаловедение и технологии материалов / 44**

## **Investigation of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti joint microstructure, brazed with Ti-Zr-Co filler metal**

**Authors:** Anastasiia Khvorostova<sup>1</sup>; Ivan Fedotov<sup>1</sup>; Олег Севрюков<sup>1</sup>; Алексей Сучков<sup>1</sup>; Milena Penyaz<sup>1</sup>; Pavel Dzhumaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРФИ

**Corresponding Author:** nastia164@mail.ru

The aim of this work is microstructure study, elemental analysis and corrosion test of alumina/titanium joint brazed with Ti-Zr-Co filler metal in order to propose a new design of femoral head with increased reliability for hip joint endoprosthesis. Currently, hip joint endoprostheses are widely used for people with diseases of the musculoskeletal system. The most common endoprostheses – with a ceramic-ceramic friction pair. However, their usage for people with an active lifestyle is not widely distributed due to the fragility of ceramic femoral head and their possible destruction under shock loads. In this work, the new design of the femoral head with brazed metal inlet proposed. With the method of finite element

analysis, it is shown, that stress in femoral head with metal inlet are lower in compare with standard design head for hip joint endoprotheses. Based on the analysis of literature data, a biocompatible Ti-Zr-Co filler metal was developed for brazing alumina ceramics with titanium. The microstructure of Ti/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> brazed joints has been studied, as well as EDX microanalysis has been performed. Corrosion tests of filler metal strip and fragment of brazed joint were carried out for 680 hours, at a temperature of 38°C, in an aqueous solution of sodium chloride (0.9%), potassium chloride (0.03%) and calcium chloride (0.03%). The absence of filler metal and brazed joint interaction with the corrosive environment is shown.

**Ядерные энергетические установки и ядерный топливный цикл / 45**

## Smart Grid technologies at nuclear power plants

**Author:** Dmitrii Raspopov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> IATE, MEPhI

**Corresponding Author:** raspopovda@oiate.ru

The problem of ensuring the required level of quality of electrical energy in the electric power systems of consumers of electrical energy has always been relevant and today has not lost its importance. Nuclear energy in Russia is part of the country's overall energy system. The share of nuclear generation in the total energy balance of Russia has been steadily growing over the past five years and at the end of 2019 amounted to 20.35%. A large number of electrical equipment is connected to the NPP electrical network. This equipment can become a source of harmonic distortion and affect not only each other, but the entire power system as a whole. As a result of such an impact, fluctuations and deviations in the characteristics of electricity can occur in the electrical network, which can lead to short circuits, and subsequently to fires and associated severe emergency situations. To minimize the consequences of the negative impact of electrical equipment on each other and the power system as a whole, it is necessary to use the latest technologies, tools, methods and digital intelligent solutions of world science and technology. One of such modern and rapidly developing solutions are smart grids, which have received the name "Smart Grid" abroad. "Intelligent" power grid management provides automation, monitoring and control of the state of the electrical grid in real time. Intelligent grids are able to perform online tasks of collecting and analyzing large amounts of data. At a nuclear power plant, such data are the values obtained from the corresponding sensors of technological and noise characteristics of the power system equipment. Currently, the process of introducing intelligent power supply systems begins to develop rapidly. In Russia, there are already many examples of the introduction of smart grids and the associated positive effects. But among all these examples, there is not a single one related to nuclear energy. That is why the current task is the implementation of smart power supply networks at the enterprises of the nuclear industry. The introduction of such systems at nuclear power plants can significantly improve the overall energy efficiency of the entire nuclear industry. As a result of research work, an experiment was carried out in which, using a laboratory stand, data were collected from current and voltage sensors from several different consumers of electrical energy. Using the methods and algorithms of intellectual and spectral analysis, the method of principal components and modern machine learning technologies, an algorithm for identifying the consumer of electrical energy by the characteristics of current and voltage was developed.

Ядерные энергетические установки и ядерный топливный цикл / 46

## Модульный реактор малой мощности с естественной циркуляцией МОДЕСТ

Author: Ekaterina Gradova<sup>1</sup>

Co-author: Yuri Volkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРФИ

Corresponding Author: katunchic.gradova@yandex.ru

Работа посвящена актуальному в настоящее время направлению в физике реакторов, связанному с развитием малой атомной энергетики. Бурное развитие этого направления атомной энергетики объясняется гибкостью модульных реакторов в производстве электроэнергии и их возможностью подстраиваться под самых различных потребителей. Рынок малых ядерных энергетических реакторов считается перспективным и та страна, которая первой создаст экономически эффективный и безопасный проект реактора, получит преимущество на данном рынке. При разработке проекта был сконструирован модуль реакторной установки МОДЕСТ электрической мощности 110 МВт, применен инновационный парогенератор с витыми трубами для компактности модуля. Расчеты по теплогидравлике подтверждают возможность осуществления естественной циркуляции теплоносителя, распределения температур в активной зоне входят в необходимые диапазоны для нормального функционирования материалов, также определены важные характеристики второго контура. Проведены расчеты по нейтронной физике для определения кампании реактора и характеристик активной зоны. Оценена стоимость проекта по металлоемкости относительно РУ ВВЭР-440, обладающей такой же электрической мощностью. В схеме реакторной установки отсутствуют циркуляционные насосы, естественная циркуляция теплоносителя повышает безопасность как пассивная система. Помимо этого, полностью отсутствуют трубопроводы первого контура, потому что все оборудование первого контура: активная зона, парогенератор и компенсатор давления; компактно расположено в едином корпусе. Витой парогенератор обладает более эффективными параметрами по теплосъему и меньшими габаритными размерами относительно используемых прямотрубных. Данный проект предназначен для ввода новых мощностей и замены существующих, сокращения сроков строительства атомных станций, обеспечения потребности энергоёмких производств в обеспечении базовой нагрузки, развития атомной энергетики у стран, у которых нет АЭС, обслуживания удаленных территорий и регионов с неразвитыми сетями, опреснения воды.

Ядерные энергетические установки и ядерный топливный цикл / 47

## Оценка возможности снижения пустотного эффекта реактивности в реакторе ВВЭР-СКД

Authors: Антон Лапин; Виктор Бландинский; Владимир Куканов

Corresponding Author: l-anton@yandex.ru

В настоящее время становится актуальным формирование образа нового поколения легководных реакторов, приемлемых для переходного этапа развития ядерной энергетики от открытого к замкнутому топливному циклу и этапа замкнутого топливного цикла. Одним из способов повышения эффективности ЛВР при работе в замкнутом

топливном цикле, учитывающих имеющийся опыт создания ВВЭР и БН, является использование пара для охлаждения активной зоны реактора, переход к быстрорезонансному спектру нейтронов и к стальным оболочкам твэлов. Основная идея концепции пароохлаждаемых быстрых реакторов состоит в соединении преимуществ широко освоенной в ЯЭ технологии водо-водяных корпусных реакторов и самообеспечения топливом в замкнутом ядерном топливном цикле за счет его воспроизводства в реакторах с уран-плутониевой загрузкой активной зоны с быстрым спектром нейтронов, получаемого путем существенного снижения доли и плотности воды и охлаждения активной зоны перегретым водяным паром или пароводяной смесью. В соответствии со стратегией развития ядерной энергетики России до 2050 года и перспективы на период до 2100 года, в качестве основных кандидатов на роль перспективных технологий легководных реакторов для двухкомпонентной ядерной энергетики рассматриваются инновационные реакторные технологии ВВЭР со сверхкритическими параметрами теплоносителя (реактор ВВЭР-СКД). Работы по ВВЭР-СКД также ведутся в рамках международного сотрудничества "Генерация IV". Целью настоящей работы является поиск решений по снижению пустотного эффекта реактора ВВЭР-СКД с быстрым спектром нейтронов, что необходимо для обоснования безопасности реакторной. В ходе работы проанализированы различные способы снижения пустотного эффекта. Оценено влияние различных факторов, а именно: - Наличие торцевой и боковой зон воспроизводства; - Размещение аксиальной вставки из воспроизводящего материала в центр активной зоны; - Изменения содержания делящегося нуклида. - Окружения активной зоны. Кроме этого рассмотрен вариант с уплощенной активной зоной. Результатом работы является концепция реакторной установки, пустотный эффект в которой полностью компенсируется обратной связью по температуре топлива. При этом значение коэффициента воспроизводства остается на приемлемом уровне, необходимым для работы в режиме самообеспечения топливом.

**Ядерные энергетические установки и ядерный топливный цикл / 48**

## **Сопряженный теплогидравлический и нейтронно-физический расчёт ТВС реактора ИР-8 с помощью кодов MCU-PTR/ATHLET**

**Authors:** Konstantin Glyva; Sergey Nikonov; Yuri Pesnya; Vladislav Trofimchuk

**Corresponding Author:** glyva\_kostya@mail.ru

В работе приведён анализ результатов моделирования одного из типов ТВС, используемых в легководном исследовательском реакторе бассейнового типа ИР-8 (максимальная мощность 8 МВт). Для теплогидравлических расчётов ИР-8 используются методики, применяемые при анализе гидродинамических характеристик (в частности, скоростей теплоносителя в зазорах ТВС), полученные в ходе экспериментов на гидравлическом стенде с макетом восьмитрубной ТВС ИРТ-3М в НИЦ Курчатовский институт. Ранее уже были проведены работы по анализу результатов гидравлических испытаний восьми- и шеститрубной ТВС ИРТ-3М реактора ИР-8 с помощью кода ATHLET с разбиением гидравлических структур. В ходе данных работ [1-3] были определены расходные характеристики в кассете в зазорах между твэл на сектора в соответствии с разбиением тепловых структур, используемым при анализе пространственного распределения энерговыделений физическими программами на основе метода Монте Карло. Для нейтронно-физического расчёта стационарного режима использована программа MCU-PTR, реализующая метод Монте-Карло для реакторов бассейнового типа. В коде ATHLET имеется несколько возможностей, позволяющих

моделировать поперечный обмен в системе связанных гидравлических параллельных каналов. В данной работе используется для этой цели специально разработанная модель CROSSCONNECTION. Пространственное моделирование гидродинамики кассеты в соединении с пространственным моделированием тепловых структур, которое использовалось ранее, позволяет учесть обратные связи при совместном расчете теплофизических и нейтронно-физических характеристик реактора и получить их адекватное 3D распределение. В рамках данной работы определены температуры теплоносителя, оболочки и топлива. Результаты этой работы могут быть использованы при определении допустимой мощности исследовательских реакторов типа ИРТ: ИР-8 в НИЦ КИ (Москва), ИРТ-МИФИ в НИЯУ МИФИ (Москва), ИРТ-Т в ТПУ (Томск) и WWR-SM в ИЯФ (Ташкент).

