

## СТЕНОГРАММА

заседания № 19-06 диссертационного совета Д 720.001.02 на базе Международной межправительственной организации Объединенный институт ядерных исследований от 27 июня 2019 г.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ диссертационного совета - доктор физико-математических наук, профессор Малахов Александр Иванович.

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ диссертационного совета - кандидат физико-математических наук Арёфьев Валентин Александрович.

На заседании присутствовали члены диссертационного совета:

Специальность 01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики, физико-математические науки:

Водопьянов Александр Сергеевич	- доктор физико-математических наук
Глаголев Виктор Викторович	- доктор физико-математических наук
Мелкумов Георгий Леонович	- доктор физико-математических наук
Никитин Владимир Алексеевич	- доктор физико-математических наук
Садовский Сергей Анатольевич	- доктор физико-математических наук
Таратин Александр Михайлович	- доктор физико-математических наук
Тяпкин Игорь Алексеевич	- доктор физико-математических наук
Ужинский Владимир Витальевич	- доктор физико-математических наук
Арёфьев Валентин Александрович	- кандидат физико-математических наук.

Специальность 01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики, технические науки:

Калинников Владимир Александрович	- доктор технических наук
Матюшин Валентин Тарасович	- доктор физико-математических наук
Романов Юрий Иванович	- доктор технических наук
Смирнов Виталий Анатольевич	- доктор технических наук
Тимошенко Геннадий Николаевич	- доктор физико-математических наук
Тютюнников Сергей Иванович	- доктор технических наук

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц, физико-математические науки:

Батюня Борис Владимирович	- доктор физико-математических наук
Капишин Михаил Николаевич	- доктор физико-математических наук
Мадигожин Дмитрий Турыскалиевич	- доктор физико-математических наук
Малахов Александр Иванович	- доктор физико-математических наук
Панебратцев Юрий Анатольевич	- доктор физико-математических наук
Строковский Евгений Афанасьевич	- доктор физико-математических наук

Специальность 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, технические науки:

Агапов Николай Николаевич	- доктор технических наук
Коваленко Александр Дмитриевич	- доктор физико-математических наук
Костромин Сергей Александрович	- доктор физико-математических наук

**А.И. Малахов:** Уважаемые коллеги! Мы открываем наше заседание. Кворум есть. Присутствуют 25 членов совета, минимальное количество – 21, по специальности – 6 докторов. Мы правомочны начать заседание. Есть предложение начать наше заседание. Как всегда, нам нужно заслушать те материалы, которые имеются в деле. Валентин Александрович нас сейчас познакомит.

**В.А. Арефьев:** Уважаемые коллеги! В совет поступило заявление от Немченка Игоря Борисовича следующего содержания: прошу принять к рассмотрению и защите мою диссертацию на тему «Разработка и исследование пластмассовых и жидких сцинтилляторов для детекторов экспериментов в области нейтринной физики» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.01. – Приборы и методы экспериментальной физики. Защита работы проводится впервые. Согласен на включение моих персональных данных в аттестационное дело и их обработку. Подтверждаю, что все представляемые к защите данные и результаты являются подлинными и оригинальными и, кроме специально оговоренных случаев, получены мной лично. По этому заявлению решением диссертационного совета от 20 декабря 2018 года была назначена комиссия по предварительному рассмотрению диссертации в составе докторов – Матюшина Валентина Тарасовича, Тютюнникова Сергея Ивановича и я. Комиссия рассмотрела представленные соискателем материалы и дала следующие заключение и рекомендации: принять к защите диссертацию, назначить ведущую организацию и официальных оппонентов. На заседании совета 20 февраля 2019 года диссертация была принята к защите. Немченко Игорь Борисович, год, число и месяц рождения – 15 июля 1958, место рождения – город Харьков, гражданство – Российская Федерация, образование высшее, окончил Харьковский государственный университет им. А.М. Горького, химический факультет, в 1980 году. Специальность получил «Химия». Владеет английским языком, ученая степень – кандидат химических наук. Кандидатская диссертация «Синтез хиральных  $\alpha, \beta$ -ненасыщенных кетонов на основе (-)-ментона и исследование их поведения в нематических растворителях». Была присуждена ученая степень кандидата химических наук, диссертационным советом Харьковского государственного университета им. А.М. Горького в 1987 году. Копия диплома имеется. Имеется список научных трудов, распечатка страницы сайта с объявлением о защите диссертации, далее имеется отзыв организации, где была выполнена диссертация. Это Лаборатория ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, отзыв ведущей организации Институт ядерных исследований РАН, отзывы официальных оппонентов, отзывы на автореферат и диссертацию, два отзыва таких имеются, имеются в деле также письма от пользователей результатов работ, проведенных Игорем Борисовичем Немченком. Это следующие организации: Подземная лаборатория Модан и Институт физики высоких энергий Китайской Академии Наук. Документы, представленные соискателем, соответствуют требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней».

**А.И. Малахов:** Спасибо, какие-то вопросы имеются? Если нет, перед тем, как предоставить слово соискателю, нам нужно объявить имена официальных оппонентов. Официальными оппонентами диссертации явились: Бузулуцков Алексей Федорович

(доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник Института ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Академии Наук), он отсутствует, два других присутствуют. Поэтому мы правомочны работать. Другой оппонент Кузьмичев Леонид Александрович (доктор физ.-мат. наук, заведующий лабораторией Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцина МГУ) и Рыкалин Владимир Иванович (доктор физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник Института физики высоких энергий имени А.А. Логунова, еще называют НИЦ «Курчатовский институт»).

Ведущая организация – Институт ядерных исследований Российской Академии Наук Теперь предоставляем слово Игорю Борисовичу для изложения содержания диссертации.

**И.Б. Немченко:** Уважаемые Александр Иванович, уважаемые члены совета, уважаемые оппоненты, представитель ведущей организации, уважаемые коллеги!

Тема моей диссертации связана с широко распространенными материалами, для детектирования элементарных частиц – жидкими и пластмассовыми сцинтилляторами. Такие материалы довольно давно и прочно вошли в практику многих экспериментов благодаря своим достоинствам, среди которых: и высокое содержание водорода, и быстрое действие, и относительно низкая стоимость. Что очень важно для низкофоновых экспериментов – возможность очистки от радиоактивных загрязнений. При этом у каждого из этих видов, наряду с их общими достоинствами, у жидких и у пластмассовых сцинтилляторов, есть еще дополнительные преимущества по отношению к другим материалам.

Органические сцинтилляторы, жидкие и пластмассовые сцинтилляторы, можно условно разделить на два вида материалов: это материалы «стандартного состава» и элементосодержащие. К сцинтилляторам «стандартного состава» я отношу те (они называются в англоязычной литературе «C,H –based»), которые при своем изготовлении, кроме углерода и водорода практически не имеют других специально введенных элементов. Элементсодержащие – это те, которые обогащены соединениями элементов или их изотопов для придания сцинтилляторам каких-либо новых уникальных замечательных свойств. Органические сцинтилляторы «стандартного состава» в силу своего элементного состава имеют целый ряд каких-то ограничений в использовании. Это связано с тем, что в наибольшей степени они чувствительны к заряженным частицам, они чувствительны к нейтронам средних и высоких энергий. При этом их чувствительность к электромагнитному излучению достаточно низка, хотя этот недостаток сплошь и рядом можно устранить изменением размеров детектора. Эти материалы также низкочувствительны, например, к нейтронам тепловых энергий, но у них (и у одних, и у других), у жидких и у пластмассовых есть замечательное качество. Это молекулярный характер люминесценции, что дает возможность вводить в них соединения элементов и изотопов, которые бы модифицировали их свойства. Таким образом, корректируя состав, можно изменить эффективность регистрации этими материалами, улучшать их для других видов излучений.

Элементсодержащие органические сцинтилляторы находят и будут, очевидно, находить, они находятся в сфере интересов многих научных проектов, потребление для самых различных направлений в области фундаментальных исследований и при решении целого ряда прикладных задач. Известно достаточно много в литературе

сведений о том, кто, как, каким образом производит, изготавливает, разрабатывает, исследует элементосодержащие органические сцинтилляторы. Я коснусь сейчас в двух словах материаловедческого аспекта этой работы.

Для получения детекторов на такой основе используют элементосодержащие добавки различной химической природы. Это соли неорганических кислот, это соли карбоновых органических кислот, элементоорганические соединения, комплексные соединения. В качестве сцинтилляционных основ используются разнообразнейшие соединения, которые и так находят применение в сцинтилляционной технике: ароматические углеводороды, простые эфиры, другие соединения и смеси ряда веществ. Для пластмассовых сцинтилляторов элементосодержащих используются те же самые полимеры, которые используют при получении сцинтилляторов «стандартного состава».

Выполняя диссертационное исследование, я себе поставил цель: разработка совокупности методов получения, а также усовершенствование и экспериментальное исследование пластмассовых и жидких сцинтилляторов для крупногабаритных детекторов экспериментов в области нейтринной физики. Для того чтобы достичь эту цель, необходимо было решить несколько задач:

1. Разработка и исследование свойств жидкого сцинтиллятора «стандартного состава», пригодного для использования в крупномасштабных экспериментах.

2. Разработка и исследование свойств семейства элементосодержащих органических жидких сцинтилляторов, пригодных для использования в крупномасштабных экспериментах.

3. Разработка и исследование свойств семейства элементосодержащих пластмассовых сцинтилляторов.

4. Усовершенствование технологии получения пластмассовых сцинтилляторов «стандартного состава» на основе полистирола для получения детекторов с улучшенными характеристиками.

Объектами исследования стали пластмассовые сцинтилляторы на основе полистирола, полиметилметакрилата, жидкие сцинтилляторы на основе линейного алкилбензола, фенилциклогексана и альфа-метилнафталина.

За последние десятилетия по данным SCOPUS наблюдается достаточно интенсивный всплеск интереса публикационной активности в этом направлении. Конечно, спад последних двух лет связан с тем, что в базы данных публикации за 2018-2019 года не до конца добавлены. Поэтому, в связи с поставленными целями и задачами, в связи с всплеском интереса к детекторам на основе жидких и пластмассовых сцинтилляторов я сформулировал актуальность работы. Она определяется постоянно возрастающей потребностью в детекторах на основе органических сцинтилляторов с повышенной эффективностью регистрации отдельных видов излучений, пригодных для использования в крупномасштабных физических экспериментах.

По материалам диссертационного исследования опубликованы 34 работы, в том числе 19 из них статей, 14 из них в журналах, рекомендованных ВАК, и 15 тезисов докладов. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка использованной литературы, приложений и включает в себя 212 страниц, достаточное, на мой взгляд, количество иллюстрационного материала в виде рисунков и таблиц.

Первая глава моей диссертации посвящена литературному обзору и на первых слайдах я постарался в сжатом до состояния сверхплотной материи виде выразить содержание первой главы. Вторая глава посвящена жидким сцинтилляторам для нейтринного эксперимента DAYA BAY. Эксперимент посвящен исследованию осцилляций нейтрино, его основная задача – измерение с высокой точностью угла смешивания нейтрино  $\theta_{13}$ . Площадка для размещения, для нахождения эксперимента находится на юго-востоке Китая, недалеко от Гонконга, недалеко от китайского города Шеньжень, и рядом с детекторами расположены три атомных электростанции: DAYA BAY, Ling Ao и Ling Ao 2.

