

Было найдено, что все экспериментальные результаты совпадают друг с другом и, кроме того, экспериментальные данные при 7 ТэВ значительно превышают теоретические значения, за исключением полученных из генератора РYTHIA с настройкой по ATLAS–CSC [9].

На рис. 3 показана зависимость значений $dN_{ch}/d\eta$ от энергии в системе центра масс (в области $|\eta| < 0,5$), найденных в этом и других экспериментах для неупругих событий (INEL) и событий без единичной дифракции (NSD). Линии представляют результаты фитирования степенной зависимостью от энергии.

Видно, что плотность заряженных частиц увеличивается примерно в 1,5 раза в интервале энергий 2–7 ТэВ (от энергии тэватрона до максимальной энергии LHC). Была также показана возможность разумного описания распределения по множественности заряженных частиц в рамках представления так называемого KNO-скейлинга [10] в области энергий 0,2–2,36 ТэВ.

Список литературы / References

1. Батюня Б. В. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2009. Т. 6, № 5(154). С. 665–676 / *Batyunya B. et al.* // JETP Lett. 2009. V. 6, No. 5(154). P. 665–676.
2. *Malinina L. et al.* // *Nukleonika*. 2004. V. 49 (Suppl. 2). P. 99–102.
3. *Alessandro G. et al. (ALICE Collaboration)* // *J. Phys. G*. 2006. V. 32. P. 1295.
4. *Hees Van, Rapp R.* hep-ph/0711.3444v2, 2007.
5. *Aamodt K. et al. (ALICE Collaboration)* // *Eur. Phys. J. C*. 2010. V. 65. P. 111.
6. *Aamodt K. et al. (ALICE Collaboration)*. Submitted to «*Eur. Phys. J. C*». arXiv: 1004.3034[hep-ex] (2010).
7. *Aamodt K. et al. (ALICE Collaboration)*. Submitted to «*Eur. Phys. J. C*». arXiv: 1004.3514[hep-ex] (2010).
8. *Aamodt K. et al. (ALICE Collaboration)* // *J. Instrum.* 2008. V. 3. P. 08002.
9. *Moraes A. (ATLAS Collaboration)*. ATLAS Note ATL-COM-PHYS S-2009-119 (2009).
10. *Koba Z., Nielsen H. B., and Olesen P.* // *Nucl. Phys. B*. 1972. V. 40. P. 317.

Л. Б. Пикельнер, С. А. Куликов

50 лет с момента пуска первого ИБР

Свою статью «Развитие и применение в научных исследованиях импульсного реактора ИБР», опубликованную в ЭЧАЯ в 1972 г., И. М. Франк начал так: «В 1970 г. исполнилось 10 лет с того времени, когда реактор ИБР впервые достиг импульсной критичности. Десять лет — это немалый срок. Он заставляет оглянуться назад и подумать о том, насколько плодотворным был путь применения импульсного реактора периодического действия, ... каковы основные итоги пройденного пути и каковы дальнейшие перспективы» [1]. Спустя еще 40 лет мы готовы к пуску четвертого поколения импульсных быстрых реакторов и с удовлетворением вспоминаем пройденный путь и первые шаги в этом направлении. И вот как все было...

Проект реактора ИБР начал разрабатываться в Физико-энергетическом институте (ФЭИ) по инициативе Д. И. Блохинцева в 1955 г. С 1957 г. в эту работу вклю-

L. B. Pikelner, S. A. Culicov

Five Decades since the Launch of the First IBR

In his article «The Development and Research Application of Fast Pulsed Reactor IBR» published in the journal «Physics of Elementary Particles and Atomic Nucleus» (PEPAN) in 1972, I. M. Frank wrote the following opening: «A decade ago the reactor IBR reached its pulse criticality for the first time. Ten years is quite a long period of time. It makes us look back and think about the fruitful work that has been done, the efficiency of application of the pulsed reactor of periodic action, ... main results and future perspectives» [1]. Now, forty years later, we are ready to launch the fourth generation of fast pulse reactors, and we think of the thorny path and the first steps of the reactor's development with great pleasure. Here is the story...

The development of the design of the IBR reactor was first initiated by Professor D. I. Blokhintsev in 1955, at the Institute for Physics and Power Engineering (IPPE). In 1957, JINR joined the project, and construction work and preparation for experiments began. The creation of the IBR

чился ОИЯИ, начались строительные работы и подготовка к экспериментам. Создание реактора ИБР, его пуск и первые этапы освоения проводились Лабораторией нейтронной физики (ЛНФ) совместно с ФЭИ. Теория реактора ИБР была разработана И. И. Бондаренко и Ю. Я. Стависским и, как показал пуск ИБР, вполне оправдалась.

