**Часть V Время Нептуна**

 *Пришло то время, когда время уже ушло…*

Миллион лет осваивал человек Землю. Истощилась матушка Земля. Слетали на Луну – ничего там нет, кроме гелия-3. А что в нем толку, если термояд поджечь не умеем? Загляделись на Марс, жизни там не нашли, но с помощью нейтронов и Валерия Швецова из Лаборатории нейтронной физики нашли воду. А что толку в воде, если не добраться туда человеку? Юпитера грозного побоялись тревожить, и кое-как договорились с Ураном. Тот зажег «лампочки Ильича» при содействии строптивого Плутона, которого приходится держать на цепи. И лишь голубого красавца Нептуна как-то не замечали на ярко-голубом небе. Заметили сперва «на кончике пера» французы и англичане, передрались из-за этого, а потом и забыли. Второе открытие Нептуна состоялось в ЛНФ ОИЯИ, в самое подходящее время. Лишь бы оно не ушло…

# Многоликий Нептун.

Начну с совета моим читателям. Прогуливаясь теплыми летними вечерами по набережной Волги, не стесняйтесь обмениваться улыбками с идущими навстречу вам такими же, как вы, на вид безразличными, а на самом деле любопытными отдыхающими. Если один (лучше – одна) из них проявит внимание к вашей персоне (или вашему гардеробу), поторопитесь с банальной, но весьма уместной репликой: «Не правда ли, отличная погода?», и собеседник для продолжения прогулки вам обеспечен.

Во время променада можете озадачить вашего спутника вопросом: «Сейчас много говорят о Нептуне. Что Вы знаете об этом?» Скорее всего, услышите в ответ: **«Нептун? Это, кажется, п**ланета?» Собеседник, увлекающийся астрономией, поспешить вас просветить: «Нептун – это самая удаленная от Солнца восьмая планета, названа так потому, что её орбита находится сразу за Ураном, и открыли её «на кончике пера» после обнаружения отклонения планеты Уран от правильной, эллиптической траектории. Нептун называют «голубой планетой» – так её увидел глаз телескопа космического аппарата «Новые горизонты». И покажет вам фото планеты по смартфону.

Если собеседник увлекается историей и в детстве предпочитал книги про морские путешествия, то ответит: «Нептун? Это - бог морей и океанов в Древнем Риме. Именно древнеримский бог, брат Юпитера – в Древней Греции бога морей называли Посейдоном». И добавит: «Но Дон так и не посеяли, ха-ха!»

А если ваш новый знакомый окажется физиком… Кстати, такая встреча в научной Дубне пока ещё вероятна: около 5% вероятности в вечерние часы пик и немного меньше в рабочее время – всё-таки некоторые из физиков, вопреки распространенному мнению, ходят на работу. Итак, если ваш спутник окажется физиком, то он расскажет о химическом элементе *нептунии,* расположенном в жутко популярной в Дубне таблице Менделеева между ураном и плутонием(читать факультативно*):*

«Нептуний был первым искусственно полученным трансурановым элементом. В 1940 году Мак-Миллан в продуктах облучения урана нейтронами обнаружил радиоактивный элемент (изотоп) с периодом полураспада 2,3 суток. Эмилио Сегрэ, ранее сотрудник Энрико Ферми по пионерским опытам облучения урана, установил, что химические свойства этого элемента подобны свойствам редкоземельных элементов, и тем самым подтвердил догадку Ферми о возможности существовании трансуранов. Мак-Милланом была изучена реакция образования изотопа нептуния: уран - 238 после захвата нейтрона превращается в уран – 239, который в свою очередь после бэта-распада с периодом полураспада 23 мин превращается в нептуний-239. В 1942 г. был открыт другой изотоп - нептуний-237 (Сиборг и Валь), распадающийся через альфа-излучение с периодом полураспада 2,25 млн. лет. Символ Np предложен в 1948 г.»

Между прочим, почему элемент «нептуний», а не «нептун»? Скорее, вопрос следует задать иначе: почему элемент «уран», а не «ураний»? Ведь другой сосед нептуния вовсе не «плутон», а плутоний. В 18-19 веках писали именно «ураний»; как он стал ураном – похоже, никто не знает. Не знаю и я, клянусь Нептуном!

На прощание задайте своему виртуальному собеседнику другой вопрос: «Что такое «Ника?». В Дубне девять из десяти ответят: «Самый сильный ускоритель, который строят в ОИЯИ». Так вот, после нудного опроса жителей я возвращаюсь к сути данной главы и утверждаю, что через пару лет на вопрос «Что такое Нептун?» каждый второй ответит: «Это все знают: Нептун – новый ядерный реактор, который строится в ОИЯИ».

«НЕПТУН» – третье поколение импульсных реакторов

Во время следующей прогулки по единственной в Московской области набережной великой русской реки я вновь встретил свою новую знакомую незнакомку. Теперь мы радостно улыбнулись друг другу, и моя приятельница, по всей вероятности посетившая накануне портал ОИЯИ в Интернете, начала с вопросов ко мне:

– По всей вероятности, Вы имеете отношение к Лаборатории Нейтронной физики и конкретно – к её реакторам, не так ли?