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Glyva, K.I., Nikonov, S.P., Nasonov, V.A., Pesnya, Y.E. Analysis of the IR-8 reactor's IRT-3M FA hydraulic tests results using the ATHLET code. — Journal of Physics: Conference Series 1133(1),012030, DOI: 10.1088/1742-6596/1133/1/012030
2. Глыва К.И., Никонов С.П., Моделирование массообмена в системе параллельных связанных каналов на примере кассеты ИРТ-3М исследовательского реактора ИР-8, сборник тезисов VIII Международной молодежной научной школы-конференции “Современные проблемы физики и технологий”, часть 2, с 107, 15-20 апреля 2019 года, г. Москва, НИЯУ МИФИ.
3. Глыва К.И., Никонов С.П., Моделирование трехмерных гидравлических эффектов на примере ТВС ИРТ-3М реактора ИР-8 с помощью одномерного кода ATHLET., сборник докладов Шестой конференции молодых специалистов “Инновации в атомной энергетике”, с 690-697, 1-3 октября 2019 года АО “НИКИЭТ” г. Москва.

Космо- и астрофизика / 49

## Восстановление параметров широких атмосферных ливней с помощью нейронных сетей по данным установки НЕВОД-ШАЛ

Author: Kirill Kyrinov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРФИ

Corresponding Author: saint.kyou@gmail.com

Установка НЕВОД-ШАЛ создана на территории НИЯУ МИФИ в Экспериментальном комплексе НЕВОД для регистрации электронно-фотонной компоненты широких атмосферных ливней (ШАЛ). Установка представляет собой систему из 9 независимых кластеров, расположенных на крышах и на грунте вокруг ЭК НЕВОД. Каждый кластер включает в себя 4 детектирующие станции, каждая из которых в свою очередь, состоит из 4 сцинтилляционных детекторов общей площадью 2.56 м<sup>2</sup>. Под восстановлением параметров ШАЛ понимается нахождение координат положения оси ШАЛ в плоскости установки  $x$  и  $y$ , полного числа частиц  $N_e$ , параметра возраста ливня  $s$ . Для восстановления параметров ШАЛ общепринятым методом является метод максимального правдоподобия (ММП), который содержит в себе ряд предположений, в частности, о виде функции пространственного распределения (ФПР). При применении нейронных сетей не нужно закладывать предположения о форме распределения, нейронные сети способны обучаться и выявлять общие закономерности по эмпирическим данным. Нейронные сети обучаются с “учителем”. По известной совокупнос-

ти прецедентов — пар “вход-выход”, называемых обучающей выборкой, восстанавливается зависимость (модель отношений вход-выход, пригодных для прогнозирования), то есть, строится алгоритм, способный для любого объекта выдать достаточно точную оценку искомым параметрам. В данной работе проводилось восстановление параметров с помощью нейронных сетей и ММП. Для этого использовались моделированные события, полученные с помощью программных пакетов CORSIKA и Geant4. На основе полученных данных было проведено сравнение двух методов восстановления и получена оценка точности восстановления параметров ШАЛ. Работа выполнена на уникальной научной установке “Экспериментальный комплекс НЕВОД”.

Космо- и астрофизика / 50

## Система калибровочных телескопов Экспериментального комплекса НЕВОД как детектор ШАЛ

Author: Евгений Калинин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> MEPHI

Corresponding Author: zhenya-toodoo@mail.ru

Система калибровочных телескопов (СКТ) [1] в составе Экспериментального комплекса НЕВОД создавалась для калибровки черенковского водного детектора, но после модернизации в 2012 году также используется как детектор электронной и мюонной компонент широких атмосферных ливней (ШАЛ). Установка СКТ занимает площадь 80 м<sup>2</sup> и состоит из 40 детекторов, установленных в шахматном порядке и имеющих размеры 40x20x2 см<sup>3</sup>. Одна плоскость СКТ расположена над черенковским водным детектором, а другая на его дне. Восстановление параметров ШАЛ в системе калибровочных телескопов позволяет расширить возможности всего экспериментального комплекса для исследования стволов ШАЛ в области энергий первичных частиц от 0.1 до 10 ПэВ. В данной работе для поиска оптимального значения функционала, построенного по методу максимального правдоподобия [2], используется итерационный симплекс-метод Нелдера-Мида [3]. Точность оценки восстанавливаемых параметров ШАЛ изучалась на моделированных событиях. Моделирование ШАЛ проводилось на основе функции пространственного распределения Нишимуры-Каматы-Грейзена [4] для заряженных частиц в ливне. В заключении работы приводятся результаты восстановления параметров ШАЛ, зарегистрированных в СКТ. Работа выполнена на Уникальной научной установке “Экспериментальный комплекс НЕВОД”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амельчаков М. Б., Богданов А. Г., Задеба Е. А. и др. Система калибровочных телескопов черенковского водного детектора НЕВОД, ПТЭ, 2018, № 5, с. 49–55
2. Худсон Д. Статистика для физиков: лекции по теории вероятностей и элементарной статистике. Издательство: Мир, 1970, 296 с.
3. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс, Издательство: Радио и Связь, 1988, 128 с.
4. Grieder P.K.F. Extensive Air Showers: High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects. Volume II. Springer, 2010. p. 1118.

Физика элементарных частиц / 51

## Мониторинг положения пучка заряженных частиц в тестовых экспериментах

**Author:** Andrey Durov

**Corresponding Author:** russianrakkan@gmail.com

Прототипы новых детекторы подвергаются различным тестам во время разработки. При тестировании пучком заряженных частиц (beam test) существует проблема позиционирования экспериментальной установки относительно пучка в условиях, когда исследуемый детектор находится на пучке ограниченное время, поскольку существующие мониторы пучка дороги и неудобны для использования при таких обстоятельствах. В большинстве случаев, позиционирование осуществляется вручную, что занимает долгое и крайне дорогое ускорительное время. Для решения этой проблемы предложено использовать координатный стол с детектором на кремниевом фотумножителе. Управление передвижением детектора будет осуществляться с помощью ручного ввода через контроллер, либо с помощью программного кода, обеспечивающего интеллектуальный поиск пучка. Также используемый детектор на SiPM будет заведен в совпадение с триггером пучка, чтобы исключить поиск пучка во время его отсутствия. Для визуализации процесса будет использоваться крестообразный самовыравнивающийся лазерный указатель. В данный момент проект находится на стадии подбора материалов и адаптации 3д-модели под реальные компоненты. Проект предполагает конструирование, 3д-моделирование, постройку и тестирование установки. Разрабатываемая установка позволит удобно и быстро позиционировать исследуемый детектор для исследования на пучке и будет интересна широкому кругу исследователей.

Прикладная ядерная физика и теплофизика / 52

## Моделирование теплофизических параметров компонентов пучкового тракта системы дополнительного нагрева плазмы ТЯР в проекте ДЕМО-ТИН

**Authors:** Анна Колесниченко<sup>1</sup>; Сергей Ананьев<sup>1</sup>; Бочкарев Алексей<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИЯУ МИФИ

**Corresponding Author:** anna.kolesnichenko97@mail.ru

Наиболее перспективным источником энергии на сегодняшний день является реакция атомного деления, однако у данного вида энергетики есть свои проблемы (переход к замкнутому топливному циклу, ограниченность топливных ресурсов для реакторов атомных электростанций и недостаток нейтронов для расширения топливной базы для реакторов на тепловых нейтронах, утилизация отработанного ядерного топлива). Для демонстрации коммерческой привлекательности термоядерной энергетики рассматривается проект ДЕМО, который совместно с ITER может быть использован для производства электроэнергии. Тем не менее, использование реакции термоядерного синтеза на сегодняшний день не может конкурировать с реакторами деления по производству коммерческой электроэнергии и решения задач ядерного

топливного цикла. Существующая необходимость расширенного производства нейтронов для задач ядерной энергетики может быть решена, например, путем совместного использования реакций синтеза и деления в одной установке. Кроме производства электроэнергии, гибридные реакторы могут решать проблемы обеспечения топливом тепловых реакторов, утилизации ОЯТ тепловых реакторов и др. Отличительной особенностью установок данного типа являются сниженные (более чем в 10 раз) требования по тепловым нагрузкам на элементы установки по сравнению с ITER и DEMO, а также их относительная компактность. Проект DEMO-ТИН является пилотным проектом РФ по созданию гибридной установки и базируется на существующих технологических решениях. Работа гибридной установки или источника термоядерных нейтронов (ТИН) на основе токамака потребует нагрева плазмы и поддержания тока в ней с помощью инъекции пучков быстрых атомов [1]. В проекте DEMO-ТИН предполагается использовать шесть инжекторов для обеспечения мощности дополнительного нагрева до 30 МВт. Задача эффективной транспортировки пучка в системе нейтральной инъекции (СНИ) требует многопараметрической оптимизации для снижения потерь пучка и ограничение тепловых нагрузок на компонентах инжектора до величин, допускающих эффективное охлаждение [2]. В работе выполнены теплофизические расчеты элементов инжекционного тракта и сформулированы соображения по организации эффективного отведения поглощённой мощности в элементах инжекционного тракта для внесения соответствующих доработок в инженерно-технический проект СНИ. Данные теплофизические расчеты элементов инжекционного тракта производятся на основании предварительных оценок полных потерь мощности, а также с использованием распределения нагрузок на всех компонентах СНИ [2]. Полученные результаты обеспечат проработку СНИ для проекта DEMO-ТИН и переход к ее конструкторскому проектированию, а также сделают вклад в другие проекты, связанные с разработкой гибридных и термоядерных реакторов. Работа поддержана Национальным исследовательским центром «Курчатовский институт» (28.09.2020 №1934а).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананьев С.С., Е.Д. Длугач, А.И. Крылов, Б.В. Кутеев, А.А. Панасенков — ВАНТ Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 1.
2. Ананьев С.С., Е.Д. Длугач, Б.В. Кутеев, А.А. Панасенков — ВАНТ Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 3.

Приборы и методы экспериментальной ядерной физики / 53

## Investigation of tracking chamber made of six layers of mylar drift tubes

**Author:** Mikhail Barinov

**Co-authors:** Alexander Uzunyan ; Anatoly Kozhin ; Leonid Turchanovich

**Corresponding Author:** siwgfried@yandex.ru

New thin-wall drift chamber stations are developed to upgrade tracking system of the experimental setup “FODS” at the Institute for High Energy Physics of the National Research Center “Kurchatov institute”. The station consists of 2 mutually orthogonal chambers (X- and Y-). Each chamber consists of 3 layers of 30 mm diameter drift tubes housed inside the body made of 125 microns thick mylar film coated with aluminium from

both sides. The layer contains 24 tubes with a length of 810 mm. The chambers are equipped with 24-channel on-chamber electronics boards. The gas connection of the pipes in each layer is sequential, using gas jumpers made of plastic NORYL. The layers of each chamber are connected in parallel to the gas collectors. The gas volume of one chamber is 38.6 litres. All tests are carried out with the working mixture Ar+7%CO<sub>2</sub>. Initial measurements are made at pressure about 1500 mbar. Individual drift tube modules are checked using stand which is described. During tests the chamber works in the so-called "non-trigger" mode. Time-to-digital converter provides recording of the time of arrival of signals from drift tubes with an accuracy of 5 nsec, the threshold of amplifiers is about 0.6  $\mu$ A. The chambers are investigated by detecting and analyzing cosmic muon tracks. Long exposures, about 3-10 hours of data collecting with cosmic particles, allow to test chamber. Reconstruction of cosmic particle tracks is performed only on the basis of information from the chamber itself. We also have started investigations of the chamber characteristics on the beam of Serpukhov accelerator.