Вот на картинке представлена схема расположения детекторов. Для того чтобы достичь такой высокой точности измерения необходимо наличие мощной реакторной установки и необходимо было учесть фон, в определённых случаях его снизить, необходимо было создание крупнотоннажных детекторов. Сам принцип регистрации основан на реакции обратного бета-распада на протоне, в результате чего выделяется тепловой нейтрон. Для увеличения чувствительности детектора к тепловым нейтронам, выделяющимся в результате реакции обратного бета-распада, в детекторах использовались гадолинийсодержащие жидкие сцинтилляторы. Детекторы представляли из себя совокупность модулей, каждый из которых являлся системой из ряда коаксиальных цилиндров, заполненных жидким сцинтиллятором «стандартного состава», гадолинийсодержащим жидким сцинтиллятором. Для того чтобы можно было использовать жидкие сцинтилляторы в больших количествах, а в каждом детекторе было около 25 тонн каждого сцинтиллятора, а модулей было 8 штук, необходимо было выполнить вполне определённые требования. Для того, чтобы увеличить вероятность возникновения реакции обратного бета-распада, сцинтилляторы должны были содержать высокое количество водорода. Большие объёмы требовали высокой взрыво- и пожаробезопасности, доступности и низкой стоимости. Но и конечно же должна была быть совместимость с материалами детектора. Выполнение таких требований, в первую очередь было связано с подбором сцинтилляционной основы. В качестве такой основы в эксперименте был выбран линейный алкилбензол. Это не индивидуальное вещество, это смесь некоторых алкилпроизводных бензола, которые производятся в громадных количествах на нефтеперерабатывающих заводах. Поэтому она доступна, поэтому она дешёва. И очень важно, что свойства линейного алкилбензола совместимы со сформулированными нами требованиями.

Для оптимизации состава и для подбора правильного состава, нами были проведены исследования по оптимизации состава вторичных и первичных сцинтилляционных добавок. В качестве первичной сцинтилляционной добавки был выбран 2,5-дифенилоксазол, широко известный как PPO (это его аббревиатура). Измерением световых выходов образцов сцинтиллятора, содержащих только PPO на основе линейного алкилбензола было установлено, что оптимальной концентрацией PPO является 0,5%. В качестве кандидатов на вторичную сцинтилляционную добавку мы рассматривали три соединения. Простите, буду называть аббревиатуру, потому что достаточно длинные химические названия: POPOP, диметил-POPOP и bis-MSB. Нами было установлено, что для всех трех добавок оптимальной концентрацией является 0,0025%. При этом световой выход POPOP и bis-MSB и прозрачность сцинтилляторов на основе POPOP и bis-MSB, особенно прозрачность, заметно превышают прозрачность и

световыход сцинтиллятора на основе диметил-РОРОР. Поэтому для дальнейшего использования в эксперименте были рекомендованы именно эти вторичные сцинтилляционные добавки.

Что касается гадолинийсодержащего сцинтиллятора. Наряду с требованиями вообще, касающихся жидких сцинтилляторов крупнотоннажных экспериментов, добавляются некоторые новые условия. В эксперименте важно было ввести гадолиний в количестве от 0,1-0,15%, при этом не должна была ухудшаться прозрачность, не должен был ухудшаться световыход, не должна была ухудшаться устойчивость сцинтиллятора. Очевидно, что эти параметры зависят как от сцинтилляционной основы, так и от той элементосодержащей, гадолинийсодержащей добавки, которая должна быть использована. Естественно, что в качестве сцинтилляционной основы был выбран тот же линейный алкилбензол, а к гадолинийсодержащей добавке были сформулированы требования: хорошая растворимость, не должна ухудшать световыход, прозрачность, должна быть доступна, поэтому должна быть легко синтезируема или чтобы можно было ее купить.

В коллаборации рассматривался целый ряд соединений. Наилучшим вариантом оказались органические соли гадолиния, соли карбоновых кислот – карбоксилаты. И в силу ряда причин, при сравнении нескольких карбоксилатов гадолиния, нами было установлено, что оптимальным вариантом является 3,5,5-триметилгексаноат гадолиния, который сокращенно мы называем Gd-ТМНА. Мы провели исследования материалов: жидких сцинтилляторов, гадолинийсодержащих на основе линейного алкилбензола и содержащего гадолиний (0,1%) по той технологии, о которой я сказал. Оказалось, что введение гадолиния в этих количествах совершенно не ухудшает такой важный сцинтилляционный параметр, которым является энергетическое разрешение. В пределах погрешности энергетическое разрешение гадолинийсодержащего сцинтиллятора остается на том же уровне что и для «стандартного» сцинтиллятора некоторых других составов на этой же основе. Введение гадолиния привело к резкому увеличению эффективности регистрации тепловых нейтронов, что было очень важным и необходимым для использования в эксперименте. Измерения были проведены для нескольких толщин слоя. Нами была показана линейная зависимость эффективности регистрации нейтронов гадолинийсодержащим сцинтиллятором от высоты (от толщины) слоя образца.

Нами была разработана последовательность стадий для синтеза гадолинийсодержащей добавки, нами были сформулированы требования для технологического процесса производства. И на основе этих формулировок нами были предложены технологические схемы: изготовления гадолинийсодержащей добавки, технологическая схема изготовления самого сцинтиллятора. Эти технологические схемы послужили основой для дальнейшего проектирования производственного участка по изготовлению как жидкого сцинтиллятора «стандартного состава» эксперимента DAYA BAY, так и гадолинийсодержащего жидкого сцинтиллятора.

Следующая глава посвящена борсодержащим органическим сцинтилляторам, которые интересны нам потому, что бор, как и гадолиний имеет изотоп, который захватывает тепловые нейтроны с высокой вероятностью. Это  $^{10}\text{B}$ . Бор интересен тем, что концентрация  $^{10}\text{B}$  естественной смеси изотопов достаточно высока и достигает практически 20%, что в целом ряде случаев не требует обогащения. Бор интересен тем,

что в результате захвата теплового нейтрона образуются заряженные частицы, которые регистрируются практически со 100%-ной вероятностью основным материалом сцинтиллятора. При этом регистрируются в непосредственной близости от места, в котором произошел захват, что дает возможность там и тогда, когда это нужно определять координату события. Бор интересен своими химическими свойствами. Он имеет целый ряд соединений, которые растворимы в органических растворителях, что очень важно с технологической точки зрения.

Нами впервые было предложено использование борсодержащей добавки – полиэдрического соединения бора под названием – орто-карборан. Это очень устойчивое соединение к различным видам воздействия, вещество прозрачное в видимой области спектра, в ультрафиолетовой области спектра. В 60-х годах появилась работа Анисимовой с соавторами, в которой было предложено использование изопропенил-о-карборана. По нашему представлению мы предложили более оптимальный вариант, поскольку концентрация бора в о-карборане достигает 75%, что заметно выше, чем в его изопропенильном аналоге. Кроме этого он не способен образовывать химические связи при полимеризации, что не будет оказывать и не оказывает воздействия на механические свойства пластмассовых сцинтилляторов, полученных с его использованием. Но и о-карборан заметно дешевле. Он очень дорог, но, тем не менее, он заметно дешевле, чем изопропенил-о-карборан. Нами был изготовлен целый ряд образцов, некоторыми из них, которые мы называем экспериментальными образцами В-ПС (борсодержащие пластмассовые сцинтилляторы), мы занялись вплотную, исследовали их свойства достаточно подробно. Увеличение концентрации бора естественным образом ведет к некоторому снижению световых выходов. Конечно, это связано с:

- а) разбавлением сцинтилляционной матрицы о-карбораном;
- б) это связано с некоторым незначительным и тем не менее наблюдающимся (средний график) уменьшением прозрачности при введении бора.

На среднем рисунке представлены спектры поглощения пластмассового сцинтиллятора «стандартного состава» на основе полистирола и борсодержащего пластмассового сцинтиллятора с 5% концентрацией естественной смеси изотопов бора. Нами были измерены значения эффективности регистрации нейтронов с энергией ниже 0,4 эВ. Правый график представляет спектры альфа-частиц, которые возникают в результате захвата. Увеличение концентрации, массовой доли, бора приводит к закономерному естественному и очень заметному увеличению эффективности регистрации нейтронов.

На основе о-карборана и на основе линейного алкилбензола мы разработали новый жидкий борсодержащий сцинтиллятор. Да, были известны борсодержащие сцинтилляторы, но многие из них не обладали достаточной устойчивостью во времени. Наш сцинтиллятор характеризуется безопасностью использования, устойчивостью, что основано на устойчивости компонентов, которые входят в состав. Мы также исследовали, как и в случае с пластмассовыми сцинтилляторами, концентрационную зависимость световых выходов, зависимость прозрачности от концентрации бора и концентрационную зависимость эффективности регистрации нейтронов с энергией ниже 0,4 эВ.

Следующая глава посвящена органическим сцинтилляторам, содержащим редкоземельные элементы. Во второй главе диссертации, я уже рассказал вам об этом, во второй главе описаны гадолинийсодержащие жидкие сцинтилляторы, поэтому в этой главе мы их не рассматривали. Эта глава посвящена гадолинийсодержащим пластмассовым сцинтилляторам, пластмассовым неодимсодержащим и жидким неодимсодержащим сцинтилляторам. Интерес к этим двум видам я представил в виде двух списков. Основная проблема, как я уже говорил, связана с подбором элементсодержащих добавок. Мы на этом пути нашли очень подходящее соединение – это комплексное соединение минеральных солей гадолиния и неодима (хлоридов, нитратов) с таким (прошу прощение за длинные названия) веществом, которое является хорошим комплексообразователем, называется гексаметилтриамид фосфорной кислоты (НМРА). Комплексы, содержащие гадолиний и неодим, оказались достаточно растворимы в полиметилметакрилате и нами были разработаны пластмассовые сцинтилляторы на этой основе. При этом были впервые получены неодимсодержащие пластмассовые сцинтилляторы, а что касается гадолинийсодержащих пластмассовых сцинтилляторов, то они были получены с рекордной концентрацией металла, достигающей 4%. До этого мы поставили один рекорд – 3%. Несколько изменив методику, мы его обновили, и достигли 4% концентрации гадолиния. На фотографии представлены образцы. Правый образец – гадолинийсодержащий 3%, средний и левый образец это неодимсодержащий сцинтиллятор. Вот из таких заготовок мы изготовили образцы для исследования, диаметром 30 мм и высотой 10 мм. Нами были исследованы зависимости световыхода и, для гадолинийсодержащих пластмассовых сцинтилляторов, эффективность регистрации нейтронов с энергией ниже 0,4 эВ от концентрации гадолиния. Оказалось очень интересным, что световыход капризен и зависит от того, какое комплексное соединение: получено ли из нитратов гадолиния или неодима, с одной стороны, и, с другой стороны, получено ли из хлоридов и введено в качестве элементсодержащей добавки. Оказывается, что комплексы на основе хлоридов приводят к значительно меньшему снижению световыхода в связи с увеличением концентрации металла. А, чего и следовало ожидать, эффективность регистрации нейтронов не зависит от того, в какой форме был введен гадолиний, а зависит только от количества ядер изотопов-захватчиков, т.е. от массовой доли (от концентрации).

В этой же главе описаны неодимсодержащие жидкие сцинтилляторы. В качестве сцинтилляционной основы избран линейный алкилбензол, в качестве неодимсодержащей добавки, воспользовавшись нашим опытом, полученным при разработке и исследовании гадолинийсодержащих сцинтилляторов, мы выбрали несколько карбоксилатов неодима: 4-метилоктаноат (Nd-МО), 2-этилгексаноат (Nd-ЕН) и 3,5,5-триметилгексаноат (Nd-ТМНА). Нами были рассмотрены оба варианта известных технологий для получения сцинтилляторов: жидкостная экстракция и непосредственное растворение предварительно полученной добавки. Были рассмотрены еще варианты, которые отличались сцинтилляционными добавками. Таким образом, всего нами было приготовлено и исследовано 10 жидких сцинтилляторов неодимсодержащих. Мы исследовали их прозрачность, зависимость световыхода от концентрации металла и определили, что наиболее оптимальным является использование второго технологического приема для той добавки, которую мы называем 3,5,5-триметилгексаноат неодима.



