

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Промышленный детектор iDREAM для мониторинга режимов работы атомных реакторов нейтринным методом

М. Б. Громов^{1,a}, Г. А. Лукьянченко², Д. С. Марков², Г. Я. Новикова³,
Б. А. Обиняков^{2,b}, А. Ю. Оралбаев², М. Д. Скорохватов², С. В. Сухотин²,
А. С. Чепурнов^{4,c}, А. В. Этенко²

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра общей ядерной физики.
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».
Россия, 123182 Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

³Институт ядерных исследований РАН.
Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, д. 7а.

⁴Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына.
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

E-mail: ^agromov@physics.msu.ru, ^bobinyakov@gmail.com, ^cchas@rtm-cs.sinp.msu.ru

Статья поступила 22.01.2015, подписана в печать 09.02.2015.

Нейтринный метод мониторинга режимов работы атомных реакторов был предложен и подтвержден экспериментально в 1980–1990-х гг. учеными Курчатовского института. Достижения в области экспериментальной техники детектирования антинейтрино, ставшие доступными за прошедшее время, позволили перейти к проектам, направленным на внедрение методик, применяемых в фундаментальных исследованиях, в промышленную ядерную энергетику. В статье описан текущий статус создания опытного образца промышленного детектора iDREAM (industrial Detector for REactor Antineutrino Monitoring). Детектор представляет собой сцинтилляционный спектрометр на основе жидкого органического сцинтиллятора с чувствительным объемом 1 м³ с учетом опыта создания наиболее изученных детекторов реакторных антинейтрино этого типа.

Ключевые слова: физика нейтрино, детектирование антинейтрино, жидкий органический сцинтиллятор, реакция обратного бета-распада, мониторинг атомных реакторов.

УДК: 539.1.074.6. PACS: 28.41.Te, 29.40.Mc.

Введение

Реакция деления изотопов урана и плутония в топливе атомных реакторов приводит к образованию нейтронно-избыточных ядер, бета-распад которых дает интенсивное антинейтринное излучение (~ 6 антинейтрино на акт деления). Плотность потока антинейтрино Φ [антинейтрино/(см²·с)] пропорциональна числу делений или скорости выгорания ядерного топлива. Характерная величина Φ за биологической защитой реактора, работающего на тепловой мощности 1 ГВт, составляет $\Phi \sim 10^{12} - 10^{13}$ антинейтрино/(см²·с). В исследовательских работах Курчатовского института на Ровенской АЭС [1–3] было показано, что с помощью детектора антинейтрино можно дистанционно контролировать режимы работы реактора (уровни мощности и остановки) и проводить независимую оценку накопления плутония. Развитие нейтринного метода контроля было поддержано МАГАТЭ, в частности для задач обеспечения гарантий нераспространения. В начале 2000-х гг. это направление в физике нейтрино, известное сейчас как прикладная нейтринная физика, начало активно разрабатываться в ведущих

научных центрах США, Франции, Японии, Бразилии.

Для регистрации антинейтрино используется реакция обратного бета-распада с образованием позитрона (энергия которого зависит от энергии антинейтрино) и нейтрона. Порог реакции составляет 1.8 МэВ, поэтому регистрируется только 25% от общего количества излучаемых реактором антинейтрино, обладающих энергией выше порога. Наиболее подходящими средами для создания мишени служат водородо-насыщенные прозрачные пластиковые или жидкие органические сцинтилляторы (ЖОС). Техника регистрации реакции [4] — по последовательности двух импульсов от позитрона (ионизация среды с последующей аннигиляцией) и нейтрона (захват в мишени с излучением гамма-квантов) — позволяет сильно подавить фон за счет применения техники задержанных совпадений.

Для повышения эффективности захвата нейтрона в ЖОС целесообразно допировать ЖОС элементами с большим сечением захвата нейтронов, например, гадолинием (~ 250 000 барн). Регистрация нейтронов в этом случае осуществляется по нескольким гамма-квантам с суммарной энергией около 8 МэВ,

испускаемым возбужденными в результате захвата нейтрона ядрами гадолиния. Вероятность захвата и соответственно время жизни нейтронов в мишени определяется концентрацией гадолиния в сцинтиляторе, которое обычно составляет 1 г/л.