По проекту реактор ИБР был предназначен для работы при средней мощности 1 кВт, что во многом определило конструкцию. В конце 1960 г. он был доведен до проектной мощности, и одновременно на нейтронных пучках начались физические эксперименты. Оптимальной для конструкции реактора (а не для физиков, которые всегда заинтересованы в повышении потока нейтронов) оказалась мощность 3 кВт, она же была основной для большинства работ. При этом реактор обычно работал в режиме 5 имп./с, а его мгновенная мощность в импульсе была около 15 МВт. Длительность вспышки реактора (и это не было неожиданным) составляла примерно 50 мкс. При пролетной базе 1000 м это давало разрешение 0,05 мкс/м.

Для того времени ИБР был неплохим, но не рекордным по разрешению спектрометром по времени пролета. В условиях быстрого прогресса разрешающей способности нейтронных спектрометров это обстоятельство

с самого начала вызывало некоторую озабоченность, стимулировавшую поиски путей повышения интенсивности и разрешающей способности спектрометра. Они, в конечном итоге, привели к созданию ускорителя электронов, служащего инжектором нейтронов. Первоначально это был микротрон на 30 МэВ. Урановая мишень, бомбардируемая электронами, помещалась внутри активной зоны реактора, и в ней генерировались фотонейтроны. Реактор работал при этом в подкритическом режиме — в режиме бустера, умножавшего вспышку нейтронов в 100–200 раз. Выбор микротрона в качестве инжектора объяснялся тем, что микротрон можно было создать в короткий срок и разместить в имевшемся над залом реактора помещении. Эта работа была выполнена совместно сотрудниками Лаборатории нейтронной физики и Института физических проблем АН СССР (лаборатория С. П. Капицы), и в 1964 г. инжектор был введен в действие. Длительность импульса реактора при работе с инжектором сократилась более чем на порядок. При 50 имп./с длительностью 3–4 мкс средняя мощность реактора составляла около 0,5 кВт, т. е. была примерно в шесть раз меньше, чем без инжектора.

С лета 1968 г. реактор ИБР начали применять и в режиме редких импульсов (1 импульс в несколько се-

reactor, its startup and first stages in its practical application were carried out at the Frank Laboratory of Neutron Physics in collaboration with IPPE.

The theory of the IBR reactor was developed by I. I. Bondarenko and Yu. Ya. Stavitsky, and as the startup of the IBR reactor had shown, it proved to be correct.

According to the project, the IBR reactor was intended for the work at an average power of 1 kW, and that very factor predetermined the design of the reactor. At the end of 1960, the reactor was brought to the designed power, and, at the same time, physics neutron-beam experiments commenced. Later it turned out that the ideal power for the reactor (but not for physicists who are always interested in an increased neutron flux) was 3 kW, and thus, that power was mainly used for most work. The reactor used to work in the 5 pulses-per-second mode, and the instantaneous reactor power in a pulse was about 15 MW. Reactor burst duration (and it was not a surprise) was about 50 μ s. At a path length of 1000 m, it would yield a resolution of 0.05 μ s/m. For those times, the IBR represented a rather good but not a record-breaking time-of-flight spectrometer. On the background of a fast progress of resolution of neutron spectrometers, that fact raised some concern from the very beginning

that would encourage the scientists to search for the ways to increase intensity and resolution of the spectrometer. Those attempts resulted in creation of an electron accelerator that assumed the role of neutron injector. Originally, it was a microtron with energy up to 30 MeV. The uranium target bombarded by electrons was placed inside the reactor core, in which photoneutrons were generated. The reactor worked in a subcritical mode, i.e., in booster mode, which resulted in a 100–200 times increase of neutron burst. The microtron was chosen as an injector because it was possible to place it inside the room over the reactor and it could be built within a short time period. That work was conducted by the Frank Laboratory of Neutron Physics in collaboration with the Institute for Physics Problems of the Academy of Sciences of the USSR (the Laboratory of P. L. Kapitza), and in 1964, the injector was put into operation. The pulse length of the reactor that operated along with the injector was reduced by more than one order. At 50 pulses/s with a duration of 3–4 μ s, the average power of the reactor equaled approximately 0.5 kW, which was nearly 6 times less than without the injector.

In summer of 1968, the IBR reactor started to work in a rare pulse mode (1 pulse per several seconds). The average

Дубна, 23 июня. Ветераны Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка и гости — участники общелабораторного семинара «50 лет истории импульсных исследовательских реакторов в Дубне»



Dubna, 23 June. Veterans of the Frank Laboratory of Neutron Physics and guests — participants of the all-laboratory seminar «50 Historic Years of Research Pulsed Reactors in Dubna»

power was 6 kW and the instantaneous power achieved 1 million kW.

In 1968, a new, more advanced design of the reactor was made ready. As a result, in August 1968, the operation of the IBR reactor was stopped, and later on both the reactor and the microtron were dismantled. On 10 June 1969 an advanced analogue of IBR was put into operation.

Along with the work on the reactor upgrading, creation of a more efficient injector started. It was carried out on the basis of linear accelerator LUE-40 as an injector with an energy of 40 MeV and a pulse length of about 1.5 μ s. In March 1970, a complex installation named IBR-30 was put into operation. It worked alternately in two modes. In the first, the so-called reactor mode the reactor power was 25 kW, the frequency was 5 GHz and the burst length was about 70 μ s. That mode was suitable for condensed matter experiments with thermal neutrons. The second mode was the work with an injector at a short neutron pulse (4 μ s); however, with an intensity loss by 3 times. That mode was used in nuclear physics experiments in which resonance separation was crucial.