Следующая глава посвящена кадмийсодержащим органическим сцинтилляторам, которые являются и могут служить альтернативой гадолинийсодержащим, поскольку кадмий имеет изотоп  $^{116}\text{Cd}$ , который имеет очень высокое сечение захвата тепловых нейтронов, при этом выделяется громадное количество энергии в виде каскада гамма-квантов с суммарной энергией, достигающей 9 МэВ. Нами впервые получены кадмийсодержащие пластмассовые сцинтилляторы, и нами впервые получены кадмийсодержащие жидкие сцинтилляторы, которые отличаются высокой концентрацией металла и безопасностью использования, что определяется той сцинтилляционной основой, которая нами применена. Основа двухкомпонентная, поскольку для увеличения растворимости кадмийсодержащей добавки нам пришлось в линейный алкилбензол добавлять трибутилфосфат – вещество не активное в сцинтилляционном отношении, но необходимое для растворения кадмийсодержащей добавки. Нами исследована концентрационная зависимость, исследована прозрачность образцов, которая меняется и снижается с увеличением концентрации кадмия. Кадмий – тяжёлый элемент, концентрационное тушение, разбавление, эти слова я уже произносил. Исследована эффективность регистрации нейтронов с энергией меньшей 0,4 эВ от количества введённого кадмия. Жидкие кадмийсодержащие сцинтилляторы, я уже объяснил на какой основе они были получены, мы изготовили две серии, отличающиеся соотношением вот этих вот жидких растворителей линейного алкилбензола и трибутилфосфата. В первом случае нам, конечно же, удалось ввести несколько меньшее количество кадмия, но при этом, и вот на этом графике видно, вот верхняя прямая — световыход кадмийсодержащего сцинтиллятора несколько больше, чем в том случае (во втором), где трибутилфосфата больше, нам удалось ввести кадмия больше, но световыход при этом конечно же страдает. Естественно, что, как в случае гадолинийсодержащих сцинтилляторов, неважно какая выбрана основа, главное сколько было введено кадмия. Поэтому для двух этих серий сцинтилляторов при одинаковой концентрации введённого кадмия эффективность регистрации нейтронов в пределах погрешности одинакова.

Шестая глава посвящена усовершенствованию технологии получения, усовершенствованию аппаратуры и оборудования, для получения пластмассовых сцинтилляторов «стандартного состава» на основе полистирола. Известны несколько методов получения пластмассовых сцинтилляторов. Наиболее качественные сцинтилляторы получают по первому методу, радикальной полимеризацией в массе. Это даёт материал с наилучшей прозрачностью, это даёт материал с наилучшим световыходом, даёт материал с наилучшими спектротрическими характеристиками. Нами разработан проект, нами сформулированы технические задания, в исполнении которых мы и сами принимали участие, для новой технологической схемы изготовления пластмассовых сцинтилляторов на основе полистирола. Перед вами некоторые компоненты этой схемы. Один из важных элементов, ее компонентов – это вакуумная установка для очистки стирола, которая даёт исходный мономер для получения сцинтиллятора на основе полистирола высокого качества, прозрачность его намного лучше, чем прозрачность стирола, полученного на основе обычных лабораторных стеклянных установок. Эта установка безопасна в использовании, так как в ней в качестве нагревателя используется индукционный нагреватель, и тепло вырабатывается

просто в доньшке и стенках аппарата, никаких электрических нагревателей, что чревато каким-то воспламенением, в этой установке не используется.

Нами с использованием этого оборудования изготовлено большое количество сцинтилляторов для, в частности, для эксперимента NEMO-3, детектора по исследованию, по поиску безнейтринного двойного бета-распада. Для того, чтобы обеспечить эту установку, в которой две стенки калориметрической части изготовлены из пластмассовых сцинтилляторов, нам пришлось изготовить большое количество сцинтилляторов разнообразной геометрии, вот эти количества, которые вы видите на этом рисунке, пошли в установку. Но для того чтобы отобрать, а требования эксперимента были очень высоки, нам пришлось изготовить намного больше сцинтилляторов. Критерии отбора сформулированы в виде энергетического разрешения для блоков различной геометрии. Всего нами было переработано за 4 года свыше 20 тонн исходных материалов. При этом пришлось отобрать только самые лучшие сцинтилляторы всех трех типов. Разработка проекта и создание участка позволили нам улучшить условия труда, повысить производительность труда, обеспечить стабильный уровень качества и обеспечить изготовление высококачественных пластмассовых сцинтилляторов для целого ряда экспериментов.

Уважаемые коллеги, я не буду утомлять ваше внимание дословным чтением заключения. Вы наверно прочитали его в автореферате, который вы получили. Я хочу сформулировать, что в ходе выполнения диссертационной работы была разработана совокупность методов получения новых и улучшения технологии получения известных органических сцинтилляторов, предназначенных для экспериментального обеспечения проектов в области нейтринной физики.

Научная новизна определяется целым рядом пунктов:

- разработка и исследование свойств жидкого сцинтиллятора «стандартного состава»;
- разработка и исследование свойств жидкого гадолинийсодержащего сцинтиллятора;
- использование о-карборана для получения борсодержащих жидких и пластмассовых сцинтилляторов.
- использование комплексных соединений гадолиния с гексаметилтриамидом фосфорной кислоты для получения пластмассовых сцинтилляторов, содержащих редкоземельные элементы;
- получение с рекордной массовой долей гадолинийсодержащих пластмассовых сцинтилляторов;
- разработка и исследование неодимсодержащих пластмассовых сцинтилляторов;
- разработка и исследование неодимсодержащих жидких сцинтилляторов, пригодных для использования в крупномасштабных экспериментах;
- разработка и использование кадмийсодержащих пластмассовых сцинтилляторов%;
- разработка и использование кадмийсодержащих жидких сцинтилляторов с высокой температурой вспышки.

Практическая значимость работы в том, что ее результаты использовались и используются коллегами, используются в ряде экспериментов, результаты работы могут быть использованы в дальнейшем для других экспериментов, в которых они могут быть

востребованы. Александр Иванович уже упоминал, что практическая значимость моего исследования подтверждена письмами директора подземной лаборатории Модан профессором Фабрисом Пикмалем и директором института физики высоких энергий Китайской Академии Наук Ифангом Вангом.

Ну и в завершении, я выношу на ваше обсуждение положения и результаты, представленные на слайде. Наверное, не стоит их зачитывать.

Благодарю вас за внимание.

**Малахов А.И.:** Спасибо, Игорь Борисович. Пожалуйста, вопросы. Ужинский Владимир Витальевич.

**Ужинский В.В.:** У меня один простой вопрос, а другой несколько посложнее. Здесь, в автореферате, перечислены те работы, которые вошли в состав и, в том числе, в списке ВАК с 2005 и кончается 2014. Сейчас 2019, разрыв 5 лет. С чем он связан?

**Немченко И.Б.:** Это было связано с моим выбором специальности. Я долго не мог определиться по какой специальности мне представить. Вначале мне почему-то в голову пришла мысль о специальности «Материаловедение». Я искал советы. Это связано с тем, что, например, хорошо известен Институт монокристаллов, находящийся в Харькове. Там «сцинтилляторщики» как раз защищаются по специальности «Материаловедение». Но мне не удалось в Российской Федерации найти совет, в котором бы рассматривались функциональные материалы. Как правило, советы по «Материаловедению» – это советы в области металлургии, в области станкостроения, что, конечно же, не подходило мне. И после консультаций с коллегами я просто получил рекомендации, что эта работа подходит для вот этой вот специальности. На это потребовалось какое-то время.

**Ужинский В.В.:** Второй вопрос. В выводах к первой главе Вашей диссертации Вами на странице 71 есть очень интересная фраза: «дальнейшие исследования в этом направлении в использовании новейших технологий в том числе и нано- позволяют» и т.д. по тексту. Вы не могли бы расшифровать. Нанотехнологии в данном аспекте? Что понимается? Берем раствор? Наночастицы на поверхности?

**Немченко И.Б.:** Известны, например, литийсодержащие пластмассовые сцинтилляторы, которые содержат в себе фторид лития. Естественная смесь изотопов фторида лития, содержащая  ${}^6\text{Li}$ , который тоже нужен для регистрации тепловых нейтронов, и есть несколько работ, в которых использован очень мелкодиспергированный, практически до наноразмерного состояния, фторид лития. Примеры такие уже есть.

**Ужинский В.В.:** То есть реакция не на поверхности наночастиц?

**Немченко И.Б.:** Нет-нет, они диспергированы в объеме.

**Ужинский В.В.:** Хорошо. Спасибо.

**Малахов А.И.:** Так, пожалуйста, Батюня.

**Батюня Б.В.:** Здесь, конечно, очень много специфической информации для неспециалистов. Сцинтилляторы, насколько я знаю, используются почти во всех экспериментах, может не в такой сложной форме. В том числе по триггерам часто используют больше стандартные, без добавок. Вы докладываете, на мой взгляд, про очень сложные сцинтилляторы и сложные современные технологии. Насколько это дороже? Вы не упомянули, вот скажем в таком огромном объеме, как в нейтринных

детекторах и для менее объемных экспериментов. Это дорогая технология? Насколько дороже стандартных, без добавок и т.д.?

**Немченко И.Б.:** Конечно дороже, поскольку соединения редкоземельных элементов сами по себе недешевы. Поскольку та, предложенная нами, замечательная, хорошо работающая добавка для борсодержащих сцинтилляторов, о-карборан – самая низкая цена, которую мне в последнее время удавалось найти, килограмм его стоит около 800 000 рублей. Но, тем не менее, в последнее время, часто возникают вопросы по поводу того же борсодержащего пластмассового сцинтиллятора. Был период, когда не обращались люди, последнее время обращаются. Я думаю, это связано, во-первых, с усовершенствованием фотоэлектронных умножителей, у которых шума меньше, поэтому позволяют регистрировать альфа-частицу, которая рождается при захвате бором-10 теплового нейтрона, которая из-за альфа/бета отношения регистрируется как электрон с энергией порядка 180 кэВ. А второе, борсодержащий сцинтиллятор дает координату. Отвечая на Ваш вопрос, конечно, они дороже, но в зависимости от концентрации, нужно считать насколько дороже каждый конкретный запрос будет.

**Малахов А.И.:** Еще вопросы есть?

**Садовский С.А.:** Скажите, пожалуйста, нельзя ли в жидком сцинтилляторе растворить  $\text{BF}_3$ ?

**Немченко И.Б.:**  $\text{BF}_3$  – чрезвычайно агрессивный газ, который используется в газонаполненных детекторах нейтронов, но он там тщательным образом изолирован от окружающей среды. Это, простите меня за специфические термины, кислота Льюиса, которая активно реагирует с чем угодно, он образует туман на воздухе и т.д.

**Садовский С.А.:** Но в принципе можно?

**Немченко И.Б.:** Нет. С ним никто работать не захочет. И Вы в первую очередь.

**Малахов А.И.:** Еще вопросы. Пожалуйста.

**Капишин М.Н.:** С какой эффективностью Вы можете отделить отклик нейтрона от гамма кванта? И второй вопрос по поводу детектирования двойного бета-распада. Каковы временные характеристики сцинтиллятора? Возможно, для экспериментов необходимо иметь хорошее временное разрешение?