Я скромно пожал плечами.

– В таком случае, не могли бы Вы пояснить кое-что? Меня заинтересовали эти ИБРы – тигры. Сколько их было в ОИЯИ?

– ИБР – это аббревиатура понятия «импульсный реактор на быстрых нейтронах». Точнее было бы называть его «пульсирующий реактор», но Дмитрий Иванович Блохинцев предложил именно такое имя своему «детищу», первому в мире, запущенному в июне 1960 года в ОИЯИ. После этого последовал (1965 год) также первый в мире импульсный бустер – гибрид реактора и ускорителя-микротрона (Федор Львович Шапиро, Сергей Петрович Капица, Иван Максимович Матора и др.). Кстати, на ИБРе было сделано самое выдающееся в ОИЯИ открытие – обнаружение ультрахолодных нейтронов (1968 год, Шапиро, Стрелков, Лущиков и Покотиловский) . Были ещё модификации этих реакторов – ИБР-30 (тот же ИБР повышенной мощности), ИБР-30 с инжектором ЛУЭ-40. Этим установкам и людям, создававшим их, посвящены несколько глав моих мемуаров, которые я обязуюсь презентовать Вам в следующую встречу.

– О! Спасибо! Я с интересом прочитаю Ваши мемуары.

– Там же рассказано и об ИБР-2, который работал с 1982 по 2006 год, и о ныне работающем ИБР-2М:

*Мы тобой не устанем гордиться*

*И всегда повторяем слова:*

*Самый импульсный, самый быстрый,*

*Наш реактор, наш ИБР-2!*

– Пожалуйста, кратко расскажите о принципе работы этих устройств.

– Эти шесть установок составляют два поколения ИБРов. В первом поколении (1960-2001) использовали металлический плутоний как ядерное топливо, охлаждаемое воздухом, и блок урана, запрессованный в стальной диск для модуляции коэффициента размножения нейтронов и генерации импульсов мощности …. Простите, я, наверное, сложно объясняю?

– Ничего, нормально, я ведь тоже имею высшее техническое образование, хотя в конце концов стала дизайнером. Продолжайте.

– Во втором поколении ИБРов (1984 – 2032 предположительно) топливом служит керамическая двуокись плутония, охлаждаемая жидким натрием, а генерация импульсов обеспечивается ротором подвижного никелевого отражателя нейтронов. Такая схема реактора дает возможность работать на мощности до 2000 киловатт вместо 20 кВт, соответственно поставляя физикам для исследований строения веществ во столько же раз больше нейтронов. Кстати, в пике импульсов, которые происходят 5 раз в секунду, мощность ИБР-2 достигает 1600 мегаватт – это примерно мощность блока атомной электростанции.

– Ничего себе! Так этого хватит на все нужды Дубны, а может быть, и Тверской области!

– Это только в момент импульса, который длится одну десятитысячную долю секунды. Тепла ИБРы дают совсем немного, но это и не нужно – их задачей является обеспечить физиков нейтронами. Пиковая плотность потока нейтронов на поверхности замедлителя…. Нет, не буду утомлять вас цифрами. В общем, ИБР-2М – самый высокопоточный в мире источник нейтронов для исследований на выведенных пучках, так скажем.

– Что же Вы замолчали?

– Мне показалось, что Вам неинтересно.

– Продолжайте, пожалуйста.

– Несколько лет назад, точнее в 2015 году, начались дискуссии о будущем Лаборатории Нейтронной Физики после исчерпания ресурсов реактора ИБР-2М. Заговорили о новом источнике нейтронов.

– Что значит «исчерпание»? Исчерпание природных ресурсов – это понятно. А что в реакторе «исчерпывается»? Зачем строить новый реактор? Ведь это очень дорого.

– Нейтроны, которые регистрирует физик-исследователь, образуются при делении ядра плутония. С течением времени количество ядер плутония в реакторе уменьшается. Плутоний можно пополнять, но не так долго. Предел работы ИБР-2М – чуть более 20 лет. Можно заменить реактор целиком на новый, как это было сделано в период 2006-2011 годов, но не заменишь бетонную защиту от излучений, всю инженерную инфраструктуру, которая изнашивается и буквально, и морально. А главное – за несколько десятков лет меняются ориентиры и цели нейтронных экспериментов, возникают новые научные задачи в биологии, археологии, науках о Земле, делаются попытки ревизии фундаментальных законов физики, и соответственно требуются источники более интенсивные, с другими параметрами. Здесь также налицо *исчерпание возможностей* реакторов с низкой мощностью делений. Более трех лет в нашей Лаборатории нейтронной физики рассчитывались и обсуждались десятки концепций будущего интенсивного источника нейтронов, который смог бы соперничать с лучшими источниками на Западе, использующими протонные ускорители. В результате остановились на том, что наилучшим источником нейтронов будет пульсирующий реактор на быстрых нейтронах с ядерным топливом на основе нептуния…