Физика элементарных частиц / 54

## Зависимость начальных условий столкновения релятивистских тяжелых ионов от энергии и типа ядер в модели Монте-Карло Глаубера

**Author:** Alexandra Andomina<sup>1</sup>

**Co-authors:** Илья Селюженков<sup>2</sup>; Илья Сегаль<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРФ

<sup>2</sup> GSI / МЕРФ

**Corresponding Author:** andomina.alexandra@gmail.com

Эксперименты по столкновению тяжелых ядер направлены на изучение свойств кварк-глюонной материи при различных условиях, например, характерных состоянию Вселенной на ее ранних этапах эволюции или процессу слияния нейтронных звезд. Результат столкновения ядер сильно зависит от начальной геометрии столкновения, которая не может быть определена экспериментально. Теоретически геометрия описывается рядом величин, таких как прицельный параметр, число нуклонов-участников и др. Экспериментально геометрия столкновения характеризуется центральностью, которую можно определить, например, по множественности рожденных частиц или энергии нуклонов-наблюдателей. Стандартный метод определения связи между множественностью рожденных частиц и параметрами начального состояния основан на модели Монте-Карло Глаубера. В данной работе представлены зависимости начальных условий столкновения тяжелых ионов в модели Монте-Карло Глаубера от входных параметров, таких как неупругое сечение нуклон-нуклонного взаимодействия, зависящее от энергии столкновения, и форма ядерной плотности. Характерными являются сильные зависимости числа бинарных нуклон-нуклонных столкновений от энергии и формы распределения прицельного параметра для периферийных столкновений от типа ядер. В дальнейшем планируется использовать модель Монте-Карло Глаубера для определения взаимосвязи модельных параметров столкновения в различных классах центральности.

Прикладная ядерная физика и теплофизика / 55

## Исследование кипения наножидкостей различного состава под действием солнечного света

**Authors:** Andrew Olkhovsky<sup>1</sup>; Pavel Struchalin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРФИ

**Corresponding Author:** olxa@nxt.ru

Наножидкость представляет собой коллоидный раствор частиц с характерным размером 0.1-100 нм в жидкой среде. Как правило в качестве дисперсионной среды выступает вода, а частицами являются оксиды, карбиды, и различные модификации углерода. Такой раствор обладает особыми физико-химическими свойствами, такими как повышенная по сравнению с чистым растворителем теплопроводность, конвективный коэффициент теплопередачи [1]. Также в таком растворе на долю поверхности приходится до 50% вещества, что в теории должно способствовать интенсивному поглощению света [2]. В работе исследовалась возможность применения устройств типа «солнечный коллектор» для опреснения морской воды с помощью солнечного излучения [3]. Целью работы было показать возможность повышения эффективности опреснения морской воды с использованием солнечной энергии путем добавления в нее нанодисперсных порошков различных частиц. Для определения оптимального состава используемых наночастиц была создана экспериментальная установка, представляющая собой замкнутый контур естественной циркуляции служащий для поддержания постоянного объема рабочей жидкости в ходе эксперимента. Измерялся расход пара на выходе из замкнутого объема колбы при неизменных параметрах установки, таких как: размер колбы, объем рабочей жидкости, интенсивность светового потока, концентрация соли. В качестве эталона для сравнения был выбран рабочий объем, покрытый черной краской на основе графита, с чистой морской водой. В серии экспериментов использовалась прозрачная колба с наножидкостями на основе графита, графена, оксида железа(III) а также промышленного состава на основе графена в концентрациях от 0.5 до 10% по массе. В докладе представлены результаты данных экспериментов. В результате экспериментов была показана возможность повысить эффективность опреснительной установки на 10-50% в зависимости от состава используемой наножидкости. Этот результат может иметь практическую ценность в местностях с солнечным климатом и недостатком пресной воды [4].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Taylor, R.A.; et al. (2013). "Small particles, big impacts: A review of the diverse applications of nanofluids". *Journal of Applied Physics*. 113 (1): 011301–011301–19.
2. S. K. Das, S. U. S. Choi, W. Yu, T. Pradeep. *Nanofluids: Science and Technology*. — Wiley-Interscience, 2008. — 416 с. — ISBN 978-0-470-07473-2
3. Солнечный коллектор-опреснитель: пат. на полезную модель 115451 Рос. Федерация. № 2010133516/06; заявл. 10.08.2010; опубл. 27.04.2012.
4. Савин, А.В. Проблемы мирового развития экономики, связанные с ограниченностью ресурсов / А.В. Савин // *Российский внешнеэкономический вестник*. -2006.-№ 10.-С. 12-22.

Приборы и методы экспериментальной ядерной физики / 56

## Разработка автоматизированного стенда для калибровки фотоэлектронных умножителей КАЛИФ-8

**Author:** Konstantin Savelyev<sup>1</sup>

**Co-author:** Nikita Pasiuk<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРФ

**Corresponding Author:** konstantinsavelev1@yandex.ru

На уникальной научной установке «Экспериментальный комплекс НЕВОД» (НИЯУ МИФИ, г. Москва) проводятся фундаментальные и прикладные исследования космических лучей в широком диапазоне энергий. Для проведения таких исследований создан ряд физических установок и детекторов: черенковский водный детектор (ЧВД) для исследования стволов широких атмосферных ливней (ШАЛ) и измерения энерговыделения мюонов, система калибровочных телескопов (СКТ) для изучения электронно-фотонной и мюонной компонент ШАЛ, крупномасштабный детектор НЕВОД-ШАЛ для регистрации электронно-фотонной компоненты, детекторы атмосферных нейтронов ПРИЗМА-32 и УРАН, координатно-трековый детектор ДЕКОР для исследования околоразностного потока мюонов. В большинстве детекторов и установок экспериментального комплекса основными регистрирующими элементами являются фотоэлектронные умножители (ФЭУ), например, в регистрирующей системе установки НЕВОД-ШАЛ используются 180 фотоумножителей ФЭУ Philips XR3462, а в ЧВД НЕВОД – 546 ФЭУ-200, поэтому проблема тестирования характеристик и калибровки ФЭУ является актуальной. В докладе приводится описание конструкции и принципа работы универсального стенда для исследования характеристик (коэффициента усиления, диапазона линейности, темпа счета темновых шумов, джиттера и др.) различных типов фотоэлектронных умножителей КАЛИФ-8, который в настоящее время создается в Экспериментальном комплексе НЕВОД и предназначен для одновременной автоматизированной калибровки восьми ФЭУ. Работа выполнена на уникальной научной установке “Экспериментальный комплекс НЕВОД”.

Физика элементарных частиц / 57

## Point-like event discrimination in RED-100

**Author:** Olga Razuvaeva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРФ

**Corresponding Author:** or.firefox@gmail.com

Coherent elastic neutrino-nucleus scattering (CEvNS) was predicted in 1974 but this process was observed experimentally by COHERENT collaboration only in 2017. It is so difficult to detect CEvNS events because of their very low recoil energy (about 10keV). RED-100 is two phase LXe detector which was created in ENPL NRNU MEPHI and is dedicated to first CEvNS observation on Xe nucleus. One of the most important problem for detectors of that type is separating point-like events with 2-6 emission electrons from CEvNS from background events. This work is dedicated to modelling CEvNS and background events and applying

ML and other methods for separating them. Also some results from test run of the detector will be presented.

Космо- и астрофизика / 60

## **Определение характеристик неупругого взаимодействия легких ядер с вольфрамом по измерениям космических лучей в эксперименте ПАМЕЛА**

**Authors:** Olga Golub<sup>1</sup>; Andrey Mayorov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРФИ

**Corresponding Author:** ogolub394@gmail.com

В докладе приводятся характеристики неупругого взаимодействия легких ядер с вольфрамом по измерениям космических лучей в эксперименте ПАМЕЛА. ПАМЕЛА — это спутниковый эксперимент, основанный на магнитном спектрометре, предназначенный для изучения потоков заряженных частиц в космическом излучении. Благодаря своему набору детекторных систем, каждая из которых может независимо измерять характеристики частиц, спектрометр ПАМЕЛА позволяет проводить изучение взаимодействия частиц космических лучей с поглотителем из вольфрама, входящим в состав калориметра прибора. Развивается новый метод проверки и совершенствование моделей взаимодействия частиц с веществом. Прибор, благодаря своему набору детекторов, выбирает из потока частиц с высокой надежностью необходимую компоненту, как бы формируя пучок частиц известного типа и энергии, приходящего под известным углом. И одновременно другой детектор — позиционно-чувствительный стриповый калориметр — служит мишенью для этих частиц. Проведено сравнение полученных характеристик неупругого взаимодействия частиц космических лучей (сечение взаимодействия, угловое распределение вторичных частиц и т. д.) по данным эксперимента с характеристиками, восстановленных по данным моделирования. Также проведено сравнение с измерениями на ускорителях и с существующими теоретическими моделями. Полученные результаты могут быть востребованы для расширения стандартных адронных и электромагнитных моделей Geant4, описывающих взаимодействие частиц с веществом.

Ядерные энергетические установки и ядерный топливный цикл / 62

## **Оценка характеристик внутренней самозащищенности реактора типа БН**

**Author:** Aleksei Bochkarev

**Corresponding Author:** allbochkarev@gmail.com

Одно из требований к проекту АЭС — обеспечение ее безопасности, в том числе за счет реализации в проекте принципа внутренней самозащищенности. Применение принципа внутренней самозащищенности решает задачу сохранения целостности барьеров безопасности в режимах с отклонением рабочих параметров станции за

пределы допустимых значений. При этом, исключительно за счет действия естественных обратных связей и пассивных систем безопасности, принцип действия которых позволяет приравнять их к естественным обратным связям. В данной работе на основании комплексного динамического анализа всех объективно возможных аварий и их наложений для реактора БН большой мощности с учетом отказа систем аварийного отвода тепла и активных и пассивных аварийных защит был определен перечень наиболее опасных наложений и их множеств, для которых нарушение целостности оболочек твэл и кипение натрия инициируются ранее всего, и в которых значение некомпенсированной положительной реактивности наиболее велико. Оценка эффективности различных мер ослабления исследуемых аварийных наложений за счет развитого свойства внутренней самозащищенности реактора БН большой мощности позволила разработать комплекс количественных и качественных требований к оборудованию первого контура и пассивным защитам реактора, удовлетворение которым позволит сохранить целостность барьеров безопасности реактора в любом наложении аварий с потерей принудительной циркуляции натрия первого контура, потерей теплосъема и введения положительной реактивности с учетом отказа систем аварийного отвода тепла и всех аварийных защит, неудовлетворяющих разработанным требованиям. По результатам динамического анализа наиболее опасных сценариев аварий с потерей принудительной циркуляции натрия первого контура без срабатывания систем аварийного отвода тепла и аварийных защит были разработаны требования к гидравлическим параметрам, характеризующим динамику протекания исследуемых аварий

Материаловедение и технологии материалов / 63

## Томографический атомно-зондовый анализ дисперсно-упрочнённой оксидами стали при различных дозах облучения

**Author:** Артём Клауз<sup>1</sup>

**Co-authors:** Александр Залужный<sup>1</sup>; Артём Хомич<sup>1</sup>; Сергей Рогожкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИЦ "Курчатовский институт" – ИТЭФ