The operation mechanism of the IBR reactor was quite peculiar. It differs from conventional stationary and what we call pulsed reactors, in which each subsequent pulse is

independent of the previous one. In the IBR reactor, the irradiation pulse is ignited by delayed neutrons produced in previous pulses, and it is necessary that the number of fissions per pulse be sufficient to make up for losses in delayed neutrons emitters. For this purpose, quite definite prompt neutron supercriticality, which is also called pulsed criticality, is required.

The main purpose of the IBR reactor was to solve a rather limited range of spectroscopic problems. Throughout the years, however, a scope of questions has greatly expanded. The enumeration of activities alone carried out at the IBR reactor, as well as a vast scope of research, proves the Frank Laboratory of Neutron Physics to be one of the world's key laboratories dedicated to neutron studies. The discovery of ultracold neutrons [2, 3], first observations of parity nonconservation violations in resonances [4], measurements of magnetic moments of highly excited nuclear states formed as a result of neutron capture, and numerous spectroscopic measurements on a wide range of problems belong to those activities.

At present, the IBR-2 reactor, whose modernization is coming to an end, and IREN, which has just recently been put into operation, represent main neutron sources at the Frank Laboratory of Neutron Physics.

кунд) при средней мощности 6 кВт и мгновенной, достигавшей миллиона киловатт. В августе 1968 г., когда была подготовлена новая, более совершенная конструкция реактора, ИБР был остановлен и демонтирован, включая и микротрон. На месте старого был смонтирован новый реактор, введенный в действие 10 июня 1969 г.

Одновременно с работой по усовершенствованию реактора велись работы по созданию более эффективного инжектора. Он был реализован на основе линейного ускорителя ЛУЭ-40 с энергией 40 МэВ и длительностью импульса около 1,5 мкс. В марте 1970 г. комплексная установка, получившая название ИБР-30, была введена в действие. Она работала попеременно в двух режимах. В первом, реакторной мощностью составляла 25 кВт, частота — 5 Гц и длина вспышки — около 70 мкс. Этот режим был удобен для экспериментов по физике конденсированных сред с тепловыми нейтронами. Второй режим — работа с инжектором при коротком импульсе нейтронов (4 мкс), но с потерей интенсивности в 3 раза. Этот режим применялся в исследованиях по ядерной физике, где существенно было разделение резонансов.

Механизм работы реактора ИБР весьма своеобразен. Он отличается от обычных стационарных реакто-

ров и от тех импульсных реакторов, в которых каждый следующий импульс независим от предыдущего. В реакторе ИБР импульс излучения зажигается запаздывающими нейтронами, созданными в предыдущих импульсах, причем необходимо, чтобы в импульсе происходило столько делений, сколько необходимо для восполнения убыли излучателей запаздывающих нейтронов. Для этого требуется вполне определенная надкритичность по мгновенным нейтронам, которую мы называем импульсной критичностью.

Реактор ИБР был построен для решения сравнительно узкого круга спектроскопических задач. Однако за истекшие годы тематика работ на нем все более и более расширялась. Только перечисление работ, выполненных на ИБР, позволяет сказать, что эти исследования выдвинули ЛНФ в число ведущих нейтронных лабораторий мира. Сюда относятся открытие ультрахолодных нейтронов [2, 3], первые наблюдения нарушения четности в резонансах [4], измерения магнитных моментов высоковозбужденных состояний ядер, образующихся при захвате нейтронов, широкий круг спектроскопических измерений. В настоящее время нейтронные источники в ЛНФ — это ИБР-2, модернизация которого завершается, и установка ИРЕН, вступившая в начальную стадию запуска.

Список литературы / References

1. Франк И. М. // ЭЧАЯ. 1972. Т. 2. С. 807–860 / Frank I. M. // PERAN. 1972. V. 2. P. 807–860.
2. Луциков В. И., Покотилковский Ю. Н., Стрелков А. В., Шапиро Ф. Л. Препринт ОИЯИ РЗ-4127. Дубна, 1968 / Luschikov V. I., Pokotilovsky Yu. N., Strelkov A. V., and Shapiro F. L. JINR Preprint PЗ-4127. Dubna, 1968.
3. Луциков В. И., Покотилковский Ю. Н., Стрелков А. В., Шапиро Ф. Л. // Письма ЖЭТФ. 1969. Т. 9. С. 40 / Luschikov V. I., Pokotilovsky Yu. N., Strelkov A. V., and Shapiro F. L. // JETP Lett. 1969. V. 9. P. 23–26.

4. Alfimenkov V. P., Borzakov S. B., Vo Van Thuan, Mareev Yu. D., Pikelner L. B., Khrykin A. S., Sharapov E. I. Parity Nonconservation in Neutron Resonances // Nucl. Phys. A. 1983. V. 398. P. 93.