

СИСТЕМА СБОРА СВЕТА С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРОСМЕЩАЮЩИХ ПЛАСТИН ДЛЯ ВНЕШНЕГО ДЕТЕКТОРА ПРОЕКТА HYPER-KAMIOKANDE

А. О. Измайлов^{1,}, Н. В. Ершов¹, Ю. Г. Куденко^{1,2,3},
О. В. Минеев¹, А. Н. Хотянецв¹*

¹ Институт ядерных исследований РАН, Москва

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

³ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

В создающемся водном черенковском детекторе нового поколения Hyper-Kamiokande внешний детектор играет ключевую роль для учета фоновых процессов. Для увеличения эффективности светосбора применяется модуль ФЭУ + спектросмещающая пластина. В ИЯИ РАН выполнены разработки пластин на основе ПММА: выбор химического состава, геометрии пластин, измерения параметров элемента ФЭУ + пластины с использованием LED-диодов и непосредственно с черенковским светом. Представлены результаты проведенных исследований.

The Outer Detector (OD) of the next-generation water Cherenkov project Hyper-Kamiokande being created plays a crucial role in tagging and further reduction of the backgrounds. A PMT + WLS plate module is used as the photon detector element to increase the overall light collection efficiency. The R&D work on the WLS plates was carried out at the INR RAS laboratory: an optimisation of the chemical composition and the geometry of the plates, and the performance of the PMT + WLS plate modules was studied with a LED source as well as with the Cherenkov light. The results are summarised.

PACS: 29.40.Ka; 85.60.Gz

ДЕТЕКТОР HYPER-KAMIOKANDE

Hyper-Kamiokande (Япония) [1] — это водный черенковский детектор нового поколения, работы над созданием которого ведутся в настоящее время участниками международной коллаборации. Физическая программа широка: исследование ускорительных, солнечных, атмосферных, космических нейтрино, а также поиск распада протона. Детектор представляет собой цилиндрическую емкость диаметром 68 м и высотой 71 м,

* E-mail: izmaylov@inr.ru

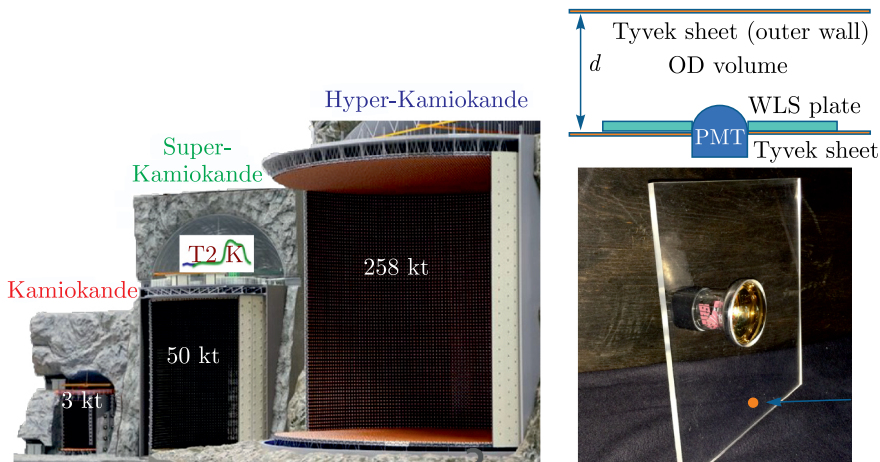


Рис. 1. Слева: детекторы «серии» Kamiokande. Справа: схема модуля ФЭУ + пластина WLS для внешнего детектора OD

общая масса воды — 258 кт. Используется вода высокой степени очистки, длина ослабления — до 100 м для видимого света. Эффективный объем примерно на порядок превзойдет объем детектора-предшественника Super-Kamiokande [2] (рис. 1).