**Corresponding Author:** uni.klauz@gmail.com

Дисперсно-упрочненные оксидами стали являются потенциальными конструкционными материалами активной зоны следующего поколения реакторов на быстрых нейтронах. Предполагается, что они будут выдерживать радиационную нагрузку до доз облучения порядка 200 сна (смещений на атом) при температурах 400-700 °С. Такая нагрузка может быть обеспечена наличием в материале оксидных включений. Было замечено, что присутствие в материале большего числа меньших по размеру оксидных включений приводит к росту механических характеристик, ДУО стали. Для анализа эволюции распределения оксидных включений в материале при радиационной нагрузке, были проведены имитационные эксперименты по облучению образцов ДУО стали 10Cr ODS ионами Fe с энергией 5.6 МэВ до повреждающих доз 3, 6 и 30 сна при температуре 350 °С. Для их описания принято использование совокупности самых современных методов ультрамикроскопии: просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и атомно-зондовой томографии (АЗТ). ПЭМ позволяет описать микроструктуру материала (зеренная структура, оксидные частицы). АЗТ позволяет восстанавливать трёхмерную структуру исследуемого объема с атомарным разрешением и определять химическую природу каждого детектируемого атома,

что позволяет получать качественную и количественную информацию о наноразмерных особенностях материала, анализ которых затруднен или невозможен с помощью ПЭМ (нанокластеры). В настоящей работе представлены результаты исследования методами атомно-зондовой томографии образцов сплава 10Cr ODS. Методом атомно-зондовой томографии определена зависимость изменения размеров и плотности кластеров от дозы облучения. Так, средний диаметр кластера с  $(4 \pm 1)$  нм в исходном состоянии уменьшается до  $(2 \pm 1)$  нм при облучении до максимальной дозы в 30 сна. Плотность кластеров уменьшилась в  $\sim 2$  раза с  $(9 \pm 1 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3})$  до  $(4 \pm 2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3})$ . Обнаружено, что при ионном облучении происходит частичное растворение кластеров и уход элементов в матрицу. Анализ химического состава кластеров показал, что с увеличением дозы облучения существенно уменьшается содержание Cr и V в кластерах, при этом количество Ti, Y, O сохраняется в пределах погрешности, что говорит о стабильности кластеров типа Ti-Y-O.

Физика элементарных частиц / 64

## Relative elliptic flow fluctuations at NICA energies

**Authors:** Vinh Ba Luong<sup>1</sup>; Dim Idrisov<sup>1</sup>; Peter Parfenov<sup>1</sup>; Arkadiy Taranenko<sup>1</sup>; Alexander Demanov<sup>1</sup>; Anton Truttse<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРФИ

**Corresponding Author:** lbavinh@gmail.com

The goal of the MPD experiment at NICA collider is to explore the QCD phase diagram of strongly interacting matter produced in nucleus-nucleus collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=4-11$  GeV in the region of high net baryon chemical potential and moderate temperatures. The elliptic flow of produced particles is one of the key observables sensitive both to the transport properties and equation of state of such matter. The Q-Cumulant method is applied for the investigation of the elliptic flow fluctuations of produced particles in Au+Au collisions at 4-11 GeV using the generated events from UrQMD, SMASH, AMPT and vHLLX+UrQMD models.

Физика элементарных частиц / 65

## Beam energy dependence of elliptic flow in relativistic heavy-ion collisions in hybrid models and scaling relations

**Authors:** Arkadiy Taranenko<sup>1</sup>; Peter Parfenov<sup>1</sup>; Alexander Demanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРФИ

**Corresponding Author:** demanov1997@gmail.com

Elliptic flow measurements of produced particles in relativistic heavy-ion collisions play an essential role in the studies of transport properties of the strongly-interacting matter. In this work, we provide the results of the systematic study of the beam energy dependence

of elliptic flow based on existing data and discuss them using different scaling relations and comparison with hybrid models.

Космо- и астрофизика / 66

## Идентификация лёгких ядер в космических лучах в эксперименте PAMELA по многократным измерениям потерь энергии вдоль трека

**Authors:** Vladislav Alekseev<sup>1</sup>; Olga Golub<sup>1</sup>; Andrey Mayorov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Yaroslavl State University*

<sup>2</sup> *MEPhI*

**Corresponding Author:** vladislav.alexeev.yar@gmail.com

Рассматривается метод идентификации лёгких ядер ( $1 - 5$ ) в космических лучах по данным измерений спектрометром PAMELA магнитной жёсткости и потерь энергии частиц вдоль трека во время-пролётной и трековой системах. Для каждого типа ядра  $j$  определяются функции  $L_j(R)$  и  $H_j(R)$ , зависящие от магнитной жёсткости  $R$ , такие, что вероятность попадания энерговыделения в плоскости прибора частицы с жёсткостью  $R$  в диапазон  $[L_j(R), H_j(R)]$  составит  $\approx 0.97$ . Каждому событию сопоставляется набор возможных типов ядра (в зависимости от попадания в соответствующий диапазон энерговыделений) для каждой плоскости прибора. Классификация производится в результате анализа комбинации “ответов” для всех плоскостей. На основе данных моделирования в Geant4 вычисляется оценка качества идентификации и вероятность ошибки (неверной идентификации) каждого ядра. В результате удаётся идентифицировать  $\approx 96\%$  и  $\approx 93\%$  событий протонов и гелия соответственно с близкой к нулю вероятностью ошибки. Наибольшую сложность составила идентификация ядер бериллия: идентифицируются  $\approx 70\%$  событий, вероятность неверной классификации ядра бора как бериллий составила  $\approx 6.5\%$ . Более подробно результаты представлены в докладе. Также в докладе обсуждается возможность применения методов машинного обучения к данной задаче и обобщение метода на более тяжёлые ядра.

Прикладная ядерная физика и теплофизика / 67

## Расчет пусковых испытаний китайского экспериментального реактора на быстрых нейтронах CEFR

**Author:** Виктория Евгеньевна Каширина

**Co-authors:** Валерий Васильевич Колесов ; Ярослав Александрович Котов

**Corresponding Author:** kashirina-viktoria@mail.ru

CEFR – первый реактор на быстрых нейтронах в Китае, который достиг первой критичности в 2010 году [1]. В ходе физических пусковых испытаний было проведено

4 серии экспериментов, включая загрузку топлива и критичность, измерение веса регулирующих стержней, измерение коэффициентов реактивности. Эти эксперименты дали ценные данные для проверки конструкции активной зоны и ядерных данных. Под руководством и при поддержке МАГАТЭ Институт атомной энергии Китая предложил текущий проект координированных исследований для разработки бенчмарка на основе начальных испытаний. Модель Китайского экспериментального реактора была построена в программном комплексе SERPENT-2 на основе данных, представленных в технической спецификации [2]. Также в ПК SERPENT-2 был произведен расчет пусковых испытаний по загрузке топлива и выхода на критику в соответствии с требованиями и рекомендациями, представленными в технической спецификации реактора. Полученные в ходе расчетов результаты с достаточной точностью согласовываются с экспериментальными данными пусковых испытаний реактора CEFR. В дальнейшем планируется продолжение работы в данном направлении, а именно расчет остальных пусковых испытаний.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Research Reactor Database [Электронный ресурс]  
<https://nucleus.iaea.org/RRDB/RR/ReactorSearch.aspx>
2. Technical Specifications for neutronics benchmark of CEFR start-up tests (CRP-I31032), draft v7.0. Department of Reactor Engineering, China Institute of Atomic Energy, Dec, 2019.

Приборы и методы экспериментальной ядерной физики / 70

## Применение методов глубокого обучения для исследования мюонов космических лучей

**Author:** Владислав Воробьев<sup>1</sup>

**Corresponding Author:** vsvorobev@mephi.ru

<sup>1</sup> МЕРФИ

В НИЯУ МИФИ разрабатывается новый крупномасштабный координатно-трековый детектор ТРЕК на основе многопроволочных дрейфовых камер. Совместная работа Черенковского водного калориметра НЕВОД и ТРЕК позволит исследовать наблюдаемый в экспериментах избыток числа мюонов в широких атмосферных ливнях, генерируемых первичными космическими лучами сверхвысоких энергий. Используемые дрейфовые камеры разработаны в ИФВЭ и применялись для нейтринных экспериментов на ускорителе У-70. В данных экспериментах плотность регистрируемых камерами частиц была относительно низкая, и реконструкция событий не вызывало больших сложностей. Однако в космофизическом эксперименте будут регистрироваться и исследоваться события со значительно большей плотностью заряженных частиц. Ранее на координатно-трековой установке на дрейфовых камерах (КТУДК) были применены такие методы реконструкции, как метод перебора, поиска прямолинейного участка и гистограммирования. Основное предпочтение отдано методу гистограммированию, так как он позволяет выделять и реконструировать квазипараллельные треки мюонов. Однако из-за наличия в экспериментальных данных послепульсов и вторичных треков эти методы приводят к ложным реконструкциям. В силу сложности реконструкции многочастичных событий по данным отдельной дрейфовой камеры разрабатывается новый подход для обработки данных на основе машинного обучения. В данной работе представлены результаты разработки этого

подхода, сравнение с методом гистограммирования и первые результаты применения нового метода к экспериментальным данным.

**Ядерные энергетические установки и ядерный топливный цикл / 71**

## **Исследование температурных полей реактора ВВЭР-СКД с использованием расчетного комплекса ANSYS CFX**

**Authors:** Vladimir Kukanov; Антон Лапин; Анна Лубина

**Corresponding Author:** kukanov\_vladimir587@mail.ru

В настоящее время становится актуальным формирование образа нового поколения легководных реакторов, приемлемых для переходного этапа развития ядерной энергетики от открытого к замкнутому топливному циклу и этапа замкнутого топливного цикла. Одним из способов повышения эффективности ЛВР при работе в замкнутом топливном цикле, учитывающих имеющийся опыт создания ВВЭР и БН, является использование легководяного теплоносителя с пониженной плотностью для охлаждения активной зоны реактора, переход к быстро-резонансному спектру нейтронов и к стальным оболочкам твэлов. Основная идея концепции быстрых реакторов, охлаждаемых пароводяной смесью, паром или СКД теплоносителем, состоит в соединении преимуществ широко освоенной в ЯЭ технологии водо-водяных корпусных реакторов и возможности самообеспечения топливом в замкнутом ядерном топливном цикле за счет его воспроизводства в реакторах с уран-плутониевой загрузкой активной зоны с быстрым или быстро-резонансным спектром нейтронов, получаемого путем существенного снижения доли и плотности легководяного теплоносителя. В настоящей работе представлены результаты построения упрощенной CFD модели реактора ВВЭР-СКД мощностью 1250 МВт(т). Модель является комплексной и состоит из более чем 40 элементов. Особенностью данной CFD модели является то, что теплогидравлические процессы в реакторе описываются с применением модели пористого тела с эмпирическими замыкающими соотношениями. В силу того, что реактор имеет аксиальную симметрию, была выбрана модель построения не всего реактора, а лишь его четверти для ускорения вычислительных процессов. Примененная в настоящем расчетном исследовании математическая модель основана на следующих допущениях: теплоноситель считается ньютоновской и несжимаемой средой, течение теплоносителя стационарное, турбулентное, границы проточной части считаются гидравлически гладкими стенками, вибрации стенок отсутствуют. В результате выполненных расчетов получены пространственные распределения давления, компонент вектора скорости и температуры теплоносителя первого контура РУ ВВЭР-СКД при номинальном режиме работы. Полученные в ходе работы распределения необходимы для определения положения участков с наибольшим градиентом температур внутрикорпусных устройств, шахты и корпуса реактора и поиска решений по его снижению.

