

Спектрометр реакторных антинейтрино iDREAM для прикладных и фундаментальных исследований

А. С. Чепурнов*

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

(Статья поступила 30.06.2019; Подписана в печать 08.08.2019)

Спектрометр реакторных антинейтрино iDREAM (industrial Detector for REactor Antineutrino Monitoring) создан совместными усилиями специалистов НИИЯФ имени Д. В. Скобельцына МГУ имени М. В. Ломоносова и НИЦ Курчатовский институт. Уникальными искусственными высокоинтенсивными источниками электронного антинейтрино являются современные энергетические ядерные реакторы. Для проведения фундаментальных и прикладных исследований в области физики нейтрино строятся лаборатории в которых устанавливаются большие жидкосцинтилляционные спектрометры с массой мишени десятки и сотни тонн. Такие лаборатории строятся вблизи АЭС, имеющих, как правило несколько реакторов. Достижения в области экспериментальной техники детектирования антинейтрино, хорошо отработанные и ставшие доступными благодаря большим детекторам антинейтрино, позволили перейти к созданию компактных недорогих детекторов, направленных на внедрение нейтринного метода мониторинга в промышленную ядерную энергетику.

PACS: 28.41.Te

УДК: 539.1.074.6

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

ВВЕДЕНИЕ

Нейтринный метод мониторинга ядерных энергетических реакторов был предложен и подтвержден экспериментально учеными Курчатовского института в экспериментах на Ровенской АЭС в 80-х годах прошлого века. Полученные в экспериментах данные показали возможность контроля за процессом выгорания ядерного топлива в реальном времени, позволили провести оценку содержания плутония в топливе и зафиксировать остановку реактора в течение нескольких часов [1–3]. Достаточно полный исторический обзор экспериментов по регистрации реакторных антинейтрино в СССР до 90-х годов с богатым списком литературы можно найти в монографии по физике реакторных антинейтрино на русском языке [4].

Параллельно с фундаментальными исследованиями нейтрино и антинейтрино, в 2000-х годах сформировалось международное сообщество ученых, занимающихся прикладной физикой антинейтрино. Одной из причин стало повышение внимания мирового сообщества к проблеме нераспространения ядерных (делящихся) материалов потенциальными источниками которых являются энергетические реакторы АЭС. К началу 2000-х годов экспертами МАГАТЭ была признана полезность нейтринного метода дистанционного контроля активной зоны реактора [5–7] и поддержано его практическое использование для следующих целей:

- повышение безопасности эксплуатации атомных

установок, хранилищ отработанного ядерного топлива и т.п.;

- обеспечение гарантий нераспространения ядерных материалов, особенно при строительстве и эксплуатации АЭС в странах, не входящих в «ядерный клуб» стран, обладающих ядерным оружием.

Однако внедрение нейтринного (или любого другого) метода контроля в реальный регламент работы атомной станции или другого ядерного промышленного объекта должно отвечать ряду требований, которые отличают любую экспериментальную научную установку от промышленной:

- детектирование должно быть дистанционным на расстоянии 10-20 м от активной зоны реактора за биологической защитой и за границами реакторного цеха;
- детекторы должны быть конструктивно компактными, и размещаться в имеющихся технологических помещениях АЭС;
- детектор должен работать в режиме «черного ящика» т.е. автономно, без обслуживания, стабильно и безопасно в течении как минимум кампании реактора;
- детектор должен иметь встроенные средства калибровки и самодиагностики;
- данные от детектора должны передаваться по каналам связи в удаленный центр контроля и управления;

*E-mail: aschepurnov@yandex.ru

- принципы регистрации, лежащие в основе детектора должны исключать возможность фальсификации физических данных внешними воздействиями на детектор.

Детектор iDREAM и является тем таким промышленным инструментом, который по плану ГК Росатом в течение 2019–2021 гг. должен быть установлен на Калининской атомной станции в специально созданной новой научной лаборатории.

1. ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР КАК ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОННЫХ АНТИНЕЙТРИНО

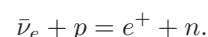
Поток антинейтрино, выходящий из активной зоны реактора, несет неискаженную информацию о происходящих в активной зоне процессах деления, «выгорания» ядерного топлива. Несколько групп реакторных нейтринных экспериментов, направленных на решение фундаментальных научных проблем развиваются в настоящее время: исследование осцилляций нейтрино на малых (10–20 м) расстояний от активной зоны реактора, исследование осцилляций нейтрино на больших расстояниях масштаба километров, измерение магнитного момента электронного антинейтрино и исследование процессов когерентного рассеяния нейтрино на ядрах. Прикладные проблемы, которые могут быть решены путем регистрации потока антинейтрино от искусственных источников делятся на три группы: контроль за нераспространением делящихся материалов; контроль (измерение) мощности реактора по потоку антинейтрино; исследование процессов выгорания новых видов топлива, в том числе в новых типах реакторов по спектру антинейтрино.

Цепная реакция деления, протекающая в активной зоне ядерного реактора, сопровождается излучением электронного антинейтрино в результате процессов бета-распада перегруженных нейтронами осколков деления. В среднем в результате одного акта деления испускается около 6 антинейтрино. Времена полураспадов зависят от характеристик β^+ переходов и заключены, в основном, в интервале от долей секунды до ~ 1 года. Процесс носит статистический характер и характеристики излучения антинейтрино (число антинейтрино в интервале энергии ΔE в единицу времени) складываются из громадного числа мод деления. Но, тем не менее, именно плотность потока антинейтрино Φ [антинейтрино/см²×с], прямо пропорциональна числу делений или скорости выгорания ядерного топлива, что позволяет этот процесс дистанционно контролировать путем регистрации потока антинейтрино. Характерная величина плотности потока антинейтрино за биологической защитой реактора, работающего на тепловой мощности 1 ГВт, составляет $\Phi \sim 10^{13}$ антинейтрино/см²×с, что на несколько порядков превышает предел чувствительности современных исследовательских детекторов. Исследование спектров

антинейтрино изотопов, рождающихся в процессе горения ядерного топлива, является самостоятельной научной задачей и в реакторных экспериментах применяются как исходные данные. Используются спектры, полученные восстановлением из измеренных спектров β -частиц изотопов ²³⁵U, ²³⁹Pu и ²⁴¹Pu и относящиеся к моменту времени ~ 1 суток с начала процесса облучения этих изотопов нейтронами [8, 9], а также расчётный равновесный β -спектр ²³⁸U [10]. В таком стандартном подходе принимается, что спектр устанавливается за 1 сутки после пуска реактора и не учитывается дальнейшее накопление активности за время облучения от 1 суток до конца эксплуатации данной загрузки топлива в реакторе (3 года). Также не учитывается добавка в спектр, связанная с активацией осколков деления нейтронами. Кроме того, не учитывается остаточное β -излучение реактора после его остановки. Стандартное приближение применяется более двух десятков лет и, в целом, хорошо описывает спектр реакторных антинейтрино и подтверждается экспериментом. Результаты прямых измерений реакторного β -спектра, выполненные Курчатовским институтом на Ровенской АЭС (РАЭС) [11] и коллаборацией CST (США, Германия, Швейцария) на реакторе в Гёггене [12] приведены в соответствующих работах. С появлением комплексов из двух и более детекторов реакторных антинейтрино большого объема (DOUBLE CHOOZ, RENO, DAYA BAY), направленных на исследование осцилляций антинейтрино, проблема корректного спектра реакторных антинейтрино встала особенно остро в связи с зависимостью значения, измеряемого в этих экспериментах, угла смешивания массовых состояний нейтрино от используемых оценок измеренного спектра детектируемого потока реакторных антинейтрино. Проблема на сегодня остается открытой [13], несмотря на то, что коллаборации продолжают публиковать уточненные результаты [14].