**Немченко И.Б.:** Пластмассовые сцинтилляторы на основе полистирола, это быстрые сцинтилляторы, имеют порядка 2,5 наносекунд. Что касается первого вопроса  $n, \gamma$ -разделения, то сцинтилляторы на основе линейного алкилбензола сами по себе для этого вряд ли могут быть использованы. Но эта тема уже не моего исследования. У нас в отделе сейчас проводится исследование, видимо, это тема другой диссертации, мы помогаем, участвуем в этом исследовании, мы приготовили целый ряд смесей на основе линейного алкибензола и нафталинсодержащих компонентов, от которых как раз мы ожидаем возможности разделения по форме импульса.

**Малахов А.И.:** Спасибо, еще вопросы есть?

**Калинников В.А.:** Мой вопрос следующий. В Вашей презентации не было сказано о спектре люминесценции. Вы показываете спектр пропускания, где лежит спектр люминесценции? Если он лежит в зоне прозрачности – это одна ситуация, если он частично перекрывается – это другая ситуация. И Вы показываете изменение световыхода от концентрации. Объясните, какой механизм здесь влияет на изменение световыхода?

И второй вопрос. Ничего не было сказано о радиационной длине и энергетическом разрешении, т.е. это два параметра, которые позволяют ответить на вопрос: какие габариты детектора. Точность регистрации энергии.

И третий. Замечание есть по автореферату. На странице 29 Вы пишете: «увеличение содержания трибутилфосфата в сцинтилляционной основе практически не влияет на спектр поглощения, рисунок 21». На рисунке 21 приведен спектр пропускания.

**Немченко И.Б.:** За это конечно нужно извиниться. Пропускание и поглощение — это, конечно, диаметрально противоположные вещи. Согласен с Вами. Но смысл, я надеюсь, тем не менее понятен.

**Калинников В.А.:** Частично, да.

**Немченко И.Б.:** Что касается Вашего первого вопроса. Спектр. Тоже, наверно, должен извиниться. Просто я знаю, что такая спектросмещающая добавка, которая называется РОРОР, которая нами использовалась, хорошо известна всем специалистам, кто сталкивается с пластмассовыми сцинтилляторами. Только по этой причине я не привел спектры излучения, максимум находится при длине волны 418 нм, в видимой области спектра, в которой наиболее известные типы фотоумножителей и фотокатоды имеют свою широкую колоколообразную кривую.

Снижение световыхода в связи с концентрацией связано с несколькими вещами, во-первых, происходит разбавление, мы вводим новый компонент, мы разбавляем активную в сцинтилляционном отношении основу. Ухудшаются процессы переноса энергии.

**Калинников В.А.:** То есть механизм рассеяния?

**Немченко И.Б.:** Ну и перенос энергии ухудшается. Во-вторых, при введении атомов тяжелых элементов реализуется так называемый «эффект тяжелого атома» — спин-орбитальное взаимодействие, за счет которого снижается количество излученных фотонов. Простите, второй вопрос?

**Калинников В.А.:** Вы ответили. Эффект поглощения и эффект рассеяния. Какой из них в Вашем случае наиболее критический?

**Немченко И.Б.:** Вы знаете, до механизмов мы не дошли. Мы не ставили перед собой такой задачи. Я поэтому затрудняюсь ответить.

**Калинников В.А.:** И последний вопрос. Можете ли Вы что-то сказать о радиационной длине? Какие там примерно хотя бы длины?

**Немченко И.Б.:** Вы говорили о разрешении, разрешение зависит от геометрии, здесь есть табличка, и в каждом конкретном случае нужно обсуждать какие энергии, какие частицы нужно регистрировать и под это оптимизировать геометрию детектора.

**Калинников В.А.:** Энергетическое разрешение оно определяется люминесценцией, составом Вашего материала?

**Немченко И.Б.:** Чем больше световыход, тем лучше энергетическое разрешение. Это факт.

**Калинников В.А.:** Это не факт, вот я могу в качестве примера привести кристалл на основе гадолиния. Он имеет световыход 7000 фотонов на МэВ.

**Немченко И.Б.:** Да.

**Калинников В.А.:** Кристаллы на основе лютетия (ортосиликат лютетия), они имеют световыход 28 000 фотонов на МэВ. А с добавкой лития они имеют 30000, то

есть более чем в 4 раза, а энергетическое отношение практически одинаково. Тут более сложная зависимость.

**Немченко И.Б.:** Зависимость более сложная. Когда я сказал о зависимости, связи с разрешением, конечно же, я имел в виду сходные системы. Вы сравниваете монокристаллы разной природы, поэтому конечно же, в вашем случае, в тех примерах, которые Вы привели, кроме световых ещё какие-то твердотельные причины играют роль, например, однородность. В разных случаях структура разная. Из-за этого может происходить уширение пика.

**Калинников В.А.:** Но у вас же однородная структура, получается.

**Немченко И.Б.:** Однородной структурой пластмассовые сцинтилляторы не обладают, поэтому не обладают замечательным разрешением от своей природы, именно потому, что не являются до конца однородными, это полимерный стеклообразный материал. Это не кристаллические вещества.

**Малахов А.И.:** Так. У нас сейчас в общем-то вопросы. Потом будет специальное время для дискуссий, поэтому сейчас давайте задавать вопросы. Пожалуйста, Георгий Леонович.

**Мелкумов Г.Л.:** Вы говорили о разработках в экспериментах, это конечно то, что интересует нашу и вашу лаборатории. Вот те разработки, которые в DAYA BAU использовались. Эти разработки специфичны именно для этого эксперимента нейтринного и, если нет, то проявлен ли какой-либо интерес в других нейтринных экспериментах, которые проводятся, которые планируются проводить, чтобы использовать подобного типа сцинтилляторы, которые Вы разработали и внедрили в этом эксперименте DAYA BAU.

**Немченко И.Б.:** С некоторым отставанием от DAYA BAU шел эксперимент который называется RENO, в Корею. Там детектор намного меньше по массе, по-моему, всего 6 тонн, он шел с некоторым отставанием и вскорости он подтвердил результаты, полученные в DAYA BAU. Буквально через несколько месяцев, вслед за DAYA BAU, наверное, основываясь на публикациях коллаборации, тоже был использован сцинтиллятор такого же состава.

**Мелкумов Г.Л.:** По крайней мере, Вы можете привести примеры основываясь на публикациях. Сейчас скажем эксперимент Chooz-2.

**Немченко И.Б.:** В Chooz-2 подобная схема экспериментов, используют тоже гадолинийсодержащий жидкий сцинтиллятор, но на другой основе, построенный на других гадолинийсодержащих добавках.

**Малахов А.И.:** Так. Спасибо. Ещё есть вопросы? Ну вот от себя короткий вопрос. Вот жидкий сцинтиллятор, там всякие добавки, как они со временем себя ведут? Там осадки всякие, перемешивания всякие, стабильность. Как с этим обстоит дело?

**Немченко И.Б.:** Вот эти сцинтилляторы, которые в DAYA BAU используются, очень стабильны. Первая статья вышла в марте 2012 года. А набор данных начался за какое-то время до этого. И с тех пор я не знаю никаких упоминаний о дефектах сцинтиллятора, а состояние сцинтиллятора там мониторится постоянно.

**Малахов А.И.:** Понятно. Спасибо. Хорошо, если нет больше вопросов, то переходим. Значит Игорь Борисович, Вы можете присесть где-нибудь. Мы переходим к части знакомства с отзывами. Слово нашему ученому секретарю.

**Арефьев В.А.:** Отзыв от организации, где была выполнена диссертационная работа. Оформлен в виде выписки из протокола заседания НТС научно-экспериментального отдела ядерной спектроскопии и радиохимии Лаборатории ядерных проблем им. Дзелепова Объединенного института ядерных исследований. По итогам обсуждения, принято следующее заключение. Диссертация Игоря Борисовича Немченка, является законченной научно-исследовательской работой. Соискателем разработана совокупность методов получения новых и улучшения технологии получения известных органических сцинтилляторов, предназначенных для экспериментального обеспечения проектов в области нейтринной физики. В работе описаны результаты исследований по получению и изучению свойств жидких сцинтилляторов для нейтринного эксперимента DAYA BAY, ряд элементосодержащих сцинтилляторов, как жидких, так и пластмассовых, а также пластмассовых для экспериментов NEMO-3. Актуальность темы диссертационной работы определяется постоянно возрастающей потребностью в детекторах на основе органических сцинтилляторов с повышенной эффективностью регистрации отдельных видов излучений пригодных для использования в крупномасштабных физических экспериментах. Далее перечисляются основные результаты работы из девяти пунктов. Нужно зачитывать или мы всё это уже заслушали?

**Малахов А.И.:** Никто не настаивает?

**Тютюнников С.И.:** Нет.

**Арефьев В.А.:** Так, следующее. Научная новизна. С ней то же самое, всё было представлено в диссертации, всё это показано.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов определяется: воспроизводимостью разработанных экспериментальных методик, стандартными методами обработки экспериментальных данных, использование сертифицированного оборудования или его комплектующих.

Практическая значимость диссертации определяется следующим: спроектирован и введён в эксплуатацию экспериментальный участок по производству высококачественных пластмассовых сцинтилляторов на основе полистирола. Использование нового оборудования обеспечило изготовление пластмассовых сцинтилляторов для эксперимента по исследованию двойного бета-распада NEMO-3; создания нескольких поколений низкофонового детектора  $\text{BiPo}$ , предназначенного для измерения сверхнизких уровней естественной радиоактивности пленочных материалов; создания вето-системы Демонстратора SuperNEMO для поиска безнейтринного двойного  $\beta$ -распада; экспериментов по исследованию широких атмосферных ливней. Разработанные совместно с коллегами коллаборации DAYA BAY жидкий сцинтиллятор «стандартного состава» и гадолинийсодержащий жидкий сцинтиллятор, изготовлены в количестве 200 и 185 тонн, соответственно, и успешно применяются в эксперименте. Разработанные пластмассовые и жидкие бор-, гадолиний- и кадмийсодержащие сцинтилляторы могут быть успешно использованы для регистрации тепловых нейтронов как в научных целях, так и для решения прикладных задач. Разработанные жидкие неодимсодержащие сцинтилляторы создают предпосылки для проектирования новых поколений крупномасштабных детекторов для исследования двойного бета-распада. Практическое использование научных результатов диссертационного

исследования подтверждено директором Института физики высоких энергий Китайской Академии Наук и директором подземной лаборатории Модан.

Личный вклад. Автор был инициатором, руководителем и непосредственным участником всех работ, результаты которых вошли в диссертацию. Содержание диссертации, основные положения, выносимые на защиту, практическая значимость полученных результатов отражает персональный вклад автора.

Апробация работы. Работа докладывалась на семинарах и рабочих совещаниях как в Объединенном институте ядерных исследований, так и во многих институтах разных стран и на международных конференциях (более 10 конференций). Основные результаты опубликованы в 14 статьях в журналах, рекомендованных ВАК, 5 публикаций в других изданиях, 15 тезисов докладов различных конференций. В ходе обсуждения было отмечено, что работа отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук и соответствует специальности. 01.04.01. – Приборы и методы экспериментальной физики.

Постановили: рекомендовать представленную Игорем Борисовичем Немченком диссертационную работу «Разработка и исследование пластмассовых и жидких сцинтилляторов для детекторов экспериментов в области нейтринной физики» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.01. – Приборы и методы экспериментальной физики к защите диссертационному совету в Лаборатории физики высоких энергий. Подписано председателем НТС отдела Бруданиным, секретарем НТС Перевощиковым и утверждено вице-директором Объединенного института ядерных исследований Иткисом.