Hyper-Kamiokande оптически разделен на две области: внутренний (Inner Detector, ID) и внешний (Outer Detector, OD) детекторы. Во внутреннем детекторе массой 217 кт для регистрации светового сигнала будет использовано 20000 фотоумножителей ФЭУ. Тип фотоумножителей — Hamamatsu R12860 (Япония), их диаметр 50 см. Эти приборы обладают большей ($\sim +50\%$ по сравнению с R3600 в Super-Kamiokande) квантовой эффективностью, примерно в два раза лучшим зарядовым и временным разрешением, что позволит компенсировать меньший общий процент фотокатодного покрытия (20% против 40% в Super-Kamiokande), а также они обладают меньшим уровнем радиоактивных примесей. В дополнение к ФЭУ диаметром 50 см также будут применены модульные приборы, состоящие из 19 отдельных ФЭУ диаметром 8 см в общем корпусе, такие счетчики позволят получать дополнительную информацию о направлении фотонов. Между активными элементами располагается светопоглощающий черный материал.

Световые сигналы в области внешнего детектора регистрируются ФЭУ, расположенными позади счетчиков ID и направленными наружу. Размер слоя OD составляет 2 м в верхней и нижней частях детектора и 1 м по сторонам. Основная задача OD — регистрация фоновых событий снаружи внутреннего детектора, таких как треки космических мюонов, как попадающие в ID, так и останавливающиеся ранее, последние могут приводить к фону от ядерного расщепления («spallation backgrounds»).

Важна также регистрация активности из внутренней части для определения треков, полностью содержащихся в ID. Hyper-Kamiokande расположен в подземной шахте, защита — примерно 1750 м водного эквивалента. Меньшая толщина породы и большие размеры приводят к увеличенному потоку космических мюонов по сравнению с Super-Kamiokande (в ~ 15 раз) — около 45 Гц ($4 \cdot 10^6$ мюонов/день). Активная область детектора также меньше, чем в Super-Kamiokande. Во внешнем детекторе будет использовано примерно 3600 ФЭУ диаметром 8 см. Важной задачей является повышение эффективности регистрации светового сигнала.

СИСТЕМА СБОРА СВЕТА ВО ВНЕШНЕМ ДЕТЕКТОРЕ HYPER-KAMIOKANDE

Общая концепция регистрирующего модуля OD состоит в использовании ФЭУ, размещенного в центре спектросмещающей (WLS) пластины (см. рис. 1). Такая структура была разработана и применена в черенковских водных детекторах IMB-2/3 [3] (IMB-2 — впервые реализована) и Super-Kamiokande [2] для дополнительного увеличения светосбора и компенсации относительно небольшого числа используемых ФЭУ.

Пластины поглощают черенковский свет от заряженных частиц в ультрафиолетовом диапазоне и переизлучают его в видимой области (400–600 нм), в которой ФЭУ обладают высокой чувствительностью. Переизлученные фотоны задерживаются пластиной за счет эффекта полного внутреннего отражения и могут быть зарегистрированы ФЭУ, при этом часть «утекших» фотонов также может быть зарегистрирована за счет их отражения от стен детектора. Стены детектора OD, в свою очередь, покрыты диффузным отражателем, материалом Tyvek. Требования, предъявляемые к модулям и детектору OD, следующие: подавление фона от космических частиц на уровне 10^4 , темновой сигнал не выше 1 кГц (при пороге в 0,25 фотоэлектрон, ф. э.), пространственное разрешение ~ 4 м для определения точек входа и выхода частиц, тепловая мощность менее 1 Вт на канал, низкий уровень радиоактивности — < 1 мБк, ФЭУ, защита от воды и способность выдержать давление до 10 бар, высокая долговременная стабильность элементов для работы в течение 20 лет набора статистики. Основная опция выбора ФЭУ для OD — модель Hamamatsu R14374, также изучается и используется в измерениях ФЭУ NNT 2031 (Китай). Оба прибора имеют внешний диаметр 80 мм.

