

С. И. Тютюнников (от коллаборации «Энергия + трансмутация»)

Подкритическая сборка на пучках релятивистских частиц. Прикладные исследования на пучках тяжелых ионов нуклотрона-М

В отделении научно-методических исследований и инноваций Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ коллаборация «Энергия + трансмутация» проводит исследование подкритической сборки на пучках релятивистских частиц на установке «Квинта». Разрабатывается вариант ядерной энергетической установки, основанной на использовании достижений релятивистской ядерной физики.

В обычном ядерном реакторе атомной электростанции (АЭС) используется обогащенный уран ^{235}U , получаемый из природного урана, в составе которого 99,3% ^{238}U и 0,7% ^{235}U . В таком реакторе используется цепная реакция деления ^{235}U , в которой выделя-

ется энергия, трансформирующаяся в тепловую и затем в электрическую. На реализации такого способа построена современная ядерная энергетика, которая характеризуется: 1) использованием в качестве ядерного горючего легкоделящихся материалов — ^{235}U , а в перспективе ^{239}Pu и ^{233}U ; 2) работой с нейтронами спектра деления (средняя энергия спектра ~ 2 МэВ, максимальная ~ 10 МэВ).

Второй способ получения энергии в современной ядерной энергетике — это разрабатываемые классические электроядерные энергетические схемы (ADS — Accelerator Driven Systems), которые представляют собой подкритический быстрый реактор с внешним ис-

S. I. Tyutyunnikov (on behalf of the collaboration “Energy + Transmutation”)

Subcritical Assembly with Beams of Relativistic Particles. Applied Research on Heavy Ion Beams of the Nuclotron-M

The collaboration “Energy+Transmutation” carries out research of subcritical assembly with beams of relativistic particles on the Quinta setup at the Methodological Research and Innovations Department of VBLHEP, JINR. A variant of nuclear energy setup based on the use of relativistic nuclear physics progress is being elaborated.

In a usual nuclear reactor of the nuclear power station, enriched uranium ^{235}U obtained from natural uranium consisting of 99.3% of ^{238}U and 0.7% of ^{235}U is used. In such a reactor a ^{235}U fission chain reaction takes place. In this reaction the energy is used that is transformed into the heat energy and then into the electrical one. Modern nuclear power engineering is based on realization of this method and it is characterized by: 1) using

easily fissile materials as nuclear fuel — ^{235}U , and ^{239}Pu and ^{233}U in perspective; 2) working with neutrons of the fission spectrum (average spectrum energy ~ 2 MeV, maximum ~ 10 MeV).

The second way to obtain energy in modern nuclear power engineering is the developed classic electronuclear energy schemes (Accelerator Driven Systems, ADS) that represent a subcritical fast reactor with an external source of neutrons. The external source of neutrons is a neutron-producing target limited in size, for instance, $\varnothing 20 \times 60$ cm, located in the centre of the subcritical active zone. Into this zone a narrow proton beam with energy 1 GeV from the accelerator comes through the input. The starting subcriticality of the active zone is in the range $k_{\text{eff}} \sim 0.97 - 0.98$,

точником нейтронов. Внешним источником нейтронов является нейтронопроизводящая мишень ограниченного размера, например, $\varnothing 20 \times 60$ см, размещаемая в центре подкритической активной зоны, в которую по протонопроводу через окно ввода поступает узкий протонный пучок с энергией 1 ГэВ из ускорителя. Стартовая подкритичность активной зоны находится в диапазоне $k_{эфф} \sim 0,97-0,98$ и обеспечивается «запальным» ураном-235. В результате спектр нейтронов в активной зоне ADS