**Малахов А.И.:** Спасибо. Что-то еще?

**Арефьев В.А.:** Следующий отзыв ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения Институт ядерных исследований Российской Академии Наук.

Актуальность темы диссертации. Детекторы на основе органических сцинтилляторов, в первую очередь, пластмассовых и жидких, давно уже стали неотъемлемыми компонентами как экспериментальных установок для решения фундаментальных физических задач, так и приборов для прикладных исследований. Эти материалы достаточно доступны, устойчивы к различным видам внешних воздействий и, благодаря своим свойствам, обеспечивают надежную регистрацию определенных видов ядерных излучений. Из-за высокого содержания водорода они практически незаменимы в качестве рабочего вещества крупномасштабных нейтринных детекторов.

Однако химический состав пластмассовых и жидких сцинтилляторов, ограниченный углеродом и водородом (которые автор называет сцинтилляторами «стандартного состава»), определенным образом лимитирует их использование. Дело в том, что эти детектирующие материалы, хорошо чувствующие заряженные частицы и нейтроны средних и высоких энергий, имеют ограниченную эффективность регистрации даже электромагнитного излучения. Но, с другой стороны, молекулярный характер люминесценции этих сцинтилляторов предоставляет возможности для планомерного и управляемого и направленного видоизменения их элементного состава, получения на этой основе элементосодержащих сцинтилляционных детекторов с новыми качествами.



Целью диссертационной работы И.Б. Немченка является разработка совокупности методов получения, а также усовершенствование и экспериментальное исследование пластмассовых и жидких сцинтилляторов для крупномасштабных нейтринных детекторов. Для достижения поставленной цели выполнялись следующие задачи:

- разработка и исследование свойств жидкого сцинтиллятора «стандартного состава», пригодного для использования в крупномасштабных детекторах;
- разработка и исследование свойств семейства элементосодержащих жидких сцинтилляторов;
- разработка и исследование свойств семейства элементосодержащих пластмассовых сцинтилляторов;
- усовершенствование технологии изготовления пластмассовых сцинтилляторов «стандартного состава» на основе полистирола для получения детекторов с улучшенными свойствами.

Формулировка цели и задач диссертации, успешное достижение поставленной цели и решение задач исследования определяет его актуальность.

Далее описывается краткое содержание диссертации.

Далее практическая значимость основных результатов диссертации, подтверждена письмами директора Института физики высоких энергий Китайской Академии Наук и директора Подземной лаборатории Модан. Состоит она в следующем:

- разработка проекта и создание технологического участка по производству высококачественных пластмассовых сцинтилляторов на основе полистирола;
- разработанные совместно с коллегами по коллаборации DAYA BAY жидкий сцинтиллятор «стандартного состава» и гадолинийсодержащий жидкий сцинтиллятор, успешно применяются в эксперименте;
- разработанные жидкие неодимсодержащие сцинтилляторы создают предпосылки для проектирования новых крупномасштабных детекторов по исследованию двойного бета-распада.

Далее отмечаются результаты диссертации, имеющие научную новизну.

Основные результаты диссертации получили полное отражение в ее тексте. Автореферат полностью и верно отражает содержание диссертации. Диссертационная работа Игоря Борисовича Немченка представляет собой законченное исследование по одной из актуальных проблем экспериментального обеспечения физических исследований. Личный вклад автора в получении всех результатов, представленных в диссертации, был определяющим и подробно описан в автореферате.

В составе коллаборации DAYA BAY автор удостоен престижной премии в области науки «Breakthrough Prize in Fundamental Physics 2016» за исследование осцилляций нейтрино. Работы автора в составе авторских коллективов удостоены первой премии Объединенного института ядерных исследований и двух первых премий Лаборатории ядерных проблем.

В диссертации есть недостатки, незначительные по существу, к которым можно отнести следующее:

- к сожалению, не во всех графиках представлены экспериментальные ошибки;
- в разделах, посвященных сцинтилляторам для регистрации нейтронов, не обосновывается выбор величины граничной энергии нейтронов 0,4 эВ;

- на стр. 79 упоминаются «детекторы на основе резистивных плоских камер», хотя есть широко используемое название «резистивных плоскопараллельных камер» или «резистивных плоскопараллельных счетчиков»;
- на стр. 52 не совсем правильно написана фамилия Рамасвами Рагавана, именно так произносится и пишется у нас в стране имя этого выдающегося физика.

Вместе с тем, изложенные замечания не снижают научной ценности и практической значимости работы. Достоверность выводов, представленных в диссертации, не вызывает сомнений. Основные результаты работы активно используются в ведущих экспериментах в мире, и, несомненно, будут использованы в будущих экспериментах, как в ведущих мировых центрах, так и в отечественных центрах.

Диссертационная работа Игоря Борисовича Немченка «Разработка и исследование пластмассовых и жидких сцинтилляторов для детекторов экспериментов в области нейтринной физики» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук и полностью соответствует паспорту специальности 01.04.01. – Приборы и методы экспериментальной физики.

Автор диссертации Немченко Игорь Борисович несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.01. – Приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертация заслушана 25 апреля 2019 года на семинаре Отдела экспериментальной физики Института ядерных исследований Российской Академии Наук. Отзыв заслушан и утвержден на заседании НТС Отдела экспериментальной физики Института ядерных исследований Российской Академии Наук 25 апреля 2019 года. Отзыв составлен доктором физико-математических наук, ведущим научным сотрудником Отдела экспериментальной физики Лубсандоржиевым. Подписан председателем НТС Отдела экспериментальной физики, заведующим отделом, академиком РАН, профессором, доктором физико-математических наук Ткачевым. Утвержден заместителем директора ИЯИ, профессором Либановым.

**Малахов А.И.:** Спасибо. Игорь Борисович, были замечания. Вы имеете право ответить.

**Немченко И.Б.:** Поскольку меня предварительно с отзывами познакомили, то я внимательно посмотрел.

Первое, по поводу экспериментальных ошибок. Несколько рисунков, которые относятся к первой главе, они мною построены на основе литературных источников, там не было ошибок. Поэтому я их, естественно, не придумал. Во второй главе три рисунка построены на основе данных производителя линейного алкилбензола (речь идет о составе сложной смеси). Это производственное объединение «КИРИШИОРГСИНТЕЗ». Они тоже не указывали ошибок. В главе 3 и 4 речь идет о рисунках, в которых я сопоставлял свойства гадолиний- и борсодержащих сцинтилляторов. Поскольку раньше каждый отдельный материал был представлен с погрешностями, то в суммирующих рисунках, я сейчас не могу восстановить картину, наверное, не имело смысла загромождать рисунок.

Второй вопрос. «...не обосновывается выбор величины граничной энергии нейтронов 0,4 эВ». Таковы были экспериментальные условия, с которыми мы

согласились с нашими коллегами из Лаборатории нейтронной физики, это так называемые «подкадмиевые нейтроны», которые так называются на сленге. И я решил этот научный сленг заменить и везде обозначал их как нейтроны с энергией менее 0,4 эВ.

Замечание по поводу детекторов на основе резистивных плоских камер, безусловно согласен. И с тем, что я несколько искажил фамилию известного и уважаемого коллеги тоже согласен.

**Малахов А.И.:** Спасибо, Игорь Борисович. Валентин Александрович. Еще есть?

**Арефьев В.А.:** Да. Имеется отзыв на автореферат, представленный доктором химических наук Пономаренко Сергеем Анатольевичем, членом-корреспондентом РАН, из Института синтетических полимерных материалов имени Ениколопова Российской Академии Наук.

Отзыв положительный, но содержит два замечания.

Первое. Из приведенного на рис. 8. графика следует, что эффективность регистрации нейтронов с энергией 0,4 эВ для высоты слоя образца 20 мм резко возрастает при достижении массовой доли бора 1%, после чего фактически выходит на плато около 30% и в пределах погрешности измерений вплоть до 5,5% не изменяется, и лишь немного растет (примерно 5%) до 6% концентрации бора. При этом из рис. 9 следует, что при повышении массовой доли бора от 1 до 6% относительный световыход падает в 1,5 раза. Сравнивая оба графика, возникает вопрос о целесообразности увеличения концентрации бора от 1 до 6%. Какая в итоге концентрация бора является оптимальной, учитывая значительную стоимость о-карборана?

И второй. Аналогичные вопросы возникают и для массовой доли гадолиния и неодима. Во всех случаях при переходе к максимальным концентрациям элементосодержащих добавок происходит снижение эффективности и снижение световыхода.

Следует отметить, что возникающие вопросы носят дискуссионный и уточняющий характер и ни в коей мере не умаляют достоинств описанной в автореферате диссертационной работы. Представленные в автореферате материалы позволяют сделать вывод о том, что диссертационная работа полностью соответствует требованиям и отвечает критериям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, а автор, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.01. – Приборы и методы экспериментальной физики.

**Малахов А.И.:** Спасибо. Ответить имеете желание?

**Немченко И.Б.:** Да, конечно. Еще Ломоносов говорил, что, если где чего добавится, то в другом месте убудет. Точно так же и увеличение эффективности регистрации влечет за собой снижение световыхода, мы с обсудили, уважаемые члены диссертационного совета, это с вами. Я как раз в этом и видел свою задачу, это и надо было установить. Это надо было получить в цифрах. И пользователи этих детекторов как раз и смогут выбрать оптимальное соотношение световыхода и эффективности регистрации.

**Малахов А.И.:** Так. Еще есть?

**Арефьев В.А.:** Есть еще отзыв на автореферат, предоставленный помощником президента Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,

членом-корреспондентом РАН, доктором физ.-мат. наук Виктором Лазаревичем Аксеновым.

Отзыв положительный. В автореферате диссертации Немченка Игоря Борисовича на тему «Разработка и исследование пластмассовых и жидких сцинтилляторов для детекторов экспериментов в области нейтринной физики» представлена совокупность новых исследований по получению и усовершенствованию свойств таких важных для нейтринных детекторов материалов, которыми являются органические сцинтилляторы. Особое внимание автора уделено сцинтилляторам с добавками элементов, имеющих изотопы с высоким сечением захвата тепловых нейтронов. Большой интерес специалистов к детекторам на основе органических сцинтилляторов является свидетельством актуальности выбранной темы исследования.

Автореферат дает достаточно полное представление о проделанной работе. Положения и результаты, выдвигаемые на защиту, достаточно обоснованы и убедительны. Личный вклад автора не вызывает сомнений. Сами результаты хорошо апробированы на многочисленных конференциях, семинарах и рабочих совещаниях. Работа представляет собой законченное исследование, результаты которого являются новыми и вносят большой вклад в развитие детекторной базы нейтринной физики. Текст автореферата написан ясным языком и хорошо иллюстрирован графическим и табличным материалом.

Практическая значимость работы подтверждается использованием ее результатов в действующих в настоящее время и работавших ранее экспериментальных установках.

Судя по автореферату можно сказать, что диссертация полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук. Совокупность ее выводов и результатов представляет собой значительный вклад в развитие сцинтилляционного метода детектирования в физике частиц.

Автор диссертации безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук.

**Малахов А.И.:** Спасибо. Критики нет?

**Арефьев В.А.:** Имеются, уже упоминавшиеся два письма от руководителей экспериментов. Но я из письма из Лаборатории Модан прочитаю просто последний абзац: «В заключении отметим, что вклад Немченка в эксперименты NEMO-3 и SuperNEMO имеет решающее значение и поставленные пластмассовые сцинтилляторы позволяют достичь ожидаемых результатов.»