Прикладная ядерная физика и теплофизика / 72

## Диагностика закипания теплоносителя на основе анализа флуктуаций теплогидравлических параметров

Author: Litvintsova Yuliya<sup>1</sup>

Co-author: Karen Muradyan

Corresponding Author: yelitvintsova@mephi.ru

<sup>1</sup> МЕРФИ

При эксплуатации легководных ядерных реакторов в условиях длительных топливных кампаний кипение теплоносителя может интенсифицировать коррозию оболочек ТВЭЛов. Поэтому необходимо уметь диагностировать и прогнозировать наступление переходных процессов от конвекции к зародышевому кипению теплоносителя на поверхности нагревателя. Известно, что температура поверхности нагревательного элемента всегда имеет стохастические колебания вблизи среднего значения. В работе Лу и др. [1] было отмечено, что при переходе от конвективного режима теплообмена к зародышевому кипению дисперсия таких флуктуаций достигает локального максимума. Авторы работы [2] показали, что перед началом переходного процесса низкочастотный спектр флуктуаций температуры становится близким к спектру Фликкер шума. Методы диагностики изменения режимов теплопередачи, основанные на анализе температурных флуктуаций поверхности теплопередачи нагревателей с малой тепловой инерцией (тонких платиновых проволочек), описаны в предыдущих работах авторов [3, 4]. Предложенные методы основаны на статистическом и частотном анализе флуктуаций температуры. Статистический анализ заключается в исследовании изменения среднеквадратического отклонения и критерия асимметрии распределения гистограмм колебаний температуры в переходных областях кривой кипения. Частотный анализ основан на оценке амплитудных спектров флуктуаций. Методы были экспериментально проверены для различных жидкостей в условиях кипения в большом объеме и при вынужденном движении. Настоящая работа посвящена проверке применимости указанных методов диагностики начала кипения теплоносителя на поверхности инерционных нагревателей диаметром до 6.5 мм. Установлено, что результаты частотного и статистического анализа колебаний температуры поверхности инерционных нагревателей и тонких проволочек качественно схожи. Для поиска корреляции между характеристиками флуктуаций температуры нагревателя и термогидравлическими параметрами теплоносителя был создан экспериментальный теплогидравлический контур. В прозрачном рабочем объеме расположены съемные испытательные секции с нагревателями. Контур оснащен различными типами датчиков температуры, давления и расхода. Показано, что для диагностики начала кипения теплоносителя на поверхности нагревателя представляет интерес не только анализ флуктуаций температуры, но и флуктуаций расхода и давления теплоносителя.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lu F et al. Nucleate Boiling Modes of Subcooled Water on Fine Wires Submerged in a Pool. *Experimental Heat Transfer*, Vol. 19, 2006, pp. 95-111
2. Skokov VN. et. al. Low Frequency Fluctuations with  $1/f$   $\alpha$  Power Spectrum in Transient Modes of Water Boiling on a Wire Heater. *High Temperature*, Vol. 48, No. 5, 2010, pp. 706–712

3. Balakin BV et. al. Analyzing temperature fluctuations to predict boiling regime. *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 4, 2017, pp. 219-222
4. Delov M. I. et al. Diagnostics of transient heat transfer regimes based on statistical and frequency analysis of temperature fluctuations. *Experimental Heat Transfer*. – 2020. – Vol. 33. – №. 5. – pp. 471-486

Приборы и методы экспериментальной ядерной физики / 73

## Способ очистки рабочего вещества для ксеноновых двухфазных эмиссионных детекторов

Author: Aleksey Shakirov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЭФИ

Corresponding Author: avshakirov@mephi.ru

В настоящее время наблюдается тенденция к увеличению массы рабочего вещества в международных экспериментах по поиску слабозаимодействующих частиц и редких процессов. Не так давно был запущен эксперимент по поиску темной материи XENON1T [1], использующий двухфазный эмиссионный детектор, заполненный 3.2 тоннами жидкого ксенона. Готовится к постановке аналогичный эксперимент LZ [2], в котором планируется использовать около 7 тонн жидкого ксенона. Есть проекты экспериментов, планирующих использовать десятки тонн жидкого ксенона [3]. Необходимым условием функционирования таких детекторов является использование рабочего вещества, очищенного от примесей, негативно сказывающихся на дрейфе зарядов в камере [4]. Для современных двухфазных эмиссионных детекторов ксенон чаще всего очищают многократным пропусканием газа через промышленные горячие металлические геттеры, однако этот способ не всегда эффективен. В частности, в случае использования ксенона с модифицированным изотопным составом такой способ очистки ксенона оказывается малопродуктивным и требует значительных материальных и временных затрат. Для решения этой проблемы разработан новый многоступенчатый метод подготовки рабочего объема двухфазных эмиссионных детекторов. Предлагаемая технология позволяет достигать высокого уровня чистоты массивных образцов ксенона с существенно меньшими затратами времени и средств. В настоящей работе экспериментально показано, что комплексный метод очистки, включающий генерацию в жидком ксеноне наночастиц титана [5], позволяет достигать уровня чистоты ксенона массой 200 кг, соответствующего нескольким миллисекундам времени жизни квазисвободных электронов ионизации, за несколько месяцев очистки. Комплексный метод очистки ксенона для двухфазных эмиссионных детекторов был успешно испытан на созданном в НИЯУ МИФИ детекторе нейтринного излучения РЭД-100 [6], который будет использован для регистрации эффекта когерентного рассеяния электронных антинейтрино на ядрах ксенона в условиях Калининской АЭС.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aprile E. et al. First Dark Matter Search Results from the XENON1T Experiment // *Phys. Rev. Lett.* 2017. Vol. 119, № 18.
2. Mount B.J. et al. LUX-ZEPLIN (LZ) Technical Design Report. 2017.
3. Aalbers J. et al. DARWIN: towards the ultimate dark matter detector // *J. Cosmol. As-*

- tropart. Phys. IOP Publishing, 2016. Vol. 2016, № 11. P. 017–017.
4. Aprile E. et al. Noble Gas Detectors. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006.
  5. Akimov D.Y. et al. Synthesis of Titanium Nanoparticles in Liquid Xenon by a High-Voltage Discharge // Tech. Phys. Lett. Pleiades Publishing, 2018. Vol. 44, № 7. P. 637–639.
  6. Akimov D.Y. et al. Status of the RED-100 experiment // J. Instrum. 2017. Vol. 12, № 6.

**Космо- и астрофизика / 74**

## **Вторичные антипротоны в околоземном пространстве по данным эксперимента ПАМЕЛА**

**Authors:** Svetlana Rodenko<sup>1</sup>; Andrey Mayorov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРФИ

**Corresponding Author:** sarodenko@mephi.ru

С 2006 по 2016 годы на борту космического аппарата Ресурс-ДК1 проводился эксперимент ПАМЕЛА. Спектрометр ПАМЕЛА состоит из набора детекторов, предназначенных для идентификации типа частицы, измерения величины и знака заряда, жёсткости, скорости и энергии частиц [1]. В 2011 году в эксперименте ПАМЕЛА впервые обнаружены антипротоны вторичного происхождения в околоземном пространстве (по данным накопленным с 2006 по 2009 г) и измерен их энергетический спектр [2]. Антипротоны могут рождаться при взаимодействии высокоэнергетических космических лучей с атмосферой Земли, а также при распаде антинейтронов альbedo. Согласно расчетам, такой источник может обеспечить большой вклад в энергетический спектр захваченных антипротонов, и прогнозируется, что результирующий поток будет на несколько порядков выше, чем поток антипротонов от прямого рождения пар в атмосфере [3, 4]. В работе приводятся результаты измерения потока антипротонов в радиационном поясе Земли по данным эксперимента ПАМЕЛА полученным за весь период его проведения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Picozza P. et al. // Astropart. Phys. 2007. V. 27. P. 296.
2. Adriani O. et al. // ApJ. 2011. V. 737. L 29 P. 5
3. Fuki, Int. J. Mod. Phys. 2005. A, 20, P. 6739
4. R. S. Selesnick et al. Geophys. Res. Lett. 2007. 34, P. 20

Физика элементарных частиц / 75

## First results and Current status of COHERENT experiment with LAr

**Author:** Alexander Kumpan

**Corresponding Author:** avkumpan@mephi.ru

Coherent elastic neutrino-nucleus scattering (CEvNS) is a fundamental process proposed more than 40 years ago but first observed in 2017 by the COHERENT collaboration. COHERENT deployed a suite of detectors at the SNS (ORNL, USA) to observe and study CEvNS on various nuclear targets. Argon nowadays is the lightest nuclear target which used for CEvNS research. CENNS-10 is a liquid argon scintillation detector located at 27 m from the SNS target. In this talk current status and first results of CENNS-10 science run will be presented.

Космо- и астрофизика / 76

## Модели гелиосферы

**Author:** Станислав Тимаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИЯУ МИФИ

**Corresponding Author:** what4wiki@gmail.com

Поток космических лучей, идущий к Земле, модулируется электромагнитным полем гелиосферы. Наземными детекторами наблюдаются различия этих модуляций при разной магнитной полярности Солнца. Особенно это проявляется в периоды минимумов солнечной активности. Для объяснения этих различий можно использовать разные модели гелиосферы. В данной работе рассматривались четыре модели: Паркера, гибридная Фиск-Паркер, Швадрона и скорректированное поле Паркера. Модель Паркера описывает магнитное поле как замороженное в радиально распространяющийся солнечный ветер, а опорные точки этого поля жестко зафиксированы на поверхности источника, вращающегося с одной угловой скоростью на всех широтах. Модель Швадрона рассматривает движение опорных точек силовых линий поля в районе перехода от медленного солнечного ветра к быстрому, приводящее к появлению широтной компоненты поля в некоторых областях. В гибридной модели для зон перехода от медленного ветра к быстрому вводится функция перехода, зависящая от характеристик корональных полярных дыр. В скорректированном поле Паркера рассматривается специальный параметр – параметр возмущения, отвечающий за отклонение поля от классической спирали в полярных регионах. В работе приводятся основные характеристики полей и проблемы их использования в качестве моделей гелиосферы. В нашем случае необходимо использовать такую модель гелиосферы, с помощью которой можно однозначно получить значения поля в любой точке гелиосферы. Можно попытаться объяснить наблюдаемые различия модуляций потока космических лучей с помощью подбора параметров рассмотренных моделей.