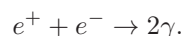
2. ОБРАТНЫЙ β -РАСПАД (IBD) — ОСНОВНОЙ ПРОЦЕСС ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ АНТИНЕЙТРИНО В СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРАХ

Для регистрации потока электронных антинейтрино от реактора используется реакция захвата антинейтрино протонами мишени – реакция обратного бета-распада (IBD), протекающая на ядерно-свободном протоне с образованием позитрона и нейтрона:



Уникальность этой реакции заключается в том, что при правильном подборе мишени детектора оба продукта реакции дают хорошо регистрируемые вторичные реакции, инициирующие разделенные во времени события, что позволяет использовать технику задержанных совпадений.

Первое — «мгновенное событие» — представляет собой аннигиляцию позитрона:

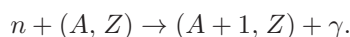


При этом регистрируемая энергия E , при условии преобладания отдачей нейтрона,

$$E_{\text{мгн}} = E_{\nu_e} + Q + 2m_e = E_{\nu_e} - 0.784 \text{ МэВ}$$

т.е. пропорциональна энергии антинейтрино E_{ν_e} . Точность измерения спектра мгновенных событий полностью определяет спектрометрические характеристики детектора антинейтрино. Необходимо отметить, что реакция IBD является пороговой, в связи с этим регистрируются антинейтрино с энергией больше 1.8 МэВ, которых в спектре реакторных антинейтрино наблюдается около 25%.

Нейтрон образуется с характерной энергией несколько десятков кэВ, замедляется в мишени, начинает диффундировать и захватывается ядрами мишени с последующим испусканием γ -квантов



Для эффективной регистрации запаздывающих событий наиболее подходящими средами могут быть протоно (водородо)-насыщенные прозрачные пластиковые или жидкие органические сцинтилляторы (ЖОС), которые обеспечивают как реализацию реакции IBD, так и захват нейтрона на ядре водорода с последующим испусканием γ -кванта с энергией 2.2 МэВ. Среднее время жизни нейтронов в водородо-насыщенном ЖОС составляет около 200 мкс. Для увеличения энерговыделения и сокращения «времени жизни» нейтрона в ЖОС вводят тяжелые элементы (например, Gd или Cd с концентрацией несколько граммов на литр), обладающие большим сечением захвата нейтронов, что приводит к сокращению времени между «мгновенным» и «запаздывающим» событием и излучению каскада γ -квантов. Хлорид Cd, растворенный в воде, а в дальнейшем органическая соль Cd в ЖОС использовалась в исторических реакторных экспериментах Ф. Райнеса и сотрудников. В этих экспериментах впервые было зарегистрировано антинейтрино с использованием IBD [15]. Gd-содержащие ЖОС являются на сегодня наиболее распространенными и изготавливаемыми в промышленных объемах. При захвате нейтрона на ^{157}Gd образуются γ -кванты с суммарной энергией около 8 МэВ. В результате нейтроны захватываются в конкурирующих процессах ядрами водорода (с вероятностью 10–20%), и с большей вероятностью ядрами гадолиния (около 80%). Gd-содержащие ЖОС используются во всех «больших» детекторах Double Chooz [16], Daya Bay [17], RENO [18] и некоторых «малых» детекторах NEOS [19], iDREAM [20], Nucifer [21], Neutrino-4 [22].

Для детекторов малого объема, в которых применяется Gd для захвата нейтронов существует проблема «утекания» γ -квантов, когда не все образовавшиеся

гамма кванты полностью поглощаются в чувствительном объеме детектора из-за его малого объема. В результате энергия регистрируется с ошибкой, что приводит к пропуску регистрации реакции IBD. Особенно критичной такая проблема становится в сегментированных детекторах на пластиковых сцинтилляторах с характерными размерами сегментов десятки сантиметров. Для решения данной проблемы создаются мишени, в которых захват нейтрона происходит в реакции с изотопом ^6Li :



Образовавшаяся альфа-частица имеет значительно меньший пробег в мишени, что приводит к регистрации нейтрона в малой окрестности от области захвата. Данный принцип используется в детекторах PROSPECT [23], NuLat [24], SoLid и CHANDLER [25].