И отзыв из Китая. Здесь подтверждается в этом отзыве, что в коллаборации DAYA BAU широко используются практические результаты докторской диссертации Игоря Борисовича Немченка.

**Малахов А.И.:** Спасибо. Мы переходим к отзывам официальных оппонентов. Но по правилам, мы должны сначала заслушать отзыв отсутствующего. Отсутствует у нас Бузулуцков Алексей Федорович, доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник ФГБУ науки Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской Академии Наук.

Пожалуйста. Наверное, тоже не все, да?

**Арефьев В.А.:** Да.

Доктор физико-математических наук Бузулуцков Алексей Федорович представил следующий отзыв на диссертационную работу.

Диссертационная работа посвящена разработке и исследованию пластмассовых и жидких сцинтилляторов для экспериментов в области нейтринной физики.

Избранная тема является, несомненно, актуальной и определяется растущей потребностью в детекторах на основе органических сцинтилляторов с повышенной эффективностью регистрации различных видов излучений, в частности нейтронов, пригодных для использования в крупномасштабных физических экспериментах. Основной целью работы являлась разработка методов получения, а также создание и экспериментальное исследование новых эффективных пластмассовых и жидких сцинтилляторов для крупномасштабных нейтринных детекторов.

Далее краткое содержание работы. Далее основные ее результаты перечисляются, с которыми мы уже хорошо ознакомились.

Таким образом, поставленная цель по разработке и исследованию новых эффективных пластмассовых и жидких сцинтилляторов для крупномасштабных нейтринных и низкофоновых экспериментов была достигнута.

Степень обоснованности и достоверность научных результатов и выводов, полученных в диссертации, определяется воспроизводимостью разработанных экспериментальных методик, их использованием на практике в действующих экспериментах и, таким образом, не вызывает сомнения. Новизна полученных результатов заключается в разработке новых типов эффективных сцинтилляторов для крупномасштабных нейтринных и низкофоновых экспериментов, как пластмассовых, так и жидких, с добавками различных элементов для эффективной регистрации нейтронов.

В целом работа выполнена на высоком уровне, однако в ней имеются отдельные несущественные недостатки, и есть некоторые вопросы.

Глава 1. Утверждение на стр. 21, что неорганические сцинтилляторы являются медленными по сравнению с органическими сцинтилляторами, не совсем корректно. Так, по быстрдействию жидкий ксенон вполне сравним с органическими сцинтилляторами, а  $\text{BaF}_2$  с его рекордно быстрой компонентой их превосходит.

Глава 2. На стр. 108 приведена таблица 2.9. по временным свойствам жидким сцинтилляторов на основе линейного алкилбензола. Не плохо было бы сопроводить ее примерами временных спектров сигналов, аналогично тому, как это сделано для таблицы 2.11 по энергетическому разрешению.

Глава 2. Хотя основной темой диссертации являются сцинтилляторы для регистрации тепловых нейтронов, было бы интересно узнать, возможна ли эффективная регистрация быстрых нейтронов? Конкретнее, можно ли отделить по форме сигнала быстрые нейтроны от гамма-квантов в жидком сцинтилляторе на основе линейного алкилбензола? Этот вопрос особенно актуален для нашей лаборатории, т.к. мы используем сцинтилляционные счетчики на основе стильбена для регистрации быстрых нейтронов и эффективного их отделения от гамма-фона при калибровке детекторов Темной материи методом рассеяния быстрых нейтронов. Вопрос: годится ли линейный алкилбензол для этих целей вместо стильбена?

Глава 4. На стр. 137-138 и рис 4.10-11 проводится сравнение бор- и гадолинийсодержащих сцинтилляторов по световыходу и эффективности регистрации

тепловых нейтронов. Однако, четкого вывода какой сцинтиллятор является лучшим на практике, не сделано. Возможно, каждый из них хорош в своей области применения. Тогда надо было это описать конкретнее.

Указанные недостатки не снижают практической ценности и высокого уровня диссертации, представленной к публичной защите.

Диссертационная работа является значительным вкладом в создание новых сцинтилляторов для крупномасштабных нейтринных и низкофоновых экспериментов. Следует отметить завершенность диссертационной работы, ее соответствие заявленной специальности, достаточное количество и качество публикаций соискателя. Следует также отметить аккуратность представленной работы, а именно практически полное отсутствие опечаток и небрежно сделанных рисунков, что нетривиально для диссертации такого большого объема.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации и соответствует содержанию диссертационной работы и требованиям, предъявляемым ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации.

Полученные Немченком результаты являются новыми, обоснованными и достоверными. Его диссертация полностью соответствует требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученой степени, предъявляемым к докторской диссертации, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.01.

**Малахов А.И.:** Ну что, Игорь Борисович, там были некоторые вопросы.

**Немченко И.Б.:** Отвечая на первый вопрос Алексея Федоровича, что касается временных свойств сцинтиллятора, говоря о том, что органические сцинтилляторы являются быстрыми, я понимаю, что есть исключения, я имел ввиду тенденцию, в целом, органические сцинтилляторы, как правило, бывают быстрее неорганических, хотя среди неорганических, безусловно, тоже встречаются быстрые сцинтилляторы.

Второй вопрос. Речь идет о том, что я не представил временные спектры. Собственно говоря, моя работа не была посвящена подробному исследованию временных характеристик. С этим и связано то, что спектры не оказались в этой диссертации.

Третий вопрос фактически связан с  $n, \gamma$ -разделением. Я уже постарался ответить на этот вопрос. Непосредственно в линейном алкилбензоле такое вряд ли получится, но мы сейчас начинаем работать и это тема отдельного исследования по получению на основе линейного алкилбензола жидких сцинтилляторов, которые бы хорошо работали для  $n, \gamma$ -разделения, для разделения по форме импульса.

Вопрос четвертый связан со сравнением бор- и гадолинийсодержащих сцинтилляторов. Да, действительно, эти материалы разные. Гадолинийсодержащие сцинтилляторы, наверное, не имеет смысла использовать в небольших детекторах, потому что гамма-лучи высоких энергий, что бы их поглотил жидкий сцинтиллятор, нужны большие пробеги. Поэтому они, возможно, должны быть использованы просто для разных целей: в одном случае, как в случае с гадолинием нужно высокое сечение захвата, это крупногабаритный детектор. Другой детектор, другой эксперимент, в котором необходимо определение координаты событий, безусловно возможно реализовать на основе борсодержащего сцинтиллятора. Это разные материалы, их трудно категорически свести вместе.

**Малахов А.И.:** Спасибо. Следующий у нас официальный оппонент – Владимир Иванович Рыкалин. Доктор физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник Института физики высоких энергий – НИЦ «Курчатовский институт».

**Рыкалин В.И.:** В диссертационной работе рассматриваются вопросы разработки, исследования и изготовления в требуемых, надо сказать огромных, объемах пластмассовых и жидких сцинтилляторов для экспериментов в области нейтринной физики. Разрешите дальше опустить дальнейшее описание содержания глав и основных результатов, которые уже были неоднократно обсуждены.

**Малахов А.И.:** Конечно. Нет возражений?

**Рыкалин В.И.:** Научная новизна диссертационной работы. Хотелось бы следующее отметить:

Первое. Разработка и исследование свойств жидкого сцинтиллятора «стандартного состава», предназначенного для использования в крупномасштабных экспериментах.

Второе. Разработка и исследование свойств жидкого гадолинийсодержащего сцинтиллятора, предназначенного для использования в крупномасштабных экспериментах.

Третье. Впервые реализовано использование о-карборана в качестве элементосодержащей добавки для получения борсодержащих пластмассовых и жидких сцинтилляторов, пригодных для использования в крупномасштабных экспериментах и исследование их свойств.

Четвертое. Исследование комплексных соединений солей гадолиния и неодима с гексаметилтриамидом фосфорной кислоты в качестве элементосодержащих добавок для получения гадолиний- и неодимсодержащих пластмассовых сцинтилляторов.

Пятое. Разработка и исследование свойств гадолинийсодержащих пластмассовых сцинтилляторов с рекордной массовой долей 4% металла.

Далее. Разработка и исследование неодимсодержащих пластмассовых сцинтилляторов.

Седьмое. Впервые были проведены разработка и исследования неодимсодержащих жидких сцинтилляторов, пригодных для использования в крупномасштабных экспериментах.

О достоверности результатов говорилось также достаточно много.

Практическая значимость. Разработка проекта и создание технологического участка по производству высококачественных пластмассовых сцинтилляторов на основе полистирола. Использование нового оборудования обеспечило изготовление пластмассовых сцинтилляторов для целого ряда экспериментов, таких как: эксперимент по исследованию двойного бета-распада NEMO-3 в лаборатории г. Модан, Франция, в создании нескольких модификаций низкофонового детектора  $\text{ViPo}$ , предназначенного для измерения сверхнизких уровней естественной радиоактивности пленочных материалов. Далее, создание вето-системы демонстратора SuperNEMO для поиска безнейтринного двойного бета-распада  $^{82}\text{Se}$ . Разработанный совместно с коллегами из коллаборации DAYA BAY жидкий сцинтиллятор «стандартного состава» и гадолинийсодержащий жидкий сцинтиллятор изготовлены в количестве 200 тонн и 185 тонн, соответственно, и успешно применяются в эксперименте.

Ну, теперь перейдем к замечаниям. Ну, первое замечание относительно того, что преимущественно быстродействие органических сцинтилляторов уже обсуждалось, ну и, действительно, сейчас целые классы новых неорганических сцинтилляторов, в том числе, на основе редкоземельных элементов, имеют время высвечивания единицы, десятки наносекунд и, в некотором плане, как конкурируют с органическими сцинтилляторами.

Далее, утверждение (глава 1, страница 27), что в области энергии фотона 15-29 кэВ не имеет смысла использовать сцинтилляторы органические для их регистрации, является крайне спорным, т. к. сечение поглощения фотонов растет с уменьшением энергии.

На странице 85 главы 2 увиолевое стекло названо виолевым, что, по-видимому, является опечаткой.

Из данных таблицы 2.3 (страница 90, глава 1) следует, что вторичные добавки РОРОР и bis-MSB, используемые в сцинтилляторах на основе линейного алкилбензола дают одинаковые результаты по световыходу и прозрачности при меньшей оптической плотности у РОРОР, но для изготовления многотоннажных объемов сцинтилляторов была использована добавка bis-MSB, что в диссертации, причина этого, в диссертации никак не комментируется.

И последнее. В разделе 3.1. главы 3, стр. 117-124, описан разработанный авторами борсодержащий сцинтиллятор с прекрасными характеристиками. Однако, совершенно отсутствует информация об изготовителе и, главное, характеристиках самого использованного о-карборана, который в значительной мере определяет основные свойства сцинтиллятора.

**Заключение.** Диссертантом разработана совокупность методов получения новых и улучшения технологии производства известных органических сцинтилляторов, предназначенных для детекторов нейтрино, что является значительным вкладом в экспериментальное обеспечение исследований в этой области. Полученные результаты являются новыми, обоснованными и достоверными. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Работы Игоря Борисовича Немченко многократно доложены на всероссийских и международных конференциях, семинарах и рабочих совещаниях. Они хорошо известны специалистам в этой области.

Отмеченные выше недостатки не снижают научной и практической ценности диссертации и ее высокого уровня. Диссертация полностью соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», а ее автор, Немченко Игорь Борисович, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.01. – Приборы и методы экспериментальной физики.