 Сравнение концепций будущего источника проводилось по шести параметрам: плотность потока тепловых нейтронов, длительность импульса тепловых нейтронов, тепловая мощность, фоновая мощность , срок службы установки и реализуемость создания . В результате был выбран вариант *«супербустера» - это нейтронопроизводящая размножающая мишень сильноточного протонного ускорителя с модуляцией реактивности.*  Принципиально супербустер – это то же, что работавшая в 1964-1967 гг установка «ИБР + микротрон»(*см. часть 2*), только в 10 тысяч раз более мощная, за счет интенсивного «поджигающего» источника нейтронов от мишени протонов с энергией 1 ГэВ и высокой тепловой мощности активной зоны в 10-15 МВт. А в качестве ядерного топлива вместо плутония мог бы служить нептуний. Но осенью 2018 года обратили внимание на существенный, может быть, фатальный недостаток супербустера – нестабильность пучка протонов, несовместимая с требованиями ядерной безопасности ядерных устройств. C 2019 в проекте рассматривается только пульсирующий реактор. Супербустер оказался не супер!

Устоявшееся мнение таково, что есть только два элемента, пригодные для создания цепной реакции деления – уран и плутоний. Причем по одному изотопу на каждый элемент. На самом деле, каждый из элементов, начиная с урана и тяжелее его, имеют по два и более делящихся изотопов. В середине 20-го века были получены на реакторах и ускорителях первые *трансурановые* элементы, по аналогии с иерархией планет названные *нептунием и плутонием*. Дальше плутония планет не нашли, и стали называть следующие сверхтяжелые элементы именами ученых и городов. Что пошло на пользу и славу России и нашей Дубне: Дубний, Московий, Флеровий, Оганессон. *Плутоний* всем известен – будущее атомной энергетики. *Нептуний* же, элемент с числом протонов в ядре 93 - среднее между ураном и плутонием – был (и пока ещё является) «золушкой» трансуранов. Его образуется немало в ядерных котлах среди продуктов цепной реакции– десятки килограммов в год на один блок атомной станции, но широкого применения нептуний пока не нашел (кроме как сырьё для наработки плутония-238 – источника энергии на космических аппаратах). В то же время один из изотопов нептуния – нептуний-237- способен поддерживать цепную реакцию, т.е. у него есть критическая масса (около 40 килограмм для металлической фазы без замедлителя нейтронов). Было естественно, создав (или задумав) ядерный реактор на основе нептуния, назвать его НЕПТУН.

– Почему же новый реактор решили заправлять нептунием, а не плутонием или ураном? Чем нептуний лучше своих соседей по таблице Менделеева?

– Потому что такие свойства ядер в нашем варианте Вселенной приготовила природа. Во-первых, ядра нептуния испытывают деление только при столкновении с быстрым нейтроном, в то время как плутоний и уран могут делится и при взаимодействии с медленными нейтронами. В итоге каждый «рожденный» нейтрон (а появляются они при делении ядра быстрыми) «живет» в нептунии от своего появления до поглощения его другим делящимся ядром намного меньше (примерно в десять раз), чем в среде ядер плутония или урана. Это определяет короткий нейтронный импульс реактора, что необходимо для пульсирующего источника нейтронов. Но есть и ещё одно замечательное свойство нептуния – на одно исчезнувшее ядро нептуния (которое разделилось и дало «жизнь» трем нейтронам) в реакторе появляется как минимум одно ядро плутония-238. А плутоний-238 – хорошо делящийся изотоп плутония, с избытком компенсирующий исчезновение двух ядер нептуния. Поэтому реактор с нептунием не нуждается в перегрузках ядерного топлива и может без перерывов работать два десятка лет. Для примера: перегрузка топлива в исследовательском реакторе ПИК должна происходить один-два раза в месяц с соответствующими перерывами в работе и затратами ядерного топлива. Перегрузка пульсирующего реактора с плутонием должна производиться не менее одного раза в год с соответствующим расходом ценного ядерного топлива.

– Вы употребляли слова «рождение», «жизнь» по отношению к нейтрону, будто это живое существо. Почему так?

– Это профессиональный жаргон реакторщиков. Кстати, Вам, возможно будет интересно прочитать либретто балета *«Жизнь и страдания одного нейтрона»* из сборника моих сочинений для самодеятельного сатирического театра *«В гармонии с реактором»*. После этого будет нетрудно понять логику профессионального языка физиков.

– Так Вы и писатель к тому же?!

– Все физики – лирики…

– Но не все лирики – физики.

Тут к нам подошел высокий, спортивного вида мужчина с полотенцем через плечо и ещё не просохшими после купания волосами. Игнорируя моё присутствие, спортсмен набросился на мою собеседницу:

– Так вот ты где! Как всегда - найдешь кого-нибудь (*неприязненно взглянул на меня*) и про наш теннис забываешь. Что, готова идти к сетке?

На этом наша беседа с благодарным слушателем прервалась.