Таким образом, для эффективной регистрации IBD необходимо иметь хорошие сцинтилляционные материалы с хорошим световыходом и, что особенно важно для детекторов промышленного типа, со стабильными параметрами, не меняющимися в течение десятков лет. Именно успехи в создании технологии производства ЖОС с добавлением органических комплексов гадолиния в промышленных масштабах и отработанная в процессе создания больших детекторов технология заливки и контроля параметров ЖОС [19, 26, 27] обеспечили возможность создания детекторов малого объема для фундаментальных и прикладных целей. В этих успехах есть большой вклад ученых из ОИЯИ РАН [28].

3. ДЕТЕКТОР IDREAM

Цель создания опытного образца детектора-спектрометра реакторных антинейтрино iDREAM (industrial Detector for REactor Antineutrino Monitoring) — демонстрация применения нейтринного метода в условиях промышленной АЭС с реакторами типа ВВЭР. Расчетная эффективность регистрации антинейтрино детектора iDREAM позволяет его размещать вне реакторного цеха на удалении 20–30 м от активной зоны реактора.

Адронная компонента космического излучения и, в частности, атмосферные нейтроны с энергиями несколько МэВ представляют основные источники фона детектора на поверхности. Поток нейтронов на поверхности составляет около $\Phi_0 \approx 15 \div 20 \text{ м}^{-2} \times \text{с}^{-1}$ в зависимости от состава поверхности, но быстро падает до величин $\sim 10^{-4} \text{ м}^{-2} \times \text{с}^{-1}$ на глубине ~ 20 м водного эквивалента (м. в. э.) по экспоненциальному закону:

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-h/L) \text{ нейтронов}/(\text{м}^2/\text{с}),$$

где h — толщина слоя в м.в.э., $L \sim 1.5$ м — средний пробег нейтронной компоненты.

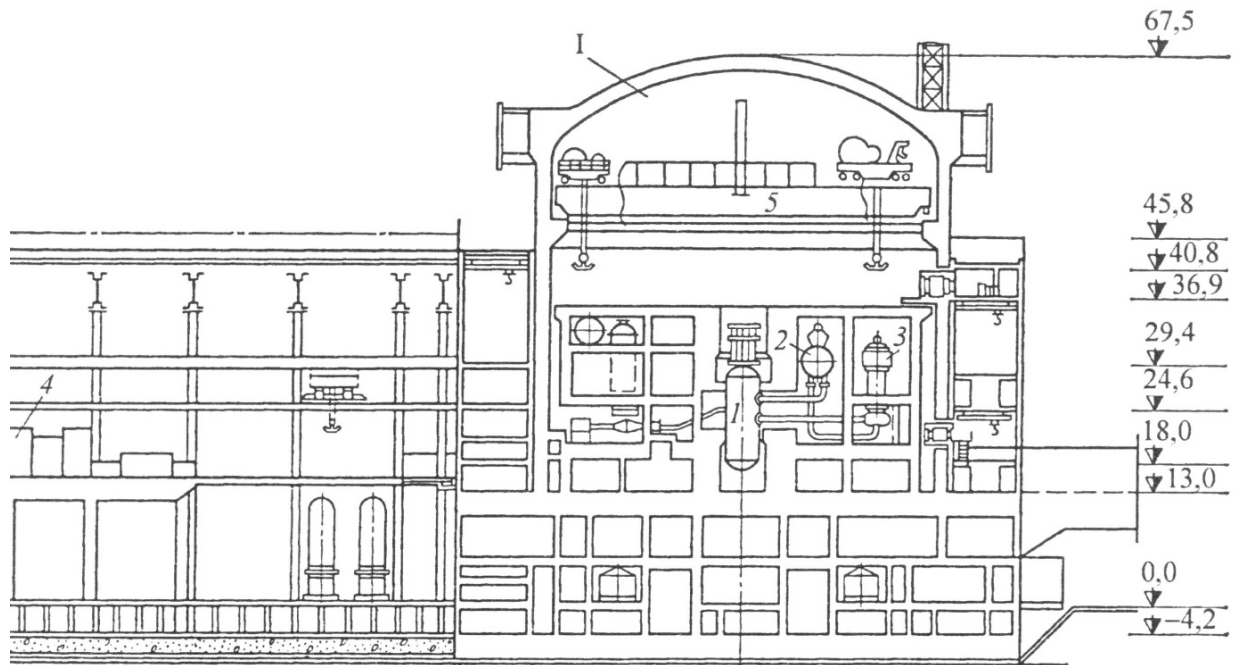


Рис. 1: Возможное расположение детектора iDREAM (показано звездочкой) в главном корпусе АЭС по унифицированному проекту с реактором ВВЭР-1000. Чертеж взят из [29]