**Малахов А.И.:** Спасибо, Владимир Иванович. Переходим к замечаниям.

**Немченко И.Б.:** Владимир Иванович, я по поводу быстродействия уже говорил. Можно я не буду повторяться?

**Рыкалин В.И.:** Конечно.

**Немченко И.Б.:** Второе замечание касается того, что в области низкой энергии фотонов не очень предпочтительно использовать органические сцинтилляторы. Говоря это, я имел ввиду нелинейную зависимость световыхода органических сцинтилляторов от энергии фотонов и, конечно же, их невысокий световыход. И говоря о нежелательности их там использовать, я имел ввиду не использование для регистрации,



а использование в спектрометрических целях для измерения энергии. А если световой выход нелинеен, конечно, такое использование теряет всякий смысл, теряет основу под собой.

Да, «увиолевое» стекло неправильно назвал. Согласен с этим, конечно же.

По поводу выбора между POPOP и bis-MSB. Да, мы действительно показали, что, используя, две эти вторичные сцинтилляционные добавки получаются сцинтилляторы с одинаковыми характеристиками, но окончательный выбор был для изготовления 400 тонн сцинтилляторов за коллаборацией. Коллаборация DAYA BAY выбрала в качестве добавки bis-MSB. Были рассмотрены различные обстоятельства, в том числе и коммерческого свойства и экономического.

**Рыкалин В.И.:** Наверное, надо было об этом сказать.

**Немченко И.Б.:** Да, согласен, Владимир Иванович. Согласен. Я сейчас поясню то, что не сказал в диссертации

И пятый вопрос, откуда и какой мы брали о-карборан. Выполняя эту работу, мы сотрудничали с Институтом элементоорганических соединений имени Несмеянова Российской Академии Наук, с профессором Владимиром Иосифовичем Брегадзе, он нам предоставил небольшие количества высокочищенного о-карборана для использования в этих целях.

**Рыкалин В.И.:** Что интересно, Вы назвали цены 800 000 за килограмм, сейчас больше миллиона, к полутора приближается. И, что интересно, качество очень невысокое. Нам пришлось исследовать характеристики самого о-карборана и два изготовителя, Дзержинск и этот институт, в случае Дзержинска – он просто фиолетовый

**Немченко И.Б.:** Есть еще институт элементоорганических соединений, бывший отраслевой, Минхимпромский, ГНИИХТЭОС, Государственный научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений. Два: один академический, другой отраслевой.

**Рыкалин В.И.:** В общем, качество очень недостаточное для того что бы получать требования, характеристики.

**Немченко И.Б.:** Я, по-моему, на все вопросы ответил.

**Малахов А.И.:** Спасибо, Владимир Иванович. Тогда переходим к следующему официальному оппоненту. Леонид Александрович Кузьмичев, доктор физ.-мат. наук, заведующий лабораторией Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В. Скобельцина. МГУ им. Ломоносова.

**Кузьмичев Л.А.:** Добрый день! Я, с вашего разрешения, тоже не буду зачитывать полностью отзыв и на отдельных пунктах остановлюсь и начну с пунктов, которые диссертант вынес на защиту. Первые два пункта: это разработан жидкий сцинтиллятор «стандартного состава» для DAYA BAY и сцинтиллятор, содержащий гадолиний. Вот если ввести термин «минимальный достаточный уровень материалов диссертации для защиты», мне кажется, вот эти два пункта превышают минимальный достаточный уровень и, в принципе, можно было остановиться. Но Игорь Борисович еще добавил 9 пунктов, выносимые на защиту, есть сцинтилляторы, и борсодержащие сцинтилляторы, и сцинтилляторы, содержащие неодим для экспериментов по поиску двойного бета-распада, это, конечно, делает диссертацию весьма высокого уровня. По первым двум пунктам на вопрос председателя о стабильности этих сцинтилляторов, мониторингирование показывает, что примерно ухудшается световой выход на полтора

процента в год. На мой взгляд получились уникальные по стабильности сцинтилляторы, которые найдут широкое применение. Сцинтилляторы, которые также разработал Игорь Борисович, содержащие бор, которые позволяют регистрировать нейтроны найдут применение не только в нейтринной физике, но и в физике космических лучей, где требуется отделить адронную компоненту от электромагнитной, и, насколько я знаю, они используются в эксперименте НЕВОД.

Сразу скажу, что если смотреть первые два пункта, то вопросы о достоверности и актуальности и новизне отпадают сразу. Сцинтилляторы нашли применение в крупнейших экспериментах нейтринной физики, показали хорошую работу в течение длительного времени и оправдали все затраты по их созданию. В заключении перейдем к замечаниям.

Так получилось, что ряд замечаний, которые я нашел, нашли и раньше. (в отзывах ведущей организации и первого официального оппонента).

Но первое замечание. Мне показалось, что первая глава, которая представляет подробный обзор сцинтилляционного метода регистрации великовата. Она содержит 50 страниц, это, конечно, очень интересная глава для учебного пособия, но для диссертации, которая всего 200 страниц, может быть, это великовато.

Второе замечание – это забавные опечатки. Рагаван именуется Рагхаваном, открыватель нейтрино Райнес – Рейнесом, увиолевое стекло – виолевым несколько раз называется.

Третий пункт, который я в качестве замечания нашел. Не совсем понятен подход автора к измерению прозрачности (фактически длины волны поглощения света) сцинтиллятора. Результаты измерений приведены в таблице 2.3. Автор для получения результатов использует понятие оптической плотности – десятичного логарифма отношения потока света до и после прохождения слоя сцинтиллятора. А почему нельзя сразу взять натуральный логарифм отношения потоков света и получить искомую величину прозрачности так и не объясняется.

Теперь четвертое. На многих графиках, это замечание уже было сделано, не указаны ошибки, например, на 2.16 – нет, на 2.19 – есть, и далее большой список графиков, где нет экспериментальных ошибок: 1.18, 1.19, 1.20, 3.8, 3.10.

И последний вопрос, он уже здесь упоминался. Про тепловые нейтроны с энергией меньше 0,4 эВ. Это не совсем тепловые, это 400 градусов. И не совсем понятно, насколько, корректно ли использовать такие нейтроны с такой температурой для оценки эффективности регистрации действительно тепловых нейтронов.

Но приведенные выше замечания, конечно, не снижают высокого уровня диссертации.

Диссертация Игоря Борисовича Немченка является законченной научно-квалификационной работой, в которой предложена совокупность важных для развития нейтринной физики научно-технических решений. По объему полученных результатов, их новизне, обоснованности, достоверности и практической значимости диссертация полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор Немченко Игорь Борисович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.01. – «Приборы и методы экспериментальной физики». Спасибо.

**Малахов А.И. :** Спасибо, Леонид Александрович. Давайте отвечать на вопросы, на часть уже было отвечено.

**Немченко И.Б.:** Леонид Александрович, позвольте Вас немного поправить: не 200, а 212 страниц диссертации и, всё-таки, я считаю этот обзор неотъемлемой частью, которая позволила мне сделать вывод о новизне, о своем месте в этом направлении исследований, я искусственно ее не раздувал, первую главу.

С опечатками, я, безусловно, согласен.

По измерению прозрачности. Для измерения прозрачности мы использовали спектрофотометр. Спектрофотометр сразу выдает результаты в виде десятичного логарифма, т.е. в виде оптической плотности, нам не имело смысла переводить обратно в натуральный логарифм.

По поводу ошибок, Леонид Александрович, я уже отвечал. На некоторых из них этих ошибок нет, потому что в первоисточниках нет. А некоторыми я не хотел загромождать рисунки, тем более, что ранее они были указаны.

По поводу тепловых нейтронов, почему использовались ниже 0,4 эВ я объяснил.

Что касается термина, конечно, не мне термины придумывать, поэтому, я понимаю, что тепловые нейтроны – нейтроны, находящиеся в равновесии с окружающей средой, 300К, распределение Максвелла, я прекрасно отдаю себе отчет. Но я нашел такую книжку «Нейтроны». И вопрос просто терминологический. Классик. Тепловыми он называет нейтроны от пяти тысячных до половины эВ. Вопрос терминологический. Мы понимаем, о чем идет речь, но называть можно иногда по-разному

**Малахов А.И.:** Спасибо. Сейчас самое интересное – общая дискуссия, в которой принимают все, не только члены совета, все присутствующие. Кто что хочет сказать, пожалуйста, имеет возможность это сделать. Пожалуйста, профессор Ужинский. Вам слово.

**Ужинский В.В.**

У меня не особо серьезное замечание, но все-таки я его хочу сказать. В диссертации имеется 7 глава, в автореферате она тоже упоминается, одной фразой, и все. Всего где-то 8 страниц, но дело в том, что на этих 8 страницах видно, какая шла работа: колбочки, две колбочки, два горлышка, ректификационная колонна, какой идет нагрев (10 часов) и т.д. От таких лабораторных исследований в РХЛ ЛЯП потом переходят к 800 или 2400 тонн сцинтилляторов. Вот этот переход сделан. Все-таки мне как неспециалисту вся работа понравилась. Она короткая и ясная. В целом, выглядит всё очень солидно, очень хорошо сделано, так что соискатель заслуживает звания доктора технических наук.

**Малахов А.И.:** Спасибо. Еще какие-то есть высказывания? Пожалуйста, представьтесь.

**Лубсандоржиев Б.К.:** Лубсандоржиев Баярто Константинович, Институт ядерных исследований РАН.

Я имел отношение к написанию отзыва от ведущей организации. Там всё изложено по отношению к диссертации, но я хотел сказать несколько слов об Игоре Борисовиче. Игорь Борисович – человек очень известный в нашем сообществе, я бы вообще назвал его личностью легендарной, он настоящий мировой эксперт в этой области. То, что эксперимент DAYA BAY суперуспешный эксперимент, в котором

выполнены наиболее прецизионные измерения одного из параметров осцилляций нейтрино, я думаю, что одну из ключевых ролей сыграл Игорь Борисович. Я говорю от имени конкурирующего эксперимента DOUBLE CHOOZ. Немалая доля успеха принадлежит по праву Игорю Борисовичу. Еще раз хочу сказать, что Игорь Борисович – мировой эксперт в этой области и работа, возвращаясь к диссертации, замечательная. Кроме всего прочего, работа написана замечательным русским языком, это очень редко сейчас встречается. Я, действительно, не сумел найти ни одной опечатки, не говоря об ошибках. Я считаю, что это замечательная работа. Я хочу поздравить диссертационный совет, что здесь защищается такая замечательная работа и хотел призвать диссертационный совет поддержать.

**Малахов А.И.:** Спасибо. Кто еще, что хочет сказать, пожалуйста. Мадигожин.

**Мадигожин Д.Т.:** Я, безусловно, поддерживаю защищающегося диссертанта. Возможно, из-за моего замедленного мыслительного процесса, немного запоздалый вопрос. Частный случай обсуждения. В картинках по разрешению я понял, что разрешение изготовленных изделий, блоков, одно от другого может отличаться друг от друга на 20-25%. После этого делается отбор тех, у которых разрешение не ниже какого-то. Т.е. сам процесс изготовления дает, как я понимаю, достаточно большой разброс. У меня вопрос. Может не к диссертанту, а к экспертам. Этот разброс связан преимущественно с чем? С элементным составом, с полимерным составом, нужно понимать, что там смесь из массы полимеров разной длины или с какой-то неоднородностью образца, то есть в разных местах образца разные его свойства. Я бы просил кого-нибудь объяснить. Я с точки зрения потребителя смотрю, как у меня работает, в конечном счете, детектор и хотелось бы понимать, в какую сторону запрашивать изготовителей, чтобы разброс этих характеристик, этого разрешения был наименьшим. Отчего? Элементный состав? Полимерный состав?