 Долгий путь к нептунию: марафон концепций и характеров

Впервые идея использования нептуния вместо плутония в пульсирующем импульсном реакторе озвучена в нашем с *Анатолием Дмитриевичем Роговым* *(*для меня тогда Толей*)* докладе на международном совещании по импульсным источникам нейтронов в 1991 году. По предложению *Владимира Федоровича Колесова* (см. Часть III «Увольнение на берег») в центре импульсных реакторов взрывного действия (ныне город Саров) ещё ранее хотели создать мощный источник нейтронов для целей облучения на основе нептуния. По неизвестным мне причинам источник не был создан. В наших же расчетах 1991 года что-то было недооценено, и нептуний, казалось, не имело смысла использовать. Тем более, что он является побочным продуктом производства плутония, и накапливается в активных зонах энергетических реакторов во много раз медленнее плутония. В тот период в закромах Минсредмаша (ныне Росатома) нептуния было не так много.

И вот настало время замены реактора мощностью 2 МВт на другой интенсивный источник нейтронов, эквивалентный реактору типа ИБР-2 мощностью 10-15 МВт. Было с полдюжины вариантов конструкции такого источника. Здесь и нейтронопроизводящая мишень сильноточного протонного ускорителя, и размножающая мишень такого ускорителя (подкритический реактор), и супербустер (пульсирующая размножающая мишень) и двухкаскадный бустер с нептунием в первой ступени, и опять же реакторы типа ИБР-2 с ядерным топливом на нептунии. Вот эти идеи и вышли на старт многолетнего марафона в 2015 году.

До того ни одна из установок Лаборатории Нейтронной Физики имени Ильи Михайловича Франка не проходила такого жесткого и длительного контроля перед решением быть ей построенной или нет. Реактор ИБР 1960 года, первый в мире пульсирующий реактор возник «из ничего» после слов Дмитрия Ивановича Блохинцева, как Вселенная по указанию Бога. Дети (или братья?) ИБРа – ИБР+микротрон, ИБР-30, супербустер ИБР-30 с ускорителем ЛУЭ-40 – появлялись решением директората Лаборатории и ОИЯИ после бескомпромиссного утверждения их необходимости «железным Федором» (Федором Львовичем Шапиро). Дмитрий Иванович в 1966 году, уже не будучи директором ОИЯИ, но имеющий неоспоримый авторитет, помог Ф.Л. отстоять идею создания ИБР-2 для прорыва в область нейтронных потоков выше самых мощных стационарных реакторов – первый большой скачок по мощности.

Любой забег начинается с сигнала судьи (свисток, выстрел, в конце концов, просто отмашка). Так, в мае 2015 года отмашку на начало кампании по выработке концептуального проекта нового базового источника нейтронов ЛНФ ОИЯИ дал главный инженер Лаборатории *Александр Витальевич Виноградов*. В 80-х, когда он пришел на пульт ИБР-2, приехав из Сухуми, он был для меня и Володи Ананьева просто Сашей. Саша выделялся из эксплуатирующего персонала ИБР-2 тщательным отношением к изучению документации реактора, внимательностью и дисциплинированностью. Тогда главного инженера ИБР-2 В.Д. Ананьева назначали гл. инженером ЛНФ после ухода на пенсию С.К. Николаева, и на его место в горбачевский период гласности и демократии был избран голосованием сотрудников отдела молодой Александр Витальевич. Показательно, что вторым претендентом был Миша Киселев, нач. смены с более долгим стажем работы на ИБР-2, глубже знающий реактор и имеющий репутацию строгого руководителя. Именно из-за этого Михаила и провалили. Но это пошло ему в итоге на пользу: ныне Михаил Алексеевич – доктор физ-мат наук, физик-экспериментатор, известный ученый.

Так начался многолетний марафон. Я «побежал» сразу, так как испытывал тогда пустоту, тоску и угнетение: четыре месяца назад скончалась дорогая супруга Лариса, два года назад завершилась долгая эпопея с разработкой криогенных замедлителей на основе радиационно-стойкого вещества мезитилена (триметилбензола), загружавшая мой мозг «на полную катушку», была завершена рукопись последнего романа «Тайна острова Нуулуа» и отдана в печать. И надо было вернуться в обычное для меня состояние творчества; оно антагонистично унынию и тоске. Иногда мучительно, но муки эти «дороже мне всех сладостей земных». Начал с воспоминаний о годах 60-х, когда мы с Геной Погодаевым установили оптимальную мощность пульсирующего реактора для пучковых исследований в 10-15 МВт. На этот раз моим компаньоном был, как и в годы 70-80е, *Анатолий Дмитриевич Рогов*. Расчеты, проведенные им, показали очень низкую эффективность подвижного отражателя модулятора реактивности в реакторе с плутонием.

В первый год работы над концептуальным проектом необходимые нейтронно-физические расчеты А.Д. Рогов производил, как для группы ядерной безопасности *Юрия Николаевича Пепелышева* (также включившейся в концептуальный марафон)*,* так и по моим предложениям. Рассматривались все возможные типы источников: пульсирующие реакторы типа ИБР-2, нейтронопроизводящие мишени сильноточного протонного ускорителя, бустеры (мишень ускорителя в подкритическом реакторе) и супербустеры (тот же бустер с импульсным реактором в качестве мишени), двухкаскадные бустеры, даже пульсирующие реакторы на эпитепловых и резонансных нейтронах.