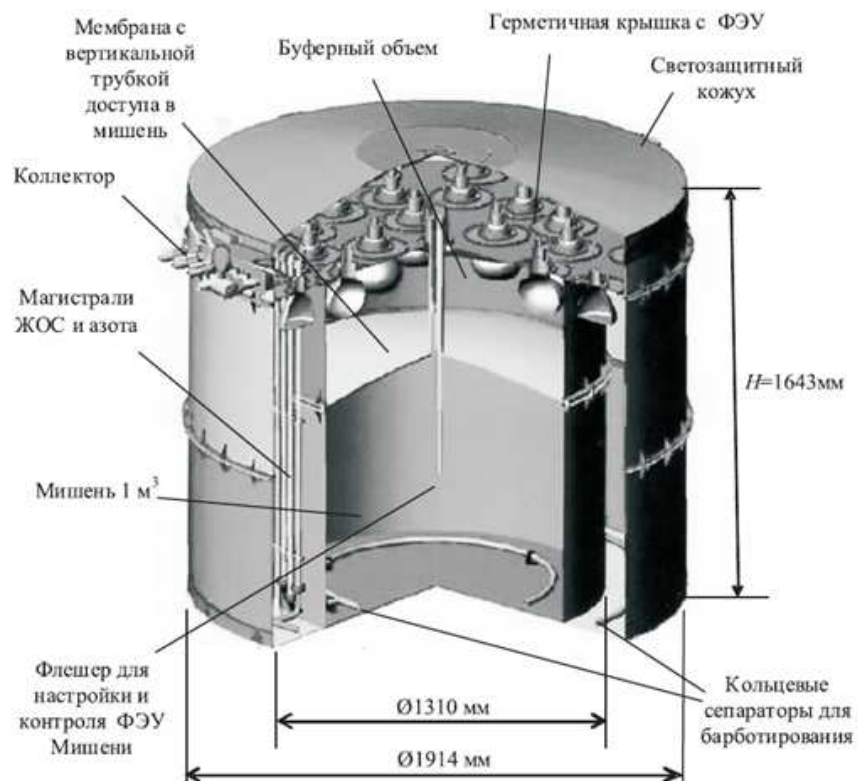


Рис. 2: Общий вид и конструкция детектора iDREAM

Таким образом, для обеспечения оптимальных фоновых условий, соответствующих расположению детектора на глубинах больше $15 \div 20$ м.в.э., предпочтитель-

но устанавливать детектор в нижних этажах здания АЭС. Тогда все конструкции здания и водный бассейн выдержки топлива будут эффективно экранировать де-

тектор от адронной компоненты фона. Возможным местом размещения детектора в главном корпусе АЭС по унифицированному проекту с реактором ВВЭР-1000, может стать помещение под реактором, как показано на рис. 1.

Детектор iDREAM изготовлен в виде двух концентрических баков из нержавеющей стали, накрытых общей герметичной крышкой (рис. 2). Внутренний бак разделен выпуклой прозрачной мембраной из полиметилметакрилата (ПММ) и просматривается 16 ФЭУ. Пространство внутреннего бака под мембраной объемом 1 м^3 заполняется гадолинизированным ЖОС [28] и является мишенью детектора. Доступ к мишени обеспечивается через вертикальную трубку из ПММ, вклеенную в центр мембраны, верхний конец которой выходит за пределы бака. Пространство внутреннего бака над мембраной заполняется линейным алкилбензолом (ЛАБ), оно служит для выравнивания светосбора и защищает мишень от гамма-фона от 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. Для залива и слива жидкостей из объемов детектора, для контроля уровня жидкостей, температуры и давления в детекторе предусмотрена система медленного контроля на основе промышленных ультразвуковых датчиков уровня, датчиков температуры, электронных реле, объединенных с помощью промышленной шины CANopen.