Материаловедение и технологии материалов / 77

## Применение быстрозакаленных припоев для получения паяных соединений керамики ВК94-1 со сплавом 29НК

**Authors:** Artem Gabov<sup>1</sup>; Alexander Ivannikov<sup>1</sup>; Oleg Sevryukov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРФИ

**Corresponding Author:** artem.g1297@yandex.ru

В современной вакуумной технике при конструировании электрических вводов используют элементы из алюмооксидной керамики. Создание герметичного переход с хрупкой керамики на технологичные металлические материалы является нетривиальной задачей. Такие соединения получают путём пайки с предварительной металлизацией поверхности керамики, однако возможно применение для этих целей и высокотемпературной пайки активными припоями. Исследование посвящено решению проблемы получения паяного соединения алюмооксидной керамики с коваром при помощи активных припоев с добавками титана и циркония. Проведена серия экспериментов по получению паяного соединения ВК94-1/29НК в детали сложной геометрии с использованием различных припоев. Микроструктура нескольких образцов исследована с помощью оптической и электронной микроскопии и показано, что паяный шов содержит трещины, которые зарождаются в сплаве 29НК и распространяются в радиальном направлении дальше по паяному шву. Причина возникновения этих трещин заключается в высоких термических напряжениях, возникающих в шве в процессе пайки, и в том, что при пайке вблизи шва выделяются хрупкие фазы (по типу FeTi), которые могут являться центрами зарождения трещин. Проведены расчёты возникающих термических напряжений, которые показывают, что уменьшение толщины зазора между паяемыми деталями со 150 до 100 мкм на диаметр и, следовательно, толщины припоя, приводит к снижению термических напряжений на краю шва на 12%.

Космо- и астрофизика / 78

## Поиск взаимосвязи высыпаний частиц из радиационного пояса Земли и космических гамма всплесков

**Author:** Daria Morozova<sup>1</sup>

**Co-author:** Andrey Mayorov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРФИ

**Corresponding Author:** dashia110999@mail.ru

В работе изучается взаимосвязь высыпаний частиц из радиационного пояса Земли и космических гамма всплесков. Для этого используются экспериментальные измерения потоков заряженных космических лучей в эксперименте РАМЕЛА и наблюдения гамма-всплесков обсерваторией Fermi. Оба прибора одновременно работали на околоземной орбите в период с 2008 по 2016 годы. Для момента времени каждого гамма-всплеска, обнаруженного обсерваторией Fermi в указанный период времени (всего

1783 всплеска), анализировался темп счета детекторов прибора PAMELA. Для поиска возможного сигнала от взаимодействия гамма-всплеска с заряженными частицами околоземного пространства построены ежегодные фоновые карты темпов счета детекторов время-пролётной системы. Анализировалась разница между их фоновым темпом счёта и темпом счета в момент прихода гамма-всплеска (в интервале времени за несколько минут до и после). Найдено несколько случаев, когда возникает значимое отклонение темпа счёта от фонового значения в момент прихода гамма-всплеска, длящееся до 5-10 минут после этого.

Физика элементарных частиц / 79

## Оптимизация отбора событий для процесса $Z(\ell)Z(\nu\nu)jj$ на данных эксперимента ATLAS C $\sqrt{S}=13$ ТэВ

**Author:** Dmitriy Zubov

**Co-authors:** Diana Pyatiizbyantseva ; Evgeny Soldatov

**Corresponding Author:** zubov\_dmitriy\_97@mail.ru

Рождение пар векторных бозонов тесно связано с неабелевой природой электрослабой теории и спонтанным нарушением калибровочной симметрии. Кроме того, предсказывается широкий спектр новых явлений за пределами Стандартной модели (СМ) физики частиц, связанный с рождением двубозонной пары. Изучение процессов рождения векторных бозонов является краеугольным камнем электрослабой теории и возможных сценариев физики за пределами СМ и составляет существенную часть физической программы Большого адронного коллайдера (БАК). Среди всех двубозонных процессов рождение пары Z-бозонов имеет наименьшее сечение, но, тем не менее, процесс вполне перспективен для измерения параметров СМ и поиска “новой” физики благодаря хорошему соотношению сигнал/фон в канале распада на четыре заряженных лептона. Соотношение сигнал/фон несколько хуже в канале распада на пару заряженных лептонов и пару нейтрино, но вероятность таких распадов выше. В работе описывается методика оптимизации отбора событий для рождения пары Z-бозонов и последующего распада на два заряженных лептона и два нейтрино. Задача оптимизации состоит в определении таких ограничений на переменные, при которых число сигнальных событий будет максимально, а фоновых – минимально. Оптимизация проводится путём максимизации всего одного параметра – сигнальной значимости – как функции оптимизируемых переменных, при этом рассматривается многомерный случай поиска экстремума. В результате оптимизации может быть достигнута максимальная значимость отбора событий, что позволит говорить об открытии за рамками СМ, либо поставить более жёсткие ограничения на проявления новой физики.

## Приборы и методы экспериментальной ядерной физики / 80

**Испытание мягкого водного бака для пассивной защиты экспериментальной установки РЭД-100 от фонового излучения на площадке КАЭС****Author:** Артём Пинчук**Co-author:** Антон Лукьяшин**Corresponding Author:** bogartemys2@gmail.com

С целью обеспечения защиты экспериментальной установки РЭД-100, созданной для регистрации упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах ксенона, от фонового излучения, предусмотрена пассивная защита. Конструкция пассивной защиты была разработана специально для размещения её на экспериментальной площадке Калининской АЭС. Пассивная защита детектора РЭД-100 - это толщи защитных слоёв воды (~60 см) и меди (~5 см) окружающие детектор со всех сторон. Для установки такой громоздкой пассивной защиты в экспериментальном зале станции, была разработана специальная сборно-разборная конструкция. Такие параметры были выбраны как довольно близкие к оптимальным: с одной стороны, защита должна обеспечивать эффективную экранировку детектора РЭД-100 от внешнего р/а-фона, с другой стороны она должна быть компактной и лёгкой в монтаже т. к. есть технические ограничения на размещение такого объекта внутри рабочего зала станции. В качестве резервуара для воды был выбран эластичный резервуар, сделанный из специальной ПВХ-ткани с поверхностной плотностью  $\sim 900 \text{ г/м}^2$  (рабочий температурный диапазон: от  $-30 \text{ С}$  до  $+50 \text{ С}$ ). Бак цилиндрической формы; диаметр  $D = 210 \text{ см}$ ; высота  $H = 300 \text{ см}$ . У бака двойное дно, а к верхней части боковой поверхности бака (вдоль образующих) прикреплен "фартук" длиной 100 см. На внешней стороне боковой поверхности, на высотах 190 см и 300 см расположены двухслойные поддерживающие ленты-манжеты с пробитыми в них люверсами (49 шт в каждой). По замыслу такой бак (в своём рабочем состоянии) должен быть закреплён в специальном поддерживающем каркасе. Полный объём воды в резервуаре:  $\sim 10.4 \text{ м}^3$  (без учёта его растяжения),  $\sim 11.4 \text{ м}^3$  (с учётом растяжения вблизи нижнего основания  $\sim 8\text{-}10 \text{ см}$  вдоль диаметра). Первое испытание резервуара (23 января 2020). Оригинальная конструкция со сливным патрубком. При уровне воды 80 см бак растянулся до 12-18 см вдоль диаметра вблизи основания. Присутствовали малые течи вблизи места крепления патрубка. Было принято решение прекратить испытание и проклеить стенки бака дополнительным слоем ПВХ-ткани (в два дополнительных слоя) с интервалом 20 см. Второе испытание резервуара (4 марта 2020). Модифицированная конструкция с дополнительными двойными лентами (только красные на фото) со сливным патрубком. При уровне воды 1 м 30 см непроклеенные места на баке начали растягиваться относительно проклеенных мест. Сильное растяжение стенок резервуара (10-12 см вдоль диаметра вблизи основания), малые течи вблизи места крепления патрубка. Было принято решение прекратить испытание и проклеить оставшиеся места дополнительным слоем ПВХ-ткани. Третье испытание резервуара (15-18 сентября и анализ 21 сентября 2020). Модифицированная конструкция с дополнительными двойными лентами (и красные и серые на фото, за исключением слоя у основания), без сливного патрубка. Места стыков проклеек и наиболее уязвимые места было решено укрепить тяжёлыми ремнями для крепления грузов. Уровень воды достигает двух метров. Принято решение оставить бак на выходные и продолжить набор воды в понедельник 21.09.2020. В субботу 22.09.2020 вечером нижний слой у основания бака разрывается по шву. Шов был с нахлестом  $\sim 2 \text{ см}$ . Принято решение устранить повреждения и усилить данную область на боковой поверхности бака. В мастерскую были направлены указания: заклеить разорванный участок заплаткой, укрепить нижний уровень бака дополнительным слоем ПВХ-ткани и также укрепить уязвимые места стыков. Четвертое испытание резервуара (23-27 октября 2020, благополучное). Места стыков и разорванный участок заклеены. Частично остался непроклеенным

только слой вблизи нижнего уровня бака, все места выше были проклеены дополнительными слоями ПВХ-ткани, максимальная нагрузка и растяжение приходится именно на этот участок (см рисунок). После предварительного испытания принято решение создать жесткую конструкцию для основания. В качестве материалов была выбрана доска из ФСФ размерами 60x10x0.4 стянутая ремнями для крепления грузов. Также ремнями были стянуты наиболее уязвимые места и стыки дополнительных лент-проклеек. В исходном состоянии резервуар прошел испытание и был заполнен на 3 метра после чего простоял 6 дней с 23.10.2020 до 29.10.2020. В ходе испытания течей не обнаружено. В качестве улучшения текущей конструкции, для эксперимента на площадке КАЭС, была закуплена доска размерами 120x10x0.6. Также для устранения потенциально возможных течей закуплена липкая лента Flex Tape (позволяющая заклеивать области корпуса, находящиеся внутри водной среды). Весь комплекс работ был выполнен при поддержке Российского Научного Фонда (РНФ) и программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (ПКС МИФИ). Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку Российскому научному фонду (грант №18-12-00135, 12.04.2018) и Программе повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (контракт № 02.a03.21.0005, 27.08.2013)

Космо- и астрофизика / 81

## Исследование возможностей поиска гамма-излучения от карликовых галактик и галактик низкой поверхностной яркости по данным обсерватории Fermi

**Author:** Ksenia Chelidze<sup>1</sup>

**Co-author:** Andrey Mayorov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРФИ

**Corresponding Author:** tchelidze.k@ya.ru

Сегодня известно, что около 25% плотности энергии Вселенной составляет т.н. тёмная материя. Существует множество гипотез о её природе, некоторые из которых не исключают, что тёмная материя может состоять из частиц [1]. Возможно, эти частицы нестабильны и распадаются или могут взаимно аннигилировать с образованием известных частиц. Так, например, такой механизм позволяет объяснить избытки в галактических космических лучах позитронов и, возможно, антипротонов, по сравнению со стандартной моделью физики космических лучей, которые были обнаружены в эксперименте PAMELA [2] и подтверждены в эксперименте AMS-02 [3]. Кроме того, не исключена возможность превращений частиц тёмной материи в гамма-излучение. В таком случае следует ожидать потока гамма-квантов от сгустков тёмной материи, и этот сигнал в некоторых случаях ожидается выше уровня чувствительности современных гамма-обсерваторий [4]. В работе используются данные космического гамма-телескопа [5], работающего на околоземной орбите с 2008 года по настоящее время. В настоящем исследовании интерес представляет поиск гамма-излучения от таких объектов, как карликовые галактики и галактики низкой поверхностной яркости. Он обусловлен тем, что возможный поток гамма-излучения от них будет связан именно с тёмной материей, поскольку источников излучений высокой энергии в таких галактиках нет. При этом присутствие тёмной материи практически