Нептуний «явился нашим взорам»» как ядерный материал для протонной мишени с нептунием в первой ступени двухкаскадного бустера. Использование его как загрузку зоны реактора сначала не рассматривали – слишком низкая эффективность отражателя такой зоны. В двухкаскадном бустере нептуний действительно эффективен, но парни из группы ядерной безопасности ИБР-2М некритично подошли к замечательной идее корифея теории и техники импульсных реакторов взрывного действия Владимира Федоровича Колесова. При тщательном анализе такой бустер вовсе не конкурент обычному бустеру, если предназначение такового – поток медленных нейтронов в выведенные пучки. Упорно защищая сначала двухкаскадный бустер, в конце концов Юрий Николаевич всё-таки благоразумно отказался от этой концепции и сменил пристрастия на плутониевый супербустер очень сложной конструкции. Предложил её, по-моему, *Станислав Федорович Сидоркин,* ученик Ю.Я. Стависского и мой тоже – Стас стажировался в отделе ИБР-2 около года в семидесятых. Конструкция была интересная, новаторская, но настолько далекая от традиционных подходов, что была безоговорочно отвергнута НИКИЭТ.

И тут пришла мысль (как обычно, утром): ведь хорошо замедляющий нейтроны водород в центре зоны из порогово-делящегося нептуния будет работать вроде поглотителя, и эффективность модулятора на основе водородсодержащего вещества может быть высокой! Вода и Нептун – отличная пара! Расчеты Рогова для воды подтвердили это предположение, а появившийся в 2016 году в нашей группе холодных замедлителей аспирант МИФИ *Глеб Комышев* провел детальные расчеты и подтвердил, что эффект такого модулятора с гидридом титана будет в два раза выше, чем подвижного отражателя ИБР-2! С этого момента зона с нептунием стала главным кандидатом для нового источника у команды здания 119, которую активно поддерживал *Виктор Лазаревич Аксенов,* единственный ученый в ЛНФ с академическим званием. Виктор Лазаревич взял на себя заботу о продвижении революционных идей с нептунием для второго скачка в область высоких потоков (первый скачок был от первого поколения ИБРов ко второму), теперь уже на пределе технических возможностей. Имея большой опыт руководства научными коллективами (ЛНФ ОИЯИ, Курчатовский институт, Петербургский институт ядерной физики), В. Л. Аксенов верно оценил возможности нептуния и маленькой группы единомышленников (сначала Анатолий Рогов, затем *Сергей Куликов* и Глеб Комышев, потом *Лена Проценко и Михаил Рзянин).* Его постоянная поддержка играла существенную роль в продвижении Нептуна по сложной трассе марафона.

В 2017-ом группу увеличил до трех человек *Михаил Владимирович Рзянин*, бывший в 90-х научным сотрудником ЛТФ ОИЯИ. На Михаила «повесили» динамику нептуниевого бустера и реактора. Ему пришлось нелегко – осваивать азы реакторной физики. Оказалось, что для теоретика это совсем не просто. Очевидная для студента МИФИ однозначность решения газо-кинетического интегрального уравнения Больцмана (общеизвестный аналог транспорта нейтронов и самоподдерживающей цепной реакции) как задачи на собственное значение, вызывает отторжение у теоретика. И когда я увидел «страдания теоретика», я понял причину всегда удивлявшего меня непонимания Ильей Михайловичем Франком принципа модуляции потока нейтронов гребенчатым отражателем: академик не мог уйти от волновой природы нейтрона, в то время как для инженерной мысли нейтроны не что иное, как шарики…

К 2018 году идея супербустера с зоной на основе нитрида нептуния была признана наиболее подходящим вариантом для будущего источника. Был издан толстый красочный буклет. Но не успела высохнуть типографская краска на яркой обложке буклета, как мы с Михаилом Рзяниным обнаружили фатальный недостаток супербустера – вкупе с линейным протонным ускорителем бустер работать практически не будет! Не обсуждая детали, скажу только: из-за неустойчивой работы сильноточных ускорителей протонов.

Как упомянуто выше, к 2016-му году А.Рогов оценил достаточно высокую эффективность воды в активной зоне из нептуния, а быстро и эффективно работающий Глеб Комышев далеко продвинул расчеты нептуниевого реактора. Мы узнали немало особенностей этого необычного устройства. Так, было показано, что модулятор реактивности в виде вращающегося диска с гидридом титана на периферии и пустой полостью длиной по дуге, равной размеру активной зоны, позволит иметь фоновую мощность в 3-4 раза меньше, чем в ИБР-2М. При этом длительность импульса мощности останется такой же как в реакторе с плутонием – две десятитысячных доли секунды.