Расчеты и проведенные ранее эксперименты показывают, что на расстояниях 10-20 м от активной зоны реактора мощностью, например, 1,4 ГВт при чувствительном объеме ЖОС около 1 м³ и эффективности регистрации продуктов реакции ~ 60%, скорость счета детектора составляет около 10³ событий в сутки.

Следует обратить внимание, что до настоящего времени создание детекторов реакторных антинейтрино было направлено на исследовательские задачи. Внедрение нейтринного метода контроля атомных реакторов требует, очевидно, иных подходов, связанных с разработкой промышленных методов построения детектора как автономного прибора, соответствующего всем требованиям его эксплуатации на АЭС.

Первые шаги в этом направлении были сделаны в кооперации российских организаций (НИИЯФ МГУ имени Д.В. Скобельцына, НИЦ «Курчатовский институт», ИЯИ РАН, ВНИИА им. П. Л. Духова) с целью создания опытного образца первого промышленного детектора iDREAM (Industrial Detector for REactor Antineutrino Monitoring). Основные усилия на первом этапе были направлены на создание конструкции детектора, который бы эффективно регистрировал антинейтрино, но при этом был бы промышленным изделием, позволяющим его легко изготавливать, тиражировать, устанавливать и обслуживать. Дальнейшая задача работы — про-

ведение демонстрационного эксперимента в реальных условиях на АЭС, показывающего возможности автономного контроля режимов работы реактора нейтринным методом.

1. Конструкция детектора

Детектор iDREAM представляет собой промышленный (т.е. готовый для промышленного изготовления и использования) компактный детектор, оптимизированный для регистрации реакторных антинейтрино по реакции обратного бета-распада.

Конструкция детектора (рис. 1) выполнена в виде двух концентрических баков из нержавеющей стали, накрытых общей герметичной крышкой. Внутренний бак разделен выпуклой прозрачной мембраной из оргстекла и просматривается 16 ФЭУ. Пространство внутреннего бака под мембраной объемом 1 м³ заполняется гадолинизированным ЖОС и является мишенью детектора. Доступ к мишени обеспечивается через вертикальную трубку, вклеенную в центр мембраны, верхний конец которой выходит за пределы бака. Пространство внутреннего бака над мембраной заполняется линейным алкилбензолом (ЛАБ), оно служит для увеличения светосбора и защищает мишень от гамма-фона материала ФЭУ. Наружный бак из соображений удобства транспортировки и перемещений внутри зданий, также разделен по вертикали на две части. Кольцевой объем заполняется ЖОС и служит активной защитой мишени детектора, а также повышает общую эффективность за счет регистрации гамма-квантов, вышедших за пределы мишени. Кольцевой объем просматривают 12 ФЭУ. С нижней стороны крышки имеется светозащитный барьер между буферным