Таким образом, в детекторе используется два ти-

па жидкого сцинтиллятора (с гадолинием и без него) и буферная жидкость, сделанные на основе ЛАБ российского производства. Общий объем жидкости около 3500 л.

Система сбора данных построена на многоканальном (8 каналов) АЦП прямого преобразования со скоростью 500 М 14-разрядных отсчетов в секунду и используются для обработки сигналов на выходе с ФЭУ. Применяемые АЦП обеспечивают возможность применения алгоритмов сбора данных по форме импульса. Набор модулей сумматоров-дискриминаторов быстрой электроники вместе с оригинальным гибким программируемым триггером, основанным на ПЛИС, был создан для системы сбора данных iDREAM, чтобы в реальном времени производить отбор событий-кандидатов на IBD. Вспомогательная система контроля и управления на основе промышленной шины CANopen была создана для контроля за источниками высокого напряжения и порогами дискриминации системы сбора данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спектрометр реакторных антинейтрино iDREAM готов к установке на АЭС и есть надежда, что совместными усилиями создавших его ученых и специалистов ГК Росатом, в 2019–2021 гг. будет проведен демонстрационный эксперимент по мониторингу работы промышленного атомного реактора и измерению спектра реакторных антинейтрино, который даст новые экспериментальные данные для исследований фундаментальных свойств нейтрино.

-
- [1] *Mikaelyan L.* in Proc. Intern.Conf. «Neutrino-77». **2**, М: Nauka, 1978.
- [2] *Borovoi A., Mikaelyan L.* // Atomic Energy. 1978. **44**. P. 508.
- [3] *Klimov Yu., Kopeikin V., Mikaelyan L.* et al. // Atomic Energy. 1994. **76**(2). P. 130.
- [4] *Русов В.Д., Тарасов В.А., Литвинов Д.А.* Физика реакторных антинейтрино. М.: Издательство ЛКИ, 2008.
- [5] Final Report: Focused Workshop on Antineutrino Detection for Safeguards Applications, 28-30 October 2008, IAEA Headquarters, Vienna, 2008.
- [6] *Skorokhvatov M.* «Development of neutrino method for control and monitoring of nuclear reactors». Report Meeting to Evaluate Potential Applicability of Antineutrino Detection Technologies for Safeguards Purposes, 17-18 December 2003, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, www.iaea.org/Publications/Factsheets/English/S1Safeguards.pdf.
- [7] *Bochkarev O. V., Skorokhvatov M. D.* Reactor monitoring with antineutrino detector. The INNМ 47-th Annual Meeting, Nashville, Tennessee, July 16-20, 2006.
- [8] *Schreckenbach K., Colvin G.* et al. // Phys. Lett. B. 1985. **160**. P. 325.
- [9] *Hahn A., Schreckenbach K.* et al. // Phys. Lett. B. 1989. **218**. P. 365.
- [10] *Vogel P., Schenter G.* et al. // Phys. Rev. C. 1981. **24**. P. 1543.
- [11] *Копейкин В.И., Микаэлян Л.А., Синёв В.В.* // Ядерная физика. 1997. **60**, № 2. С. 230.
- [12] *Zacek G., Feilitzsch F., Mossbouer R.L.* et al. // Phys. Rev. D. 1986. **34**. P. 2621.
- [13] *Berryman J.M., Brdar V., Huber P.* // Phys. Rev. D. 2019. **99**. 055045. (arXiv:1803.08506 [hep-ph]).
- [14] *Adey D.* et al. (*The Daya Bay Collaboration*). Phys. Rev. Lett. **121**. 241805.
- [15] *Reines F., Cowan C.L.Jr., Carter R.E., Reines F., Wagner J.J., Wyman M.E.* The Free Antineutrino Absorption Cross Section. Part I. Measurement of the Free Antineutrino Absorption Cross Section. Part II. Expected Cross Section from Measurements of Fission Fragment Electron Spectrum. United States, 1958. <http://www.osti.gov/accomplishments/documents/fullText/ACC01>
- [16] *Abe Y.* et al. // J. High Energy Phys. 2014. **10**. P. 086.
- [17] *An F.P.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2015. **115**. 111802.
- [18] *Choi J.H.* et al., Observation of Energy and Baseline