Читатель, разумеется, представляет Нептуна с трезубцем. Наш Нептун – «без трезубца», потому что его модулятор реактивности –необходимый узел любого импульсного реактора или супербустера – выполнен совсем не так, как в ИБР-2. Там подвижный отражатель имеет форму вилки и похож на трезубец бога морей. В реакторе же НЕПТУН модулятор реактивности будет больше походить на колесо от телеги. «Колесо» будет одно и вращаться со скоростью 10 оборотов в секунду. На ободе – такое вещество как гидрид титана. Не правда ли, хороша ядерная телега с Нептуном в упряжке?

Глеб начал оформляться для работы в спецусловиях, но не успев съесть весь шоколад, который прописала ему врач для поддержания высокого уровня гемоглобина, и едва успев получить патент на изобретение модулятора реактивности, отбыл навсегда в Москву к невесте. К счастью, на его место прибыла тоже выпускница МИФИ *Елена Проценко.*  Однако Лене пришлось поработать менее года. За этот короткий срок ей удалось с хорошей точностью оценить эффект реактивности от появления плутония-238 в нептуниевой зоне по упрощенной методике на «персоналке» (тогда мы не имели выхода на суперкомпьютер), и это был первый результат, в дальнейшем точно подтвержденный расчетами на суперкомпьютерах (Ахмед Хасан в ЛНФ, а также сотрудники НИКИЭТ и Снежинска). В октябре 2019 Лене пришлось срочно покинуть Дубну, как оказалось, навсегда. Сейчас она работает на Балаковской АЭС.

Вскоре Лену сменил аспирант МИФИ египтянин Ахмед, полное имя – *Хасан Ахмед Абдуэльхамд Абдельнаби;* у них к собственному имени добавляется имя отца и деда. Будь я египтянином, то моё полное имя было бы Шабалин Евгений Павел Семенович. Вот так. Ахмед стал четвертым физиком за 5 лет в череде сменявших друг друга специалистов по нейтронно-физическим расчетам Нептуна. Он принес с собой модификацию программы MCNP – Serpent, «змея финского розлива», с которой расчеты модулятора-колеса стали удобнее и быстрее. Ахмед для расчетов использует суперкомпьютеры «Говорун» (ЛИТ ОИЯИ) и МИФИ, что позволяет улучшить статистическую погрешность расчетов коэффициента размножения до нужной величины 0,00002. Удалось рассчитать сложные варианты активной зоны Нептуна, для которых в два раза повышаются пределы устойчивой работы реактора.

Противостояние двух концепций – нептуниевый пульсирующий реактор и плутониевый супербустер, длилось около трех лет. Только в 2019-м научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники (НИКИЭТ) отдал пальму первенства нептунию, а 11 декабря 2019 проект НЕПТУН получил одобрение руководства Росатома (правда, пока без обещаний финансовой поддержки).

Но это не был финиш марафона. «Конкурирующая фирма» предпринимает атаку, обвиняя команду Нептуна в «неспортивном поведении» - якобы в очевидной несостоятельности идеи нептуниевого реактора, его принципиально неустойчивой работе. Как говорится, «в чужом глазу…» и т.д. На самом деле, из факта нестабильной работы реактора ИБР-2М отнюдь не следует вывод о стабильности или нестабильности НЕПТУНа. Нашей команде с определяющим участием молодых коллег-реакторщиков *Максима Подлесного и Александра Верхоглядова* удалось понять и обосноватьнетривиальную особенность динамики пульсирующих реакторов, которую мы назвали «динамическим изгибом». Созданы методики для расчета устойчивости НЕПТУНа и показаны варианты конструкции, обеспечивающие стабильность его работы. А причину нестабильности ИБР-2 ещё придется искать.

Хорошо известно: всё новое и ранее неизвестное встречается публикой или недоверчиво, или иронично, чаще – с ходу отвергается и лишь изредка –аплодисментами. Положительные свойства нептуния многие воспринимали как фокус: неделящийся элемент, и вдруг лучше плутония?! «Докладчик – фокусник, определенно!». Но отвергающие в конце концов становились сторонниками – обычная трансформация отношения. В целом понадобилось более трех лет для признания НЕПТУНа реакторным сообществом.

 Среди перипетий марафона почему-то вспоминается один момент, когда мы ещё не были уверены в успехе идеи нептуния. Обсуждаем с Виктором Лазаревичем плюсы и минусы вариантов супербустера и реактора. И в заключении разговора я категорично заявляю: «Всё равно будет делаться реактор Нептун!» Аксенов удивленно и долго глядит на меня, похоже, думая: «Кто же он, этот Шабалин? Чересчур самоуверенный или хорошо всё продумал?» Наверное, Виктор Лазаревич склонился ко второму варианту, так как лучшего, чем он, единомышленника я не приобрел.

 Так в чем же преимущества нептуния перед «всесильным» плутонием»? Если одним словом, то: *достоинства нептуния следуют из его недостатков*.