**Немченко И.Б.:** Пластмассовые сцинтилляторы – достаточно сложная система, производится химическими методами. При химическом производстве разброс характеристик  $\pm 5$  или 10% – достаточно нормальное значение. Главное, определить для себя какие  $\pm 10\%$  подходят для какого-то использования. Пластмассовые сцинтилляторы в процессе производства получаются не вполне однородными по всему своему объему. Например, полимеризация сопровождается кипением, интенсивным перемешиванием реагирующей массы, одновременно с этим происходит возрастание вязкости. В какой-то момент восходящие и нисходящие потоки из-за возрастания вязкости достигают такого ее значения, что просто замораживаются, и жидкий полимер или форполимер (частично заполимеризованная масса) превращается уже в настоящий полимер. При этом эти области восходящих и нисходящих потоков, то есть, области с несколько разными температурами, а, следовательно, с разными плотностями. И в результате такого замораживания оказываются областями с несколько разными показателями преломления, в итоге наблюдаются (мы все знаем такое оптическое явление) свиль. Это наблюдается в виде искажений, если через него или обычное стекло смотреть. В общем, это дело технолога, наше дело, разбираться и подбирать условия, для того, чтобы разброс минимизировать. Такой разброс в самых общих словах можно назвать связанным с каким-то отклонением от оптимальной технологии, но при таком производстве сплошь и рядом трудно визуализировать, понять, в чем же отклонения состоят: некоторые отличия сырья, некоторые отличия, может, атмосферных условий.

Этот разброс связан с очень большим количеством неопределенностей, до сих пор неизвестных до самого конца: температурный режим, как соблюдается, как выполняется, как воспроизводится от полимеризации к полимеризации, обуславливая неоднородность блока к блоку, зоны, в которых образовались свили, случайно попали какие-то примеси, нарушающие прозрачность, образовавшиеся микропузырьки, которые не успели выйти во время кипения за счет нарастания вязкости – много параметров. Мы стараемся делать так, чтобы избегать всех этих неопределенностей, но не всегда получается.

**Тяпкин И.А.:** Можно добавить? Мы сейчас этим занимались, 10 миллионов пластин, органический сцинтиллятор с РОРОм. Стоят два станка. Материал один. Вот он про материал говорил. Даже, если один материал. Два станка. Разброс световыходов на каждом станке 5%, не больше, образец от образца, а между станками 10%. Технологи голову свихнули, не знают от чего это. Мешается одинаково. Где-то именно процесс полимеризации. Нужно быть к этому готовым, видимо проблема в процессе полимеризации.

**Мадигожин Д.Т.:** Может кому-то поизучать и защитить несколько докторских диссертаций по этим вопросам?

**Тяпкин И.А.:** Это не физика. Это очень трудно.

**Рыкалин В.И.:** Игорь Борисович, а у Вас в Вашем полимеризаторе мешалка есть?

**Немченко И.Б.:** Да, у нас есть мешалка, которая стоит под полимеризующимися блоками и перемешивает снизу. Полимеризатор представляет из себя ванну, в которую при помощи тали установлены блоки, в которых залит мономер. Под талью, под блоками, вращаясь в горизонтальной плоскости, стоит мешалка.

**Рыкалин В.И.:** А как она взбудораживает мономер?

**Немченко И.Б.:** Не мономер, нет. Мы не мономер, мы теплоноситель перемешиваем для создания равномерности теплового поля.

**Рыкалин В.И.:** В промышленных полимеризаторах, когда делают гранулы при перемешивании происходит внутри.

**Немченко И.Б.:** Это при производстве гранул.

**Рыкалин В.И.:** Там мешалка внутри и это принципиально. Потому, что там однородность создается.

**Немченко И.Б.:** Это при получении гранул.

**Рыкалин В.И.:** Это тоже самое. Дело в том, что реакция полимеризации экзотермическая. Это цепная реакция. Когда возникает очаг какой-то реакции увеличенный, то действительно получается неоднородность. Здесь, по-моему, принципиально, и нас и в вашем случае отсутствие мешалки внутри.

**Немченко И.Б.:** Нет, это технически невозможно. Эта мешалка потом застрянет в полимере, и думаю, что перемешивание при помощи мешалки приведет к еще большему увеличению количеству свилей.

**Мадигожин Д.Т.:** А ультразвук?

**Немченко И.Б.:** Ультразвук – это да. Об ультразвуке стоит подумать.

**Малахов А.И.:** Так, техническое решение еще кто-то хочет предложить? По-моему, мы уже готовы к тому, что можно определиться, как уже можно голосовать. Действительно, диссертация очень хорошая. Интерес большой и актуальность очевидна.

Наша дискуссия показала, что сцинтилляторы во всех современных физических установках. Ну и приятно то, что результаты, изложенные в диссертации, они не просто имеют какое-то теоретическое значение, а нашли практическое применение в ряде установок. Это всегда хорошо. Дальше у нас последнее слово. Заключительное. Слово Игорю Борисовичу.

**Немченко И.Б.:** Уважаемые Александр Иванович, уважаемые члены совета! Мне бы, конечно, хотелось высказать свою благодарность, в первую очередь, вам, совету, председателю совета, оппонентам, ведущей организации, коллегам, которые прислали отзывы на мою диссертацию. Я готовился, и чтобы никого не пропустить подготовил себе текст, который я, если позволите, очень быстро прочту. Конечно я могу кого-то забыть, мне очень жаль, но многие люди, которые здесь будут названы сегодня не смогли прийти на защиту, потому что в ЛЯПовском совете из нашего отдела сегодня двое защищают кандидатские диссертации. Понятно, что все мои коллеги, кто-то из них является членом совета, кто-то тоже болельщиком. Они сейчас не смогли прийти. Понятно, или в этом же здании подняться на третий этаж в конференц-зал, или прийти на площадку ЛФВЭ. Некоторые, правда, присутствуют, но не все.

В первую очередь хотел бы поблагодарить доктора физико-математических наук, профессора В.Б. Бруданина за многолетнюю поддержку (финансовую, организационную, моральную), без которой выполнение диссертационного исследования было бы невозможным.

Очень хочется отметить очень интересные и полезные дискуссии с кандидатом физико-математических наук А.А. Смольниковым, которые в значительной мере повлияли на выбор направления исследований, описанных в работе.

Я глубоко признателен члену-корреспонденту РАН, профессору, доктору физико-математических наук В.Л. Аксёнову и профессору, доктору физико-математических наук А.Г. Ольшевскому, прочитавшим первый вариант автореферата диссертации и оказавшим неоценимую помощь с выбором научной специальности. Я очень благодарен докторам физико-математических наук В.Г. Егорову, Ю.Б. Гурову и кандидату физико-математических наук О.И. Кочетову, прочитавшим первую версию текста диссертации и высказавшим ряд ценнейших замечаний по поводу корректности формулировок. Неоценимую помощь в исследовании сцинтилляторов, описанных в работе, оказали коллеги по РХЛ кандидат физико-математических наук О.И. Кочетов, В.В. Тимкин, кандидат физико-математических наук А.А. Смольников и сотрудник Отделения ядерной физики ЛНФ кандидат физико-математических наук Н.А. Гундорин. Я очень благодарен коллегам по коллаборациям, в которых я работал, в коллаборации NEMO/SUPERNEMO, в первую очередь, профессорам С. Жулиану и Ф. Пикмалю за многолетнюю совместную творческую и интересную работу.

Не менее творческим оказалось и сотрудничество в коллаборации DAYA BAY, обогатившее меня новыми знаниями, возглавляемой профессорами И. Вангом и К.-Б. Люком. Я благодарен профессору, доктору физико-математических наук А.Г. Ольшевскому за привлечение меня в коллаборацию и за многолетнюю поддержку моего участия в ней.

Я не могу не поблагодарить ректора Государственного университета «Дубна». Дмитрий Владимирович вышел. Я ведь по основному месту работаю в Университете, я ученый секретарь университета. Я благодарен Дмитрию Владимировичу за такую

организацию работы, при которой на хлопотной должности ученого секретаря, я смог дописать диссертацию. Я благодарен Ю.А. Крюкову, проректору по научной работе за дружеское и постоянное подталкивание меня к сегодняшнему дню.

Я выражаю благодарность всем сотрудникам группы органических сцинтилляционных детекторов и всем сотрудникам нашего отдела ядерной спектроскопии и радиохимии за царящую в нем творческую обстановку.

Я благодарен своей семье, потому что мы, научные сотрудники, считаем, что мы находимся на фронте, но нам всем нужен тыл, нам всем нужна поддержка, нам нужно теплое слово. Поэтому я за все благодарен жене Ирине, я за все благодарен моей дочери Дарье, которой сейчас здесь нет, но я знаю, что она сейчас переживает и ждет моего звонка.

Ну, и, конечно, коллеги, простите за сентиментальность, я не могу не вспомнить наших с Ириной родителей, которые очень долго ждали сегодняшнего дня. К сожалению, не дождались.

Большое спасибо!

**Малахов А.И.:** Спасибо, Игорь Борисович. Сейчас мы должны избрать счетную комиссию. Хотел попросить всех членов совета посмотреть тем временем на заключение совета, которое мы должны будем принять. Если есть замечания, мы, естественно, скажем. А счетную комиссию, мы сейчас не можем использовать принцип опоздавших, потому, что сегодня никто не опоздал. Поэтому мы предлагаем согласиться с таким предложением. Избрать в счетную комиссию Мадигожина Дмитрия, Капишина Михаила и Арефьева. Нет возражений? Кто за? Против? Воздержавшиеся? Счетная комиссия готова приступить к работе. Валентин Александрович, может объявите, как нужно голосовать?

**Арефьев В.А.:** Напоминаю членам совета, что правильное заполнение бюллетеня состоит в вычеркивании ненужного слова. Да или нет.

**Малахов А.И.:** Посчитали? Так, внимание всем, пожалуйста. Так, кто у вас председатель?

**Капишин М.Н.:** Меня выбрали.

**Малахов А.И.:** Михаил Николаевич, пожалуйста

**Капишин М.Н.:** Протокол номер 19-06, заседания счетной комиссии диссертационного совета 720.001.02 от 27 июня 2019 года. Состав избранной комиссии: Капишин, Мадигожин, Арефьев. Комиссия создана для подсчета голосов при тайном голосовании по диссертации Немченка Игоря Борисовича на соискание ученой степени доктора технических наук. Состав диссертационного совета утвержден в количестве 31 человека. В состав совета дополнительно введены (человек) – «нет». Присутствовало на заседании 25 членов совета, в том числе докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации – 6, розданных бюллетеней – 25, осталось не розданных бюллетеней – 6, оказалось в урне бюллетеней – 25. Результаты голосования по вопросу о присуждении ученой степени доктора технических наук Немченку Игорю Борисовичу «За» – 25, «Против» – нет, «Недействительных бюллетеней» – нет.

**Малахов А.И.:** Кто готов утвердить протокол? Так, пожалуйста. Против есть? Воздержавшиеся? Принято единогласно. Ну, подождите, еще рано хлопать. Значит, надо принять заключение совета, как ВАК нам рекомендует, поэтому просьба, у кого замечания к розданным проектам есть?

**Строковский Е.А.:** Мелкие опечатки есть. Пункт пятый, «кадмийсодержащие».

**Малахов А.И.:** Так, мелкие, пятый пункт. Так, надо поправить. Вы там отметили у себя? Тогда, кто за то, чтобы принять этот документ (заключение совета)? Против есть? Воздержавшихся? Принимается.

Поздравления. Желаем, чтобы все прошло дальше гладко через ВАК при получении соответствующих документов.

Председатель диссертационного совета,  
доктор физ-мат. наук, профессор

Малахов А.И.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат физ-мат. наук



Арефьев В.А.

« 16 » июля 2019 года