- Dependent Reactor Antineutrino Disappearance in the RENO Experiment. arXiv:1511.05849. 2015.
- [19] *Va Ro Kim, Youyoung Han, Eun-ju Jeon, Kyung Kwang Joo et al.* Development and Mass Production of a Mixture of LAB- and DIN-based Gadolinium-loaded Liquid Scintillator for the NEOS Short-baseline Neutrino Experiment. arXiv:1511.05551
- [20] *Громов М. Б., Лукьянченко Г. А., Марков Д. С., Новикова Г. Я., Обиняков Б. А., Оралбаев А. Ю., Скорохватов М. Д., Сухотин С. В., Чепурнов А. С., Этенко А. В.* // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* 2015. № 3. (*Gromov M. B., Lukjanchenko G. A. et al. Mosc. Univ. Phys. Bull.* 2015. **70**, N 3. P. 190.))
- [21] *Voireau G., Bouvet L., Collin A. P. et al.* // *Phys. Rev. D.* 2016. **93**. 112006.
- [22] *Serebrov A., Ivochkin V., Samoiloov R. et al.* Status of Experiment NEUTRINO-4 Search for Sterile Neutrino. arXiv:1611.05245.
- [23] *Ashenfelter J., Balantekin B., Band H. R.* The PROSPECT Physics Program, arXiv:1512.02202.
- [24] *Lane C., Usman S. M., Blackmon J. et al.* A new type of Neutrino Detector for Sterile Neutrino Search at Nuclear Reactors and Nuclear Nonproliferation Applications. arXiv:1501.06935.
- [25] *Huber P. et al* // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. **1216**. 012014.
- [26] *Park J. S., Lee J. et al.* Production and optical properties of Gd-loaded liquid scintillator for the RENO neutrino detector, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2012.12.121>.
- [27] *Aberle C., Buck C., Gramblach B., Hartman F. X., Lindner M., Schonert S., Schwan U., Wagner S., Watanabe H.* Large scale Gd-beta-diketonate based organic liquid scintillator production for antineutrino detection. arXiv: 1112.5941v2.
- [28] *Новикова Г. Я., Бакулина Н. И., Вологжанина А. В., Локшин Б. В., Моргалюк В. П.* // *Журнал неорганической химии.* **61**. С. 270.
- [29] *Дубровский В. Б., Лавданский П. А., Енговатов И. А.* Строительство атомных электростанций. Учебник для вузов. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010.

iDREAM — reactor antineutrino spectrometer for applied and basic research

A. S. Chepurnov

¹*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*
E-mail: aschepurnov@yandex.ru

The iDREAM reactor antineutrino spectrometer (industrial Detector for REactor Antineutrino Monitoring) was developed by the joint efforts of the Skobeltsyn Institute for Nuclear Physics of Moscow State University and NRC Kurchatov Institute. The unique artificial high-intensity sources of electron antineutrino are modern nuclear power reactors. To conduct fundamental and applied research in the field of neutrino physics, laboratories are being built in which large liquid scintillation spectrometers with a target mass of tens and hundreds of tons are installed. These laboratories are constructed near nuclear power plants, usually with several reactors. Advances in the field of experimental antineutrino detection techniques, well developed and made available thanks to large antineutrino detectors, led to the development of compact, low-cost detectors aimed at introducing a neutrino monitoring method into industrial nuclear energy.

PACS: 28.41.Te

Keywords: neutrino physics, antineutrino detection, liquid organic scintillator, reverse beta decay reaction, control system, data acquisition system, monitoring of atomic reactors.

Received 30 JUne 2019.

Сведения об авторе

Чепурнов Александр Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел. (495) 939-56-31, e-mail: aschepurnov@yandex.ru.