 «Разве так бывает?» – скажет читатель. Бывает. Вспомните хотя бы комедийных актеров, таких, как Савелий Крамаров с его фирменным косоглазием и улыбкой во весь рот, Жерар Депардье, Владимир Басов, Луи Де Фюнес, Наталья Крачковская, Александр Семчев, Александр Цекало и др. Их необычная, порой даже уродливая внешность усиливает воздействие на зрителя; неизвестно, стали бы они успешными актерами, обладая красивым лицом и идеальной фигурой. Именно пороговый характер деления нептуния, видимый недостаток делящихся ядер, сделал этот элемент главным претендентом на ядерное «огниво» будущего источника нейтронов ОИЯИ, будущего мирового лидера-поставщика нейтронов для научных исследований 21 века.

Нептун – красивая голубая планета. Примечательно, что сделать его снимок с космического корабля (см. в заголовке раздела) помог элемент нептуний. Каким образом? Корабли, посылаемые к далеким планетам Солнечной системы, используют ядерную энергию распада изотопа плутония-238, а этот изотоп генерируется при облучении нептуния в ядерных реакторах. Вот так: нептуний помогает изучать Нептун.

Итак, ОИЯИ вступает в гонку преследования со знаменем прошлых побед. Как тут не заглянуть в будущее?! В будущее, у которого нет границ времени.

Этот чертов Кошачий глаз (пережитки суеверия)

Когда на меня глядит холодный, неподвижный, недружелюбный глаз соседской кошки, то вспоминаются многократные неудачи с использованием бериллия. Элемент таблицы Менделеева и …кошка? Что общего? Ничего, кроме того, что «кошачьим глазом» называют разновидность минерала хризоберилла, содержащего бериллий, со специфическим световым эффектом бегающего по поверхности [блика](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%BB%D0%B8%D0%BA). Это оптическое явление напоминает наблюдателю глаз кошки. А я не люблю ни кошек, ни бериллий. Кошек, потому что они эгоисты, а бериллий – потому что в моей практике создания ядерных установок использование этого замечательного во всех отношениях металла (самый легкий, самый прочный, и не поглощающий нейтроны) приносило только неудачи.

 Началось с описанного ранее случая неудачной пайки бериллиевого «окна» для бустера ИБР+микротрон. Затем, во время физического пуска ИБР-2 в 1978-м выяснилось, что подвижный отражатель в виде двух стальных роторов не способен обеспечить нужную короткую длительность импульса. По моему предложению изготовили отражатель в виде алюминиевого диска с запрессованным в него вкладышем из бериллия, и исследовали его параметры. Оказалось, что такой вариант годился бы для режима работы реактора только с высокой частотой импульсов (25 в секунду), но физики ЛНФ настаивали на 5 герцах. А тогда теневой эффект второго ротора (*см. главу «Письмо тракториста»*) сводил на нет преимущества замечательного металла - бериллия. Второй прокол.

Третий же случился в 1999-2000 гг. Тогда, после неудачи с холодным замедлителем на ИБР-2 в начале 90-х на основе замороженного твердого метана, был сконструирован (НИКИЭТ и ЛНФ) другой вариант, более сложный, но многообещающий. На этот раз к камере с твердым метаном добавили внешний, холодный бериллиевый отражатель, который удваивал поток низкоэнергетических нейтронов. Всё хорошо, но… «*пришел Иван Петрович (*читайте: *Евгений Палыч), как всегда расстроил всех*»: оказалось, что необходимо часто (два раза в сутки) отогревать метан для рекомбинации радикалов (*во избежание «бёпса», см. раздел ХЗ в части III*), а физиков не устраивал такой режим работы холодного замедлителя. Пришлось потратить ещё 12 лет для разработки холодных замедлителей без использования метана и бериллия.

И вновь, через 55 лет, при разработке проекта новой базовой установки ЛНФ на основе нептуния, на меня провокационно глянул «кошачий глаз», как бы говоря: «Только с помощью бериллия вы можете достичь поставленной цели – плотности потока тепловых нейтронов 10 в 14-й степени нейтронов на квадратный сантиметр в секунду». Вот так. И чего теперь ожидать?

*КОНЕЦ Части 5*

*Черновые записки не для книги*

*Символы НЕПТУНА (Булавина)*

 Для любопытных и подкованных читателей:

Реакторы ЛНФ ОИЯИ используются как импульсные источники нейтронов. Нейтроны, испускаемые при делении ядра плутоний-239, частично покидают реактор и направляются по зеркальным нейтроноводам к научным установкам. Свойство нейтрона глубоко проникать внутрь вещества и при этом не повреждать его кристаллическую структуру является уникальным. Ни электромагнитное излучение (рентген, гамма-лучи), ни ионизирующее излучение (протоны, электроны) не обладают подобным свойством. Рассеяние нейтрона на образце вещества происходит закономерно в соответствии со структурой атомов (молекул, магнитных доменов), что позволяет на основе измерения нейтронного поля изучить структуру вещества, как ядерную, так и магнитную. А импульсный характер излучения нейтронов дает возможность узнать скорость регистрируемых на базе пролета нейтронов .