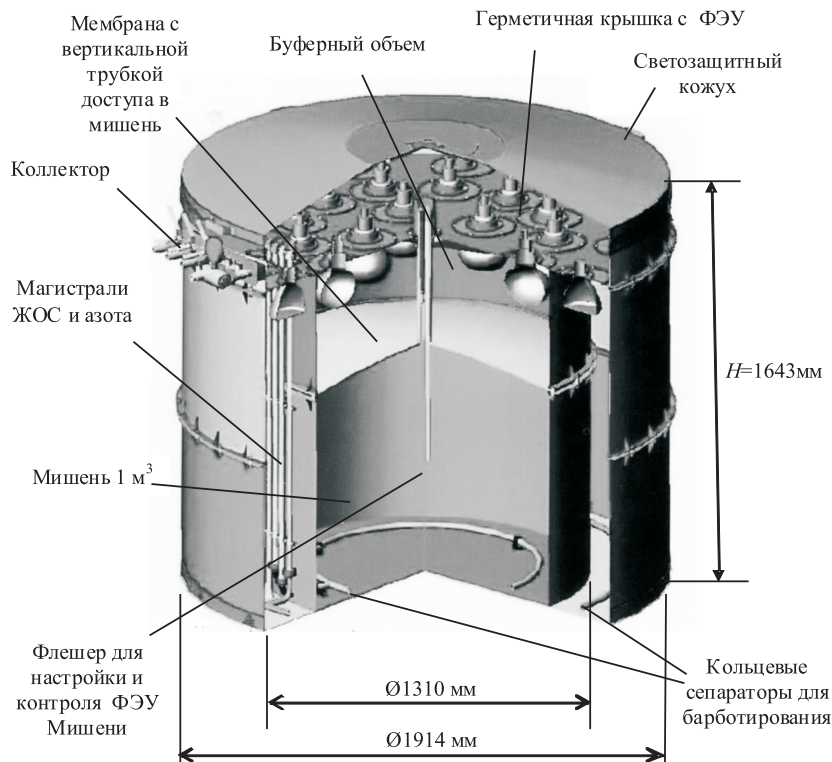


Рис. 1. Конструкция детектора iDREAM

и кольцевым объемами. Заполнение/откачка ЖОС и барботирование ЖОС азотом в мишени и в кольцевом объеме осуществляется через коллектор с помощью системы трубок и кольцевых сепараторов на дне внутреннего и кольцевого объема. Для контроля уровня жидкостей и давления в детекторе предусмотрена система контроля с комплектом датчиков. Для повышения светосбора внутренние стенки буферного и основного чувствительного объемов покрыты светоотражающим материалом «Lumigrog E6SRc» с коэффициентом отражения до 90% для спектра сцинтилляции используемого ЖОС. Таким образом, в детекторе используется два типа жидкого сцинтиллятора (с гадолинием и без него) и буферная жидкость, сделанные на основе линейного алкилбензола (ЛАБ). Общий объем жидкости около 3500 л.

2. Моделирование отклика детектора

Моделирование детектора методом Монте-Карло выполнено для оптимизации конструктивных решений на этапе разработки и изготовления детектора, а также для выбора чувствительных элементов, регистрирующих сцинтилляционные сигналы в ЖОС. Критическим параметром для оценки и прогнозирования эффективности работы детектора является светосбор. Для расчетов светосбора была создана компьютерная модель детектора, соответствующая оригиналу по основным конструкционным размерам. Характеристики сцинтиллятора были выбраны по результатам измерений световых выходов ЖОС на основе ЛАБ с добавками 3 г/л РРО и 15 мг/л РОРОР [5].

В симуляциях люминесценции была использована общепринятая модель безызлучательной передачи энергии от растворителя (ЛАБ) к флюору (РРО) и сместителю спектра (РОРОР). При транспортировке фотонов учитывалось взаимодействие со средой посредством двух процессов — упругого (рэлеевского) рассеяния по закону $(1 + \cos\theta)$ с сохранением длины волны и поглощения с возможной реэмиссией фотонов. Использованный код на основе среды GEANT4 был отработан в рамках международного проекта Vogexino, Chooz. Моделирование отклика детектора проводилось для различных отражающих способностей внутренних поверхностей.

На рис. 2 приведен отклик реального детектора (число фотоэлектронов) на рождение гамма-квантов с энергией 1 МэВ в центре детектора для коэффициентов зеркального отражения от стенок 0.4 и 0.9. Очевидно, увеличение коэффициента отражения улучшает энергетическое разрешение, которое во втором случае составляет около 10%, что характерно для ЖОС. Однако увеличение зеркального отражения приводит к затягиванию светособирания. Отражающая способность внутренних поверхностей оказывает значительное влияние на степень однородности светособирания. Поэтому диффузное отражение оказывается более предпочтительным, что и определило покрытие стенок пленкой «Lumigrog E6SRc».