СПЕКТРОСМЕЩАЮЩИЕ WLS-ПЛАСТИНЫ: ВЫБОР ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

Исследовательская работа по оптимизации параметров пластин проводится в ИЯИ РАН совместно с АО НИИ полимеров (Дзержинск). Пластины на основе оргстекла (ПММА) со спектросмещающими добавками изготавливаются в НИИ полимеров методом радикальной полимеризации. Две большие плоскости пластин не требуют дополнительной

обработки после изготовления. Пластины конечного размера, а также центральные отверстия для размещения ФЭУ вырезаются в ИЯИ РАН с помощью CO₂-лазера, грани пластин дополнительно полируются на станке Vermaq с алмазными резцами для обработки ПММА.

В НИИ полимеров были изготовлены образцы пластин с различными добавками с различными их концентрациями, для измерений также использовалась «коммерческая» пластина Eljen (США) EJ286 (максимум поглощения 355 нм, излучения — 425 нм):

- BBQ: область поглощения — 250–460 нм, область излучения — 420–640 нм (пик на ~ 510 нм); смещает сигнал в коротковолновой и видимой области в область зеленого света и далее;

- bis-MSB: область поглощения — 300–400 нм (пик на 350 нм), область излучения — 380–530 нм (максимум на 400–460 нм); по характеристикам схож с РОРОР, но выше стоимость, несколько легче растворяется в ПММА, пластины с концентрацией 50 мг/л в Super-Kamiokande и IMB-2/3;

- РОРОР: область поглощения — 250–390 нм (пик на 360 нм), область излучения — 380–510 нм (максимум на 390–450 нм); широко используется в пластиковых сцинтилляционных детекторах на основе полистирола и поливинилтолуола (ПВТ), исследования в «НИИ полимеров» показали, что полные времена полимеризации при использовании bis-MSB и РОРОР практически совпадают;

- РРО: область поглощения — 240–310 нм (пик на 280 нм), область излучения — 320–420 нм (максимум на 340–380 нм); эффективно поглощает в коротковолновой области, может использоваться как первичная добавка в комбинации с РОРОР/bis-MSB для эффективного захвата и переизлучения света в видимую область.

Модели ФЭУ для OD обладают максимальной эффективностью в диапазоне около 350–450 нм (до ~ 30 % на 400 нм).

Исследования пластин проводились с использованием субнаносекундных LED-источников PicoQuant Co. Тесты выполнялись в светоизолированном стенде. Свет от источника направлялся на одну из широких граней пластины через 10-мм коллиматор. Большинство фотонов источника поглощаются на первых 1–2 мм и далее изотропно переизлучаются.

Для пластин с разным химическим составом были измерены значения световыхода для различных длин волн возбуждающего сигнала — применялись диоды с длинами волн 265, 315, 380 нм. Затем определялась следующая величина — критерий оптимизации (FoM, Figure of Merit):

$$\text{FoM} = 0,45\text{RLY}_{250-300} + 0,32\text{RLY}_{300-350} + 0,23\text{RLY}_{350-400},$$

где RLY (Relative Light Yield) — относительный световыход, $\text{RLY} = N_{\text{p.e}}/N_{\text{ph}} \cdot 10^3$, $N_{\text{p.e}}$ — измеренный сигнал с ФЭУ, расположенного в центре пластины, N_{ph} — число фотонов от LED (калибровка выполнялась прямой засветкой ФЭУ. Использовалась оценка уширения пика сигнала для учета нелинейности отклика ФЭУ при высоких интенсив-

Значения относительного световыхода для различных образцов пластин при разных длинах волн LED-источника. Последняя колонка — значения критерия оптимизации. Размер пластин: $40 \times 20 \times 1$ см. Измерения на воздухе и без отражателей

Добавка	265 нм	315 нм	380 нм	FoM
BBQ50	0,85	3,20	6,53	2,91
BBQ100	1,51	3,54	6,63	3,34
Bis-MSB50	0,21	4,52	9,87	3,81
Bis-MSB100	0,41	4,45	9,65	3,83
POPOP100	1,60	4,39	9,81	4,38
POPOP200	1,60	5,20	9,82	4,64
POPOP400	1,01	4,22	8,69	3,80
POPOP100/PPO10000	6,04	3,77	8,54	5,89
POPOP800/PPO5000	3,59	3,54	8,07	4,50
EJ286	0,51	2,95	9,41	3,34

ностях засветки), а значения 0,45, 0,32 и 0,23 соответствуют долям черенковского спектра для определенных длин волн, диапазон 250–400 нм принят за 100 %. Сигнал ФЭУ измерялся для трех положений диода относительно центра пластины: на расстоянии 6, 12 и 18 см, полученные значения усреднялись. Значения критерия оптимизации для различных прототипов пластин представлены в таблице, цифры после названий добавок означают концентрацию в мг/л.