Полвека реакторы Дубны были мировыми лидерами импульсных нейтронных источников. За это время интенсивные нейтронные источники прочно вошли в арсенал исследовательских ядерных центров, и их качество росло. На пятки нашему ИБРу стали наступать источники на основе ускорителей протонов средней энергии (порядка 1 ГэВ). Сейчас сооружается мощный европейский источник нейтронов ESS (Еuropean Spallation Source), который в 10 раз превзойдет ИБР-2М по среднему (по времени) потоку нейтронов; импульсный поток, однако, не превысит такой же на ИБР-2М. По плану, ESS должен был быть запущен в работу в 2019 году. Пока это не состоялось. Можете сравнить - пусковой период американской подобной установки (меньшей мощности) занял около десяти (!) лет. Прогресс сооружения интенсивных импульсных нейтронных источников в мире диктует необходимость продолжать развитие ИБРов в Дубне в направлении значительного увеличения потока нейтронов – международный ядерный центр не должен оказаться на задворках нейтронного сообщества.

В начале проектирования импульсного исследовательского реактора ИБР-2 в 60-х годах ХХ века были изучены предельные возможности пульсирующего ядерного реактора для исследований по физике конденсированных сред. Было показано, что наилучшие параметры нейтронных пучков тепловых нейтронов обеспечивает реактор на быстрых нейтронах при средней тепловой мощности не менее 10 МВт. В то время единственным действующим импульсным реактором был ИБР – маломощный (1-3 кВт), охлаждаемый воздухом реактор с металлическим плутонием, созданный в Дубне в 1960 году. Считалось рискованным идти на создание реактора с предельными нагрузками, превышающими ИБР в тысячи раз, и реактор ИБР-2 был спроектирован на 4 МВт. В итоге же пределом рабочего режима ИБР-2 стала мощность 2 МВт. Правильность дальновидного подхода к выбору параметров реактора подтверждена многолетней, более 30 лет (с 1984 года) и безаварийной работой. ИБР-2 (ныне его модификация ИБР-2М) был и пока ещё остается самым высокопоточным в мире источником тепловых нейтронов для исследований на выведенных пучках, обеспечивая пиковую плотность потока нейтронов на поверхности внешнего замедлителя 6⋅1015 н/см2/с и среднюю плотность потока до 1013 н/см2/с.

Однако для решения научных задач 21 века требуются более интенсивные потоки нейтронов, особенно длинноволновых нейтронов. Прогресс техники сильноточных протонных ускорителей позволил во второй декаде 21-го век осуществить за рубежом ряд проектов источников на основе реакции расщепления тяжелых ядер протонами с энергией порядка 1 ГэВ, так называемых spallation neutron sources (SNS), где пиковые потоки нейтронов приближаются к 1016 н/см2/с, а средние по времени – к 1014 н/см2/с. В 2017-м году в работах сотрудников ЛНФ было показано, что импульсные источники медленных нейтронов на основе реакции деления (импульсные реакторы и импульсные бустеры) могут быть конкурентно способными по отношению к spallation neutron sources и даже значительно, на порядок, превосходить их по пиковым потокам медленных нейтронов при использовании уже освоенных ядерных технологий. Средняя по времени векторная плотность потока тепловых нейтронов может достигать 2‧1014  н/см2/с (в пересчете на угол 2π - так называемый «2π- эквивалент») при мощности реактора 15-20 МВт. Так что заявленные в первоначальном проекте ИБР-2 предельные параметры импульсного реактора вполне реальны для будущего источника нейтронов Объединенного института ядерных исследований в Дубне. Такой источник должен будет сменить реактор ИБР-2М, срок эксплуатации которого истекает в начале 30-х годов.

Задачи, как практического плана, так и имеющие отношение к фундаментальным закономерностям в природе, для решения которых используются импульсные нейтронные пучки ИБР-2М, к 30-м годам текущего века ещё не будут исчерпаны, но постоянно возникают новые, требующие более интенсивных нейтронных потоков. Ф.Л. Шапиро ещё в 60-х годах прошлого века требовал от инженеров создания источников нейтронов, «на три порядка превышающих существующие». Сейчас эти порядки пройдены, и движение вверх возможно лишь на один порядок. И одолеть этот порядок не так просто и не так дешево, как это было полвека назад.

Почему пульсирующий реактор большой мощности на плутонии обладает низкими параметрами? Это определяется тем, что будущий источник нейтронов второй половины 21 века должен обеспечить поток нейтронов на порядок (т.е. в десять раз) выше, чем ИБР-2. Отсюда с необходимостью вытекает размещение замедлителей нейтронов вплотную к границе активной зоны реактора. В таком случае, для модулятора реактивности типа подвижного отражателя ИБР-2 не будет достаточного места, а модулятор реактивности играет важнейшую роль в формировании короткого импульса мощности и низкого фона между импульсами. Расчеты, проведенные в 2015-м под руководством В.Д. Ананьева, показали , что в реакторе на плутонии предел потока – 3-4х кратный относительно ИБР-2М без ухудшения других параметров. Более детальные расчеты привели к пониманию, что источник на основе плутония с высокими параметрами может быть только *супербустер* – размножающая нейтронопроизводящая мишень укорителя протонов.