Модельный спектр позитронов реакции обратного бета-распада в потоке реакторных антинейтрино показан на рис. 3, а: эффективность регистрации

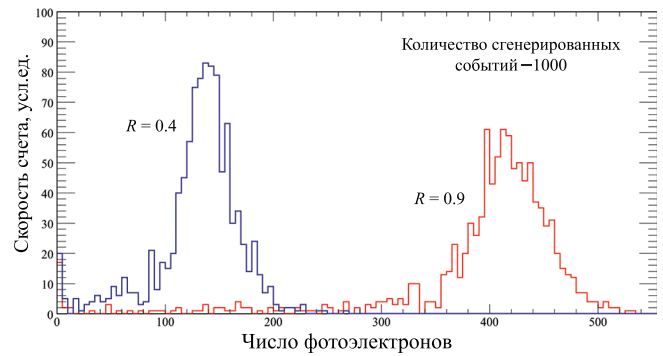


Рис. 2. Отклик детектора (число фотоэлектронов) на гамма-кванты 1 МэВ в центре детектора

позитронов (первого события) при энергетическом пороге ~ 1 МэВ, обеспечивающему низкую скорость счета случайных совпадений, ожидается не хуже 90%.

Регистрация нейтронов в детекторе осуществляется в результате многоступенчатого процесса (замедление, термализация, поглощение, рождение и распространение гамма-квантов), поэтому отклик детектора в этом случае имеет более сложный вид. На рис. 3, б приведен спектр нейтронов обратного бета-распада. Отчетливо видно, что при коэффициенте отражения 0.9 захват нейтрона на гадолинии (гадолиниевый пик с полной энергией около 8 МэВ) уверенно выделяется. Для этого порог дискриминации должен быть установлен в области провала спектра 3–3.5 МэВ, которая также является приблизительной границей гамма-фона от окружающих радиоактивных изотопов. Как видно из интегрального спектра на рис. 4, выбор порога регистрации гамма-квантов для второго события выше 3 МэВ обеспечит эффективность регистрации нейтронов не хуже 70%.

Таким образом, результаты моделирования указывают на возможность достижения заявленных параметров детектора антинейтрино. Дальнейшее моделирование будет проведено для уточнения параметров с использованием результатов испытаний опытного образца детектора.

3. Разработка жидкого органического сцинтиллятора

Одной из проблем при создании промышленных детекторов для мониторинга ядерных реакторов было отсутствие стабильного, недорогого, пожаробезопасного, нетоксичного ЖОС. Именно нестабильность ЖОС, которая проявлялась в деградации его свойств (световых выходов, прозрачность), ограничивала общее время эксплуатации таких детекторов, как РОНС и СНООЗ. За последние несколько лет были созданы несколько образцов новых ЖОС на основе линейного алкилбензола, допированных гадолинием и предназначенных для регистрации антинейтрино [6, 7]. Эти сцинтилляторы были изготовлены и используются в детекторах Reno, DayaBay, предназначенных для регистрации антинейтрино от ядерных реакторов. Поскольку эти детекторы имеют чувствительные объемы $\sim 10\text{--}20$ м³, принципиальным свойством ЖОС является не только световых выходов, но