Согласно полученным результатам, важную роль играет эффективность захвата света в коротковолновой области, соответствующей максимуму черенковского спектра. В этой области оптимально использование добавки PPO. В качестве основной опции выбрана комбинация POPOP + PPO, т. е. «двухкомпонентная» пластина. Хороший результат также показали пластины с одной добавкой POPOP 100–200 мг/л.

Проводились измерения световыхода в воздушной и водной средах, для пластин без отражателей световыход в воде снижается примерно в 2–3 раза на расстоянии 20–35 см от центра, что связано с изменением показателя преломления среды.

Проведены исследования пластин с различной концентрацией добавок. Для PPO оптимальная концентрация составила 3 г/л, в области 3–7 г/л свойства практически не меняются, а большая концентрация приводит к уменьшению световыхода. Для POPOP была выбрана концентрация 50 мг/л, которая эффективна в области более коротких волн 250–320 нм. Комбинация PPO и bis-MSB используется в жидких сцинтилляторах нейтринных экспериментах. Базой служит ЛАБ или додекан и ФКЭ. Концентрации добавок обычно составляют O(10) мг/л bis-MSB и 2–7 г/л PPO (Daya Bay, RENO, Double Chooz, SNO+: например, работа [4] и приведенные в ней ссылки). Таким образом, оптимальная концентрация добавок для эффективной регистрации пластинами

из ПММА спектра черенковского излучения в воде — РОРОР 50 мг/л и РРО 3 г/л.

ВЫБОР ГЕОМЕТРИИ И РАЗМЕРОВ ПЛАСТИН

Оптимальный размер пластин был установлен на основе моделирования детектора — 30×30 см. Пластины большего размера не дают прироста в эффективности и увеличивают стоимость материала: WLS-пластины захватывают свет в УФ-диапазоне и потом переизлучают в область высокой эффективности ФЭУ, но для видимых фотонов являются по сути дополнительным поглотителем. Толщина пластин — 7 мм (оптимум — 6–10 мм), использовались измерения и результаты моделирования, учитывалась также стоимость материала. Моделирование также применялось для выбора формы пластин. Рассматривались прямоугольные, квадратные, треугольные и круглые варианты. Форма оказывает влияние на эффективность концентрации фотонов на ФЭУ. Выбрана квадратная форма. Измерения выполнялись для подбора формы и размера отверстия для размещения 80-мм ФЭУ. Рассматривалось цилиндрическое отверстие, полусферическое и открытый конус. Здесь важен баланс между эффективностью сбора фотоумножителем прямого и переизлученного пластиной черенковского света. Оптимальным оказалось цилиндрическое отверстие диаметром 78 мм, что согласуется с размером фотокатода — $\varnothing = 72$ мм. Цилиндрическую форму также отличает простота изготовления, что важно при массовом производстве пластин. В рамках работ по ОД чувствительная область ФЭУ исследовалась путем сканирования фотоумножителя с помощью коллимированного ($\varnothing = 1,5$ мм) LED-источника. ФЭУ закреплялся на специальном стенде, а источник перемещался по направляющим, проводились измерения световыходов для центра ФЭУ и далее для различных азимутальных и полярных углов. В этих измерениях приборы Hamamatsu показали более высокую однородность фотокатода по сравнению с NNVT.

ВЫБОР ОТРАЖАТЕЛЯ

Проведены исследования различных отражателей на торцах пластины для дополнительного повышения эффективности светосбора: диффузный отражатель Tyvek, зеркальный отражатель — алюминизированная майларовая пленка, зеркальный отражатель — полимерная пленка 3M DF2000MA. Наибольший эффект — увеличение световыхода более чем в два раза по сравнению с Tyvek и на $\sim 50\%$ по сравнению с майларом — наблюдался для полимерной пленки 3M DF2000MA. Был рассмотрен вклад отражателя на задней стороне пластины, где планируется использовать Tyvek, эффект для переизлученного света составляет менее 10%. Наличие этого материала дополнительно служит для создания однородного отражающего покрытия в ОД, так как диффузным отражателем Tyvek будут покрыты стены внешнего детектора.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМНОВОГО СИГНАЛА

Исследование темнового сигнала модуля ФЭУ + WLS-пластина проводилось в светоизолированном термостате, использовались пластина ROPOR200 и пластина ROPOR800 + PPO5000. Для 13°C , ожидаемой температуры в OD, темновой сигнал составил ~ 400 Гц для «однокомпонентной» и ~ 800 Гц для «двухкомпонентной» пластины (рис. 2). Вклад в 800-Гц сигнал распределен между приведенными источниками:

- 200 Гц — темновой сигнал ФЭУ;
- 150 Гц — фотоны испускаются фотокатодом и далее отражаются обратно; оценка — измерение сигнала с ФЭУ с расположенным перед ним другим фотоумножителем, сравниваются измерения при включении и выключении последнего;

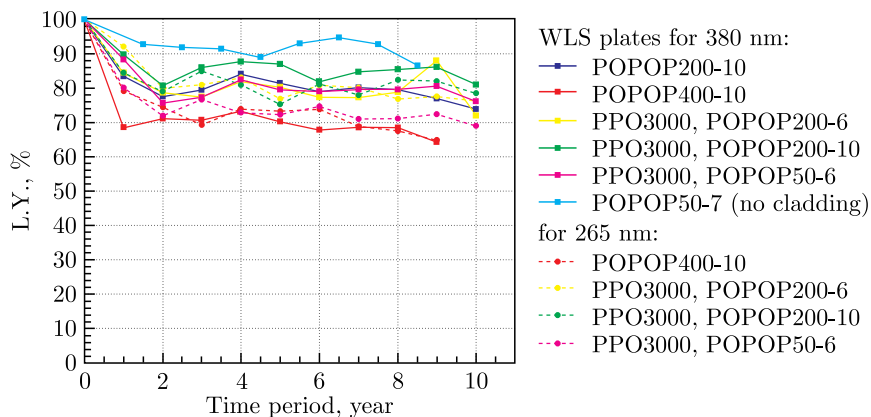
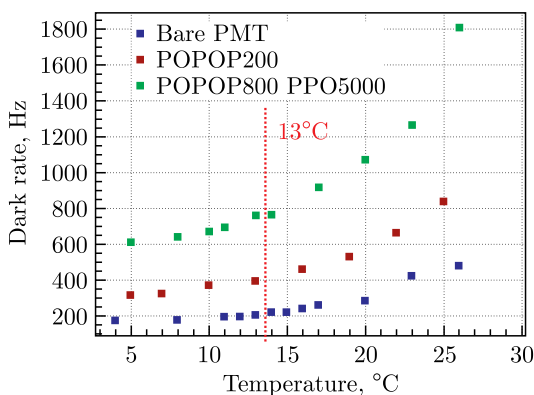


Рис. 2. Вверху: температурная зависимость темнового сигнала модуля ФЭУ + пластина (порог в 0,25 ф.э.). Внизу: изменение (эквивалент времени работы Нугер-Kamiokande) световыхода для различных пластин

- 200 Гц — сигнал от фона в лаборатории, практически исчезает при использовании свинцовой защиты; стоит отметить, что в случае с ROPOR + PPO пластина более чувствительна к фоновому сигналу;

- 250 Гц — дополнительный сигнал от пластины, связан с наличием PPO и/или большой концентрацией ROPOR, не исчезает в течение длительного времени (~ 3 мес) измерений; природа неясна, возможной причиной является тепловое движение молекул, сброс энергии, накопленной в оптических ловушках при нахождении пластины при дневном свете.

Таким образом, в условиях реального внешнего детектора темновой сигнал (порог 0,25 ф. э.) составит около 600 Гц для пластины с большими концентрациями ROPOR + PPO и менее ~ 400 Гц в случае с одной добавкой ROPOR200. Отметим, что базовые требования к уровню темнового сигнала в OD — < 1 кГц.

ИЗМЕРЕНИЕ УСКОРЕННОГО СТАРЕНИЯ

Эффекты старения изучались путем выдерживания пластин в водяной бане при высокой температуре. Эмпирическое правило Вант-Гоффа: скорость химических процессов возрастает в 2–4 раза при повышении температуры на каждые 10°C . Выбрана температура 59°C , важно не допустить нагревания до момента деградации свойств ПММА: верхний рабочий диапазон температур для изделий из ПММА — $70\text{--}80^\circ\text{C}$. Две недели в водяной бане соответствуют одному году работы детектора ($t = 13^\circ\text{C}$). Шесть пластин были помещены в стальной бокс, наполненный дистиллированной водой, и выдерживались в термостате. Каждые две недели проводились измерения световыхода модуля ФЭУ + пластина с использованием LED-источника, в качестве опорных служили измерения с пластиной, хранящейся при комнатной температуре.

Результаты представлены на рис. 2. Отмечено первоначальное падение (в среднем на $\sim 15\%$) световыхода. Вероятной причиной является деградация отражателя, образование пузырьков при быстром нагревании. Так, для пластины без отражателя падение заметно меньше, хотя тоже присутствует, что может быть связано с другими эффектами при начальном тепловом воздействии. При дальнейших измерениях набранная статистика соответствует примерно 10 годам работы OD, не было обнаружено ни разницы в старении пластин с различной концентрацией добавок, ни выраженных эффектов старения самих по себе, выходящих за флуктуации измерений. Отметим, что для пластиковых детекторов на основе полистирола скорость старения составляет $1\text{--}2\%$ /год [5].

ИЗМЕРЕНИЯ С ЧЕРЕНКОВСКИМ СВЕТОМ В ВОДЕ

В ИЯИ РАН создан стенд для исследования модулей ФЭУ + пластина WLS с черенковским светом в воде — Infant-K («детектор-младенец»-Kamiokande): бак из нержавеющей стали объемом около 110 л

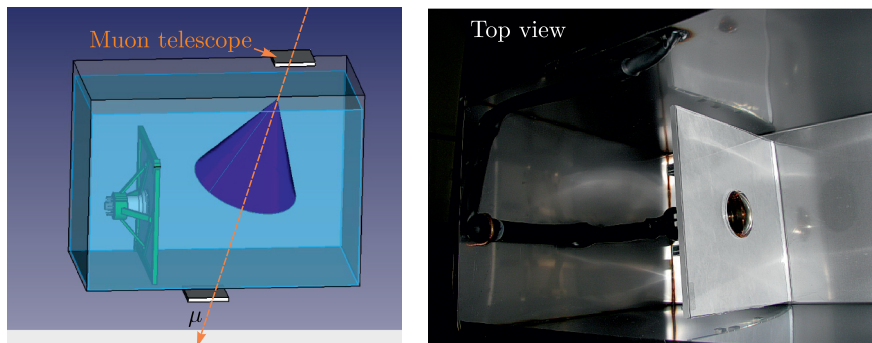


Рис. 3. Слева: схема экспериментального стенда Infant-K. Справа: вид сверху на открытый бак Infant-K перед заполнением водой, модуль ФЭУ + пластина WLS с полимерным отражателем по торцам и с диффузным отражателем Tyvek на внутренней стороне

(рис. 3). В установке используется дистиллированная вода, космический телескоп с двумя запускающими счетчиками задает конфигурацию регистрируемых частиц. Длина мюонного трека в детекторе ~ 45 см. Для измерения сигнала от прямого и отраженного черенковского света существует опция установки вдоль стенок панелей с отражателем (Tyvek) или поглотителем (черным материалом). Стенд используется для проведения измерений пластин с различными концентрациями добавок и фотоумножителей в «реальных условиях». Можно выделить некоторые результаты:

- использование WLS-пластины с зеркальным полимерным отражателем по торцам и отражателем Tyvek на задней стороне дает увеличение световыхода в более чем два раза по сравнению с «голым» ФЭУ;
- использование на торцах полимерного отражателя 3М DF2000МА дает прибавку в световыходе примерно в полтора раза;
- модули с ФЭУ Hamamatsu R14374 показывают световыход на $\sim 15\%$ выше, чем при использовании NNVТ 2031;
- пластины с двумя РОРОР50 + РОО3000 и одной РОРОР (50–200) добавками дают похожие, в пределах 5–10 %, значения световыхода.

Наличие и свойства отражателя определяют фактический спектр света, попадающего на ФЭУ. В ОД вклад прямого света существенно снижен вследствие малого размера и относительно небольшого количества используемых фотоумножителей. Коэффициент отражения Tyvek падает с $\sim 80\text{--}90\%$ при > 350 нм до $\sim 50\text{--}60\%$ при 250–300 нм. Отражения приводят к снижению доли коротковолновой компоненты, что уменьшает конечный эффект от добавки РРО. Ввиду несколько большего уровня темнового сигнала в случае включения в состав РРО исследуется вариант использования пластин с одной добавкой 50–200 мг/л РОРОР.

Для дальнейшего расширения возможностей измерений создается установка «следующего поколения», Toddler-K («малыш»-Kamiokande). Подготовлен бак для работы с 2 т воды, готовится система очистки, а также разрабатывается методика измерения оптических свойств воды. Установка позволит измерять несколько модулей, работать с длиной распространения света до 2 м, получать данные для прецизионной настройки моделирования отклика детектора Hyper-Kamiokande.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решается задача повышения эффективности светосбора во внешней части водного черенковского детектора нового поколения Hyper-Kamiokande. Используются ФЭУ диаметром 8 см, расположенные в отверстиях в центре спектросмещающих WLS-пластин размером $300 \times 300 \times 7$ мм каждая. Основным кандидат для выбора ФЭУ — Hamamatsu R14374, также рассматриваются NNT 2031. Пластины на основе ПММА разработаны в ИИЯ РАН совместно с АО «НИИ полимеров». Для эффективного захвата черенковского спектра оптимально использование добавок РОРОР 50 мг/л + РРО 3 г/л, в случае отраженного спектра похожие результаты дает и одна добавка РОРОР (50–200). В качестве отражателя на торцах пластины — полимерная пленка 3M DF2000MA, на внутренней стороне — Tyvek. Согласно измерениям в воде с черенковским светом, WLS-пластины позволяют в два раза увеличить световыход с ФЭУ. Начало массового производства примерно 4000 пластин для Hyper-Kamiokande запланировано на 2024 г.

Финансирование. Работа поддержана грантом РФФИ № 22-12-00358.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ajmi A. *et al.* (*Hyper-Kamiokande Collab.*). Status of the Hyper-Kamiokande Experiment // PoS. 2024. V. HQL2023. P. 098.
2. Fukuda Y. *et al.* (*Super-Kamiokande Collab.*). The Super-Kamiokande Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 501. P. 418–462.
3. Becker-Szendy R. *et al.* IMB-3: A Large Water Cherenkov Detector for Neutron Decay and Neutrino Interactions // Nucl. Instr. Meth. A. 1993. V. 324. P. 363–382.
4. Zheng Z., Zhu J., Luo X., Xu Y., Zhang Q., Zhang X., Bi Y., Zhang L. Preparation and Performance Study of a Novel Liquid Scintillator with Mixed Solvent as the Matrix // Nucl. Instr. Meth. A. 2017. V. 850. P. 12–17.
5. Abe K. *et al.* (*T2K Collab.*). Scintillator Ageing of the T2K Near Detectors from 2010 to 2021 // J. Instrum. 2022. V. 17, No. 10. P. P10028.