необходимо, чтобы обеспечить гравитационное удержание вещества таких небольших галактик. В докладе приводятся результаты поиска гамма-излучения от некоторых подобных источников из каталога (статьи) [6] и их анализ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. “Dark Matter Candidates from Particle Physics and Methods of Detection”, Jonathan L. Feng <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-astro-082708-101659>
2. Adriani, O. et al. “Cosmic-Ray Positron Energy Spectrum Measured By Pamela”. Phys. Rev. Lett. 111.8 (2013): 081102. Web. <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.111.081102>
3. Phys. Rev. Lett. 110, 141102 (2013), First Result from the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station: Precision Measurement of the Positron Fraction in Primary Cosmic Rays of 0.5-350 GeV, <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.110.141102>
4. “Gamma ray signals from dark matter: Concepts, status and prospects”, Torsten Bringmann, Christoph Weniger <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221268641200009X>
5. <https://fermi.gsfc.nasa.gov/science/instruments/lat.html>
6. “Shadows in the Dark: Low-Surface-Brightness Galaxies Discovered in the Dark Energy Survey”, D. Tanoglidis, A. Drlica-Wagner, K. Wei, T. S. Li, F. J. Sánchez <https://arxiv.org/abs/2006.04294>

Физика элементарных частиц / 82

## Исследование характеристик сцинтилляционных пластин для регистрации тепловых нейтронов на основе ZnS(Ag) с добавками ${}^6\text{Li}$ или ${}^{10}\text{B}$

**Authors:** Tatiana Tretyakova<sup>1</sup>; Андрей Почестнев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРФИ

**Corresponding Author:** tutimaggie1@gmail.com

В работе проводится сопоставление характеристик неорганических сцинтилляторов для регистрации тепловых нейтронов на основе ZnS(Ag) с добавками, чувствительными к тепловым нейтронам. В качестве поглотителей нейтронов использовались изотоп  ${}^6\text{Li}$  в соединении LiF и изотоп  ${}^{10}\text{B}$  в соединении  $\text{B}_2\text{O}_3$ . В ходе исследований были протестированы образцы пластин, изготовленные из сцинтилляционных композиций LRB1 и LRB2 на основе ZnS(Ag) +  $\text{B}_2\text{O}_3$  (ЗАО «НПФ «Люминофор» [1]), пластины на основе ZnS(Ag) +  ${}^6\text{LiF}$  и экран промышленного производства от компании Saint-Gobain Crystals [2]. Все исследуемые образцы имели площадь  $100\text{ см}^2$ . Исследования проводились на стенде с применением источника нейтронов  ${}^{252}\text{Cf}$ . Тепловые нейтроны регистрируются через тяжелые заряженные частицы, образовавшиеся в результате взаимодействия нейтронов с добавками-мишенями:  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^{10}\text{B}$  [4]. Образовавшиеся  $\alpha$ -частицы другие ядра [4] вызывают сцинтилляционные вспышки в ZnS(Ag), которые регистрируются с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ-200. Для отбора импульсов, вызванных захватом тепловых нейтронов, использовалось специальное программное обеспечение, алгоритм которого основан на отборе

сигналов по форме импульса. Параметрами отбора являются время нарастания фронта и отношение амплитуд быстрой компоненты  $A_{fast}$  (амплитуда в момент срабатывания триггера, который вырабатывается при превышении порога на дискриминаторе), к максимальной амплитуде  $A_{max}$ . Время нарастания фронта  $t$  определяется длительностью импульса от  $A_{fast}$  до  $A_{max}$ . По полученным данным построены распределения амплитуд, времени нарастания фронта, скорости счета зарегистрированных нейтронов и шумовых импульсов. Показано, что образцы на основе  ${}^6\text{Li}$  обладают лучшими характеристиками. Работа выполнена в Научно-образовательном центре НЕВОД НИЯУ МИФИ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://luminophor.ru/>(ЗАО «НПФ «Люминофор»)
2. <https://www.wacker.com/cms/en-us/home/home.html> (Сайт производителя)
3. <https://www.crystals.saint-gobain.com/>(Сайт производителя)
4. Аллен В.Д. Регистрация нейтронов. Ред. Рыбаков Б.В. Москва, Государственное издательство литературы в области атомной науки и техники, 1962.

Приборы и методы экспериментальной ядерной физики / 83

## Моделирование проектируемого детектора переходного излучения Large TRD с помощью пакета программ GEANT4

**Author:** Serafima Nechaeva<sup>1</sup>

**Co-authors:** A A Savchenko<sup>2</sup>; A Romaniouk<sup>1</sup>; V Tikhomirov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> МЕРФИ

<sup>2</sup> МЕРФИ, National Research Center Kurchatov Institute

<sup>3</sup> P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences

**Corresponding Author:** serafima.nechaeva@cern.ch

В данной работе рассматривается построение модели проектируемого полномасштабного детектора переходного излучения (ДПИ) Large TRD на основе тонкостенных пропорциональных камер с помощью программного пакета GEANT4. Детектор будет предназначен для регистрации адронов с энергиями до ~6 ТэВ, что соответствует гамма-факторам до  $10^4$ . Данная модель GEANT4 базируется на модели эксперимента 2018 года по тестированию прототипов ДПИ на основе тонкостенных пропорциональных камер. В работе приведено сравнение результатов моделирования ДПИ Large TRD с помощью GEANT4 и с помощью специализированной программы по моделированию ДПИ, а также аналогичные сравнения с данными для эксперимента 2018 года.

Приборы и методы экспериментальной ядерной физики / 84

## Новый фотоэлектронный блок квазисферического модуля КСМ-6М

**Author:** Татьяна Каретникова<sup>1</sup>

**Co-authors:** Виктор Киндин ; Константин Компаниец ; Никита Пасюк ; Семен Хохлов

<sup>1</sup> НИЯУ МИФИ

**Corresponding Author:** tanushkakta@mail.ru

Черенковский водный детектор (ЧВД) НЕВОД объемом 2000 м<sup>3</sup> предназначен для регистрации частиц космических лучей на поверхности Земли. Внутри бассейна размещена детектирующая система, которая представляет собой пространственную решетку квазисферических модулей (КСМ), регистрирующих черенковское излучение с любого направления, практически с одинаковой эффективностью. КСМ состоит из металлического корпуса, шести фотоумножителей ФЭУ-200, внутримодульной электроники и двух подводных кабелей. Шесть фотоумножителей, ориентированных вдоль координатных осей, обеспечивают КСМ свойство квазисферичности, поскольку сумма квадратов амплитуд трех засвеченных фотоумножителей не зависит от направления прихода черенковского излучения. Другим важным свойством КСМ является широкий динамический диапазон регистрируемых сигналов от 1 до 105 фотоэлектронов, который достигается съемом сигналов с двух динодов. ЧВД НЕВОД создавался для проведения длительных экспериментальных измерений, поэтому при разработке всех систем предъявлялись повышенные требования: фотоумножители должны обладать низкими темновыми токами, хорошей чувствительностью к черенковскому излучению и стабильностью характеристик в течение длительного времени; электроника должна обеспечивать стабильные коэффициенты преобразования и надежность; конструкция КСМ должна быть герметичной. Для расширения существующей детектирующей системы ЧВД НЕВОД будут использоваться фотоумножители Hamamatsu R877, для которого разработана новая плата ПХ-514М, содержащая резистивный делитель и два зарядо-чувствительных усилителя. В докладе приводятся методики исследования характеристик фотоумножителей Hamamatsu R877 и новых плат ПХ-514М. Обсуждаются результаты исследований диапазонов линейности 10-го и 7-го динодов ФЭУ и зарядо-чувствительных усилителей, результаты измерений темпа счета импульсов анодных темновых токов ФЭУ.

**Космо- и астрофизика / 85**

## Cluster of antistars as a source of antihelium in a flux of galactic cosmic rays

**Author:** Anastasia Kirichenko<sup>1</sup>**Co-authors:** Andrey Mayorov<sup>1</sup>; Maxim Khlopov<sup>2</sup><sup>1</sup> МЕРФИ<sup>2</sup> Universit'e de Paris, Astroparticule et Cosmologie**Corresponding Author:** aokirichenko@yandex.ru

Macroscopic cosmic antimatter objects are predicted in baryonasymmetrical Universe in the models of strongly nonhomogeneous baryosynthesis. We test the hypothesis of the existence of an old globular cluster of anti-stars in the galactic halo by evaluating the flux of helium anti-nuclei in galactic cosmic rays. Due to the symmetry of matter and antimatter we assume that the antimatter cluster evolves in a similar way as a matter cluster. The energy density of antiparticles in galactic cosmic rays from antimatter globular cluster is estimated. We propose a method for the propagation of a flux of antinuclei in a galactic magnetic field from the globular cluster of antistars in the Galaxy.

**Приборы и методы экспериментальной ядерной физики / 86**

## Идентификация тепловых нейтронов в сцинтилляторах на основе ZnS с примесями <sup>6</sup>Li или <sup>10</sup>B

**Authors:** Polina Kuzmenkova<sup>1</sup>; Dmitry Gromushkin<sup>1</sup><sup>1</sup> МЕРФИ**Corresponding Author:** pskuzmenkova@mephi.ru

Регистрация нейтронов сцинтилляционными методами в последнее время получает все более широкое применение при создании систем контроля техногенного нейтронного фона, а также комплексов технического контроля за ядерным топливом и изделиями из делящихся материалов. При применении сцинтилляторов на основе ZnS с примесями <sup>6</sup>Li или <sup>10</sup>B возможна идентификация зарегистрированных нейтронов, основанная на различии в форме импульсов, образовавшихся в результате регистрации нейтронов и легких заряженных частиц. Для легких заряженных частиц характерна небольшая длительность импульса, в то время как при прохождении тяжелых заряженных частиц, которые являются продуктами реакции захвата тепловых нейтронов, длительность импульса значительно больше. Для разделения этих импульсов применяются следующие методы: интегрирования заряда [1], анализа градиента импульса [2] и упрощенного интегрирования заряда [3]. В докладе приводятся алгоритмы автоматического подбора параметров для каждого метода и определения условий отбора. Тестирование алгоритмов осуществлялось с использованием

экспериментальных данных, полученных с источником нейтронов и без него, а также без использования сцинтиллятора. Проведено сравнение методов отбора и предложены способы повышения их точности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Polack J. K., et al. An algorithm for charge-integration, pulse-shape discrimination and estimation of neutron/photon misclassification in organic scintillators // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2015, vol. 795, pp. 253-267
2. Ranucci G. An analytical approach to the evaluation of the pulse shape discrimination properties of scintillators // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1995, vol. 354, pp. 389-399
3. Gamage K.A.A., Joyce M.J., Hawkes N.P. A comparison of four different digital algorithms for pulse-shape discrimination in fast scintillators // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2011, vol. 642, pp. 78-83