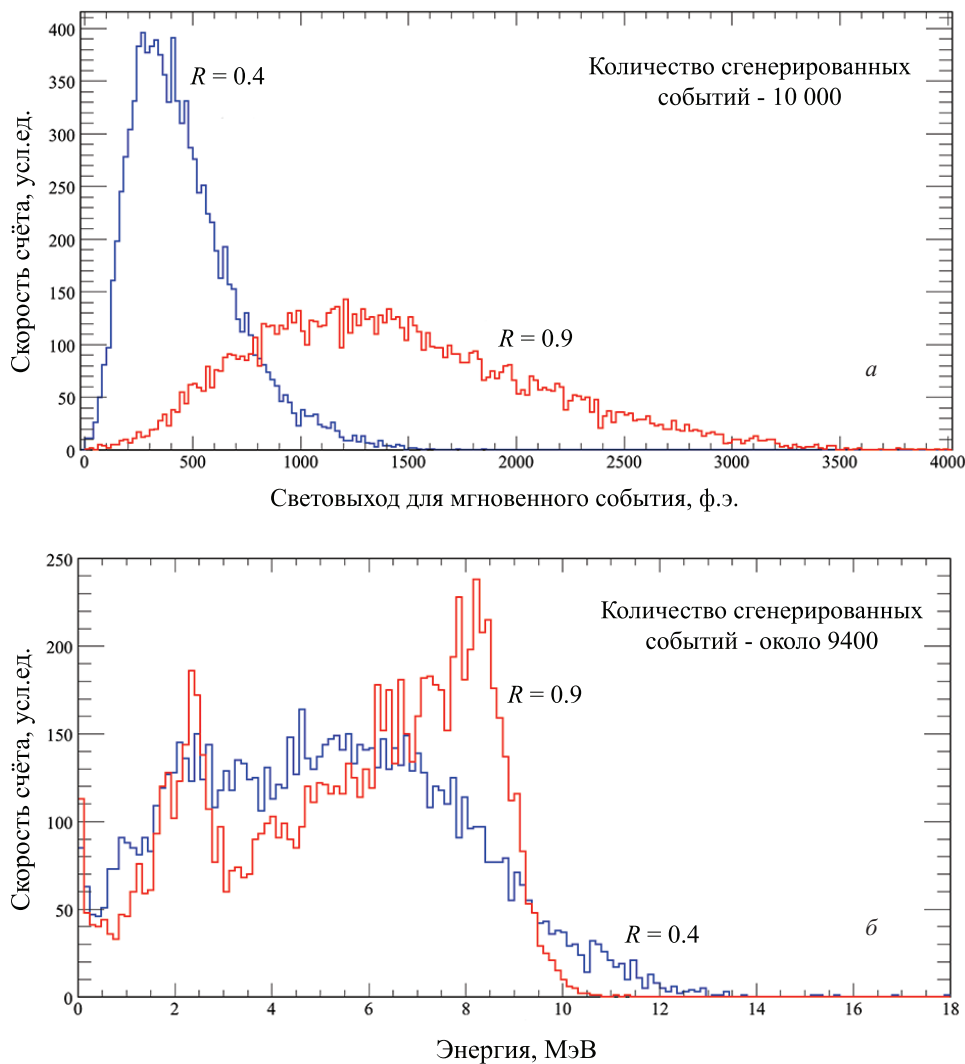


Рис. 3. Спектр позитронов реакции обратного бета-распада (а) и энергетический спектр событий, регистрируемых детектором как целым для нейтронов реакции обратного бета-распада в потоке реакторных антинейтрино (б)

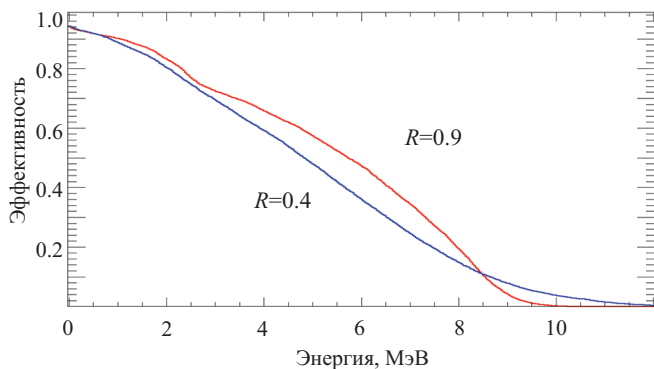


Рис. 4. Зависимость эффективности регистрации детектором как целым нейтронов реакции обратного бета-распада в потоке реакторных антинейтрино

и прозрачность, высокий уровень которой позволяет эффективно использовать большой объем. Именно эта характеристика является наиболее обсуждаемой в литературе, и усилия направлены на увеличение и сохранение прозрачности. Для промышленного детектора малого объема ($\sim 1 \text{ м}^3$) основным требованием является стабильность световыхода и ста-

бильность эффективности регистрации нейтронов, т.е. сохранение концентрации гадолиния в течение длительного времени. Поэтому прозрачность не является принципиальным параметром, хотя может отражать степень химической чистоты компонентов ЖОС.

Для детектора iDREAM был разработан оригинальный жидкий сцинтиллятор на основе российского ЛАБ (ТУ 2414-028-05766480-2006). Для введения в ЖОС гадолиния предложено использовать концентрат, включающий в себя базовое соединение гадолиния с концентрацией гадолиния, в 10 раз превышающей конечную концентрацию в ЖОС. Для приготовления ЖОС гадолинизированный концентрат разводился в предварительно подготовленном сцинтилляторе с введенными в него шифтером РРО (3 г/л) и флером РОРОР (0.03 г/л) [8, 9].

Стабильность гадолинизированного ЖОС определялась по результатам периодических измерений гамма-спектра эталонного источника ^{137}Cs . Стабильность световыхода ЖОС определялась по положению пика линии 0.662 МэВ на фиксированной шкале анализатора спектра. Измеренное значение

положения пика на шкале энергий для эталонного ЖОС без гадолиниевого концентрата было принято за единицу на шкале относительных значений сравниваемых значений световых выходов. Были протестированы три образца ЖОС с добавками соединений гадолиния $Gd(TMHA)_3 + TMHA$, $Gd(TMHA)_3$ и $Gd(TMHA)_3 + TGP$. На рис. 5 приведен график относительного световых выходов образца $Gd(TMHA)_3$, равного отношению световых выходов ЖОС с гадолиниевым комплексом к световых выходов ЖОС без комплекса. Видно, что в течение 100 дней характеристики ЖОС существенно не изменились. Измерения стабильности ЖОС продолжаются и по их результатам будет выбрана методика изготовления ЖОС для тестирования детектора iDREAM на атомной станции.

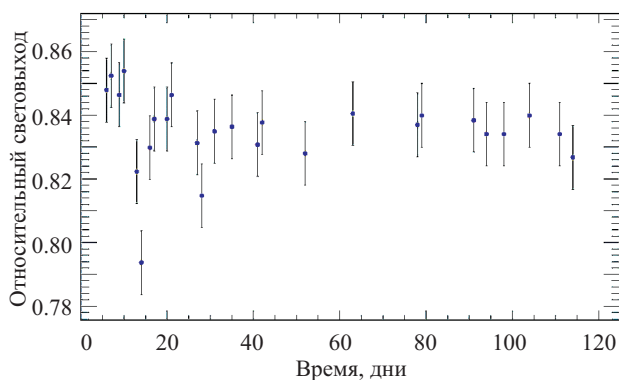


Рис. 5. Относительный световой выход ЖОС с добавкой комплекса $Gd(TMHA)_3$

Заключение

Технология детектирования антинейтрино по реакции обратного бета-распада в жидких органических сцинтилляторах является наиболее хорошо изученным на сегодня методом регистрации антинейтринного излучения, позволяющим регистриро-

вать как интенсивность, так и спектральные характеристики излучения. Именно этот метод реализован в детекторе iDREAM, который находится в состоянии сборки и физического пуска в НИИЯФ МГУ. Для мишени разрабатывается жидкий водородосодержащий органический сцинтиллятор, допированный Gd на основе ЛАБ. Созданный детектор iDREAM является уникальной и не имеющей аналогов в мире установкой, которая может применяться для прикладных и фундаментальных исследований, а также для обучения студентов. Зонирование детектора и его конструкция являются оригинальными и аналогов не имеют. В рамках проекта был разработан оригинальный гадолинизированный жидкий сцинтиллятор на основе российского ЛАБ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 14-22-03010фи_м и 14-02-31381мол_а).

Список литературы

1. Borovoi A., Mikaelyan L. // Atomic Energy. 1978. **44**. P. 508.
2. Климов Ю.В., Копейкин В.И., Микаэлян Л.А. и др. // Ядерная физика. 1990. **52**, № 6(12). С. 1579.
3. Копейкин В.И., Микаэлян Л.А., Синёв В.В. // Ядерная физика. 1997. **60**, № 2. С. 230.
4. Reines F. // Science. 1979. **203**, N 4375. P. 11.
5. Скорохватов М.Д., Нурахов Н.Н., Сухотин С.В., Этенко А. // Докл. РАН. 2011. **436**, № 6. С. 1.
6. Park J.S., Lee J., Yeo I.S. et al. // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. 2013. **707**. P. 45.
7. Aberle C., Buck C., Gramblich B. et al. // JINST. 2012. **7**. P. 06008.
8. Новикова Г.Я., Бакулина Н.И., Моргалюк В.П. // Журн. неорг. химии, 2014. **59**, № 3. С. 389.
9. Бакулина Н.И., Безруков Л.Б., Волжанина А.Б. и др. Препринт ИЯИ РАН 1387/2014.

The industrial iDREAM detector for neutrino monitoring of the operating modes of nuclear reactors

M. B. Gromov^{1,a}, G. A. Lukjanenko², D. S. Markov², G. J. Novikova³, B. A. Obinyakov^{2,b}, A. Y. Oralbayev², M. D. Skorohvatov², S. V. Sukhotin², A. S. Chepurinov^{4,c}, A. V. Etenko²

¹ Department of General Nuclear Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

² National Research Center Kurchatov Institute, Moscow 123182, Russia.

³ Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow 117312, Russia.

⁴ D. V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119234, Russia.

E-mail: ^agromov@physics.msu.ru, ^bobinyakov@gmail.com, ^cchas@rtm-cs.sinp.msu.ru.

The neutrino method for monitoring the operating modes of nuclear reactors was proposed and tested in the 1980s–1990s at the Kurchatov Institute. Recent progress in the experimental techniques for antineutrino detection has enabled the development of projects that are focused on the introduction of techniques that are used in fundamental research in the nuclear-power industry. We report on the current status of the development of a test prototype of the iDREAM (industrial Detector for REactor Antineutrino Monitoring) detector. The detector is a scintillation spectrometer that is based on a liquid organic scintillator with a sensitive volume of 1 m³ and is constructed with due regard for the current experience in the design of the most extensively studied detectors of reactor antineutrinos of this type.

Keywords: neutrino physics, antineutrino detection, liquid organic scintillator, inverse beta decay, nuclear reactor monitoring.

PACS: 28.41.Te, 29.40.Mc.

Received 22 January 2015.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 3(2015).

Сведения об авторах

1. Громов Максим Борисович — аспирант; тел.: (495) 939-56-31, e-mail: gromov@physics.msu.ru.
2. Лукьянченко Георгий Александрович — инженер-исследователь; тел.: (499) 196-76-12, e-mail: lukyanchenko_ga@nrcki.ru.
3. Марков Денис Сергеевич — инженер-исследователь; e-mail: markovds@yahoo.com.
4. Новикова Галина Яковлевна — канд. хим. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 423-58-91, e-mail: g-novikova@mail.ru.
5. Обиняков Борис Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (499) 196-97-33, e-mail: obinyakov@gmail.com.
6. Оралбаев Алдияр Юрьевич — инженер-исследователь; e-mail: oralbaev@physics.msu.ru.
7. Скорохватов Михаил Дмитриевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, зам. директора Центра фундаментальных исследований; тел.: (499) 196-99-26, e-mail: skorokhvatov_md@nrcki.ru.
8. Сухотин Сергей Владимирович — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (499) 196-93-39, e-mail: sukhotin@kiae.ru.
9. Чепурнов Александр Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-56-31, e-mail: chas@rtm-cs.sinp.msu.ru.
10. Этенко Александр Владимирович — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (499) 196-76-12, e-mail: etenko@kiae.ru.