Физика элементарных частиц / 87

## Моделирование потерь энергии VHE-мюонов в воде

**Author:** Svetlana Maltseva<sup>1</sup>

**Co-author:** Semen Khokhlov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРФИ

**Corresponding Author:** svetlana-malceva-1997@mail.ru

Спектр мюонов сверхвысоких энергий (VHE-мюоны выше 100 ТэВ) представляет особый интерес для физики высоких энергий. Надежное измерение спектра позволит проверить существующие модели ядро-ядерных взаимодействий, используемых для моделирования прохождения космических лучей через атмосферу, и в случае существенного отличия экспериментального и расчётных спектров явится серьезным свидетельством включения какого-то нового процесса генерации мюонов при таких энергиях. В то же время измерение спектра мюонов с энергиями выше 100 ТэВ является нетривиальной экспериментальной задачей, которая, по всей видимости, может быть решена на больших нейтринных телескопах группы VLvNT: IceCube, Baikal-GVD и KM3Net. В нейтринных телескопах спектр VHE-мюонов может быть измерен по спектру каскадных ливней; однако эта задача осложняется тем, что высокоэнергичный мюон приходит в сопровождении большой группы мюонов меньших энергий. Для определения параметров отбора высокоэнергичных каскадов в таких условиях и оценки ожидаемой статистики необходимо детальное изучение процессов потерь энергии мюонами различных энергий, в том числе VHE-мюонами. Для моделирования потерь мюонов высоких энергий была написана программа на языке C++, в которой учитываются четыре процесса: ионизационные потери, рождение  $^{+-}$  пар, тормозные потери и неупругое взаимодействие мюонов с ядрами. Все четыре процесса потерь энергии разделены на непрерывные, с относительной передачей энергии меньше 0.1%, и дискретные, с относительной передачей энергии больше 0.1%. Принцип работы программы заключается в следующем: сначала разыгрывается пробег мюона, затем рассчитываются непрерывные потери, далее происходит выбор процесса дискретных потерь, а затем разыгрывается переданная во взаимодействии энергия, вычисляется оставшаяся энергия мюона, и все действия повторяются до тех пор, пока мюон не потеряет свою энергию полностью. Программа была протестирована на тонких слоях, полученные результаты сравнивались с ожидаемым распределением. Для проведения пробного моделирования в программе разыгрывались

мюоны, начиная от энергии 2 ТэВ с показателем дифференциального спектра 3.7, и рассматривались спектры мюонов на глубине, спектры всех каскадов и спектры максимальных каскадов. Кроме того, с помощью данной программы были получены энерговыведения и рассчитаны медианы энерговыведений для мюонов с энергией 31.6 ТэВ, 100 ТэВ, 316 ТэВ и 1000 ТэВ. В докладе обсуждается алгоритм работы программы, результаты ее тестирования и результаты моделирования мюонов фиксированных энергий и мюонов со степенным энергетическим спектром.

Прикладная ядерная физика и теплофизика / 94

## Методика диагностики переходных режимов кипения на основе частотного анализа флуктуаций температуры в режиме реального времени

**Author:** Карен Мурадян<sup>1</sup>

**Co-authors:** Юлия Литвинцова<sup>1</sup>; Кирилл Куценко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИЯУ МИФИ

**Corresponding Author:** dmitrii.kuzmenkov@mail.ru

При эксплуатации энергетического оборудования важную роль для обеспечения стабильности и безопасности играют условия теплоотдачи, которые реализуются между теплоотдающей поверхностью и теплоносителем. При нарушении нормальных условий эксплуатации, а также в аварийных ситуациях, могут возникать переходные и нестационарные процессы теплоотдачи, своевременная диагностика которых позволит не только обеспечить мониторинг режима теплоотдачи в режиме реального времени, но и дать рекомендации для предупреждения развития нежелательных процессов в теплообменном оборудовании. В работах [1-3] было показано, что для диагностики переходных процессов (переход от конвекции к пузырьковому кипению и от пузырькового к пленочному кипению) можно использовать амплитудно-частотный анализ (АЧХ) флуктуаций температуры (или перегрева относительно температуры насыщения жидкости) нагревателя. Как было показано в работе [1], в начале переходного процесса низкочастотная часть спектра флуктуаций температуры приобретает вид фликкер - шума. В работах [2, 3] были предложены общие методы диагностики режима теплоотдачи на основе амплитудно-частотного анализа флуктуаций температуры теплоотдающей поверхности. Идея предложенного метода заключается в аппроксимации амплитудного спектра флуктуаций характерной непрерывной функцией распределения (Фликкер шум, распределение Лоренса и пр.) и последующем анализе констант аппроксимации, которые имеют различные характерные значения в различных режимах теплоотдачи. Для реализации амплитудно-частотного метода диагностики режимов теплоотдачи в режиме реального времени необходимо обеспечить непрерывный сбор и анализ экспериментальных данных, в том числе преобразование Фурье флуктуаций температуры и аппроксимацию полученной АЧХ. Целью настоящей работы является разработка алгоритма для обработки и анализа экспериментальных данных по флуктуациям температуры в режиме реального времени для диагностики режимов теплоотдачи. Для достижения поставленной цели был реализован экспорт данных из системы сбора экспериментальных данных MWBridge в MatLab в виде вектора. В зависимости от количества элементов экспортированного вектора экспериментальные данные обрабатывались либо дискретным, либо быстрым

(более чем 65 000 точек) преобразованием Фурье, после чего полученная амплитудно-частотная характеристика аппроксимировалась функциями вида  $C/f^\alpha$  и  $C\beta/(\beta^2 + f^2)$ . Рассчитанные амплитудно-частотная характеристика и ее аппроксимация визуализировались в виде графика, который обновляется в режиме реального времени. Предложенный алгоритм в сочетании с системой сбора экспериментальных данных может быть использован для создания системы диагностики переходных режимов теплоотдачи на основе амплитудно-частотного анализа флуктуаций температуры теплоотдающей поверхности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Skokov VN. et. al. Low Frequency Fluctuations with  $1/f \propto$  Power Spectrum in Transient Modes of Water Boiling on a Wire Heater. High Temperature, Vol. 48, No. 5, 2010, pp. 706–712.
2. Balakin BV et. al. Analyzing temperature fluctuations to predict boiling regime. Thermal Science and Engineering Progress, Vol. 4, 2017, pp. 219-222.
3. Delov M. I. et al. Diagnostics of transient heat transfer regimes based on statistical and frequency analysis of temperature fluctuations. Experimental Heat Transfer. – 2020. – Vol. 33. – №. 5. – pp. 471-486.

Физика элементарных частиц / 95

## Study of elliptic and triangular flow of identified particles in Au+Au collisions $\sqrt{s_{NN}} = 11.5 - 62.4$ GeV in the STAR experiment

**Author:** Alexey Povarov<sup>1</sup> (for the STAR Collaboration)

<sup>1</sup> MEPhI

**Corresponding Author:** povarovas@gmail.com

A main purpose of the STAR experiment at RHIC is to study the properties of matter formed in heavy ion collisions. Azimuthal anisotropy of produced particles is one of the important observables sensitive to the transport properties of the strongly-interacting matter. In this work, we report results for elliptic ( $v_2$ ) and triangular ( $v_3$ ) flow of identified particles ( $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ ,  $p$ ,  $\bar{p}$ ) in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 11.5, 14.5, 19.6, 27, 39$  and  $62.4$  GeV. Measurements of the anisotropic flow coefficients  $v_2$  and  $v_3$  are presented as a function of particle transverse momenta ( $p_T$ ). The elliptic and triangular flow show mass ordering at  $p_T < 2$  GeV/c and meson/baryon splitting at  $2 < p_T < 3$  GeV/c. New measurements of  $v_3$  serve important model constraints, and provide new information about transport properties of QGP.

Пленарное заседание / 96

## Актуальные вопросы анализа безопасности при авариях и управление авариями на атомных станциях

**Author:** Сергей Катковский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НТЦ "ЯРБ"

Лекция посвящена вопросам, связанным с управлением авариями на атомных станциях и анализом безопасности, выполняемым для обоснования мер по управлению авариями. Существенным моментом управления авариями является наличие у действий персонала по управлению авариями как позитивных, так и негативных последствий, в особенности при тяжелых запроектных авариях. Для выбора наиболее эффективных мер по управлению авариями должны выполняться расчетные анализы аварий. На примере тяжелых ЗПА на АЭС с ВВЭР рассмотрены примеры управляющих действий, показаны их позитивные и негативные последствия, указано, что должно быть рассмотрено в анализах, выполняемые для обоснования мер по управлению ЗПА.

Космо- и астрофизика / 97

## Применение методов обратной свертки для восстановления энергетического спектра космических лучей

**Author:** Olga Levanova<sup>1</sup>

**Co-authors:** Andrey Mayorov<sup>1</sup>; Yuriy Bogomolov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> МЕРИ

<sup>2</sup> Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова

**Corresponding Author:** olaydy@gmail.com

В докладе рассматривается проблема восстановления истинного распределения физической величины из измеренного и искаженного из-за приборных эффектов. Данная задача имеет название обратной свертки (unfolding, деконволюция) и для ее решения наиболее распространенными методами являются байесовский алгоритм д'Агостини, подход на основе алгоритма SVD и регуляризационный метод TUnfold. Необходимо сравнить различные подходы и выбрать оптимальные условия для использования. В качестве объекта для анализа работы алгоритмов был выбран энергетический спектр частиц в космических лучах, смоделированный методом Монте-Карло и измеренный магнитным спектрометром PAMELA. Основное внимание уделено анализу качества восстановления спектра для различных значений параметров алгоритмов, а также сравнительному анализу подходов в зависимости от особенностей дискретизации спектра. Основным результатом является предложенный подход к подбору оптимального значения параметра регуляризации для метода на основе SVD и количества итераций для байесовского метода.

Космо- и астрофизика / 98

## **Вариации потока ядер лития ГКЛ в диапазоне жесткостей от 0.5 до 100 ГВ по данным эксперимента PAMELA**

**Author:** Artem Epifanov<sup>1</sup>

**Co-author:** Andrey Mayorov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МЕРИ

Изучение временной зависимости потоков легких ядер позволяет дополнить существующую модель долговременной солнечной модуляции галактических космических лучей (ГКЛ). На сегодняшний день отсутствуют данные вариации потоков ядер лития в течение 11-ти летнего цикла солнечной активности при жесткостях от 2 ГВ [1]. В работе приведены энергетические спектры ядер лития галактического происхождения, измеренные в рамках эксперимента PAMELA в диапазоне жесткостей от 0.5 до 100 ГВ. Полученные спектры усреднены по 6-месячным интервалам и покрывают часть 23-24 циклов солнечной активности с 2006 по 2014 гг. Установлены вариации низкоэнергетической части спектра от 0.5 до порядка 10 ГВ. Их поведение согласуется с изменениями солнечной активности в рассматриваемом интервале времени.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. - DOI: 10.1016/j.asr.2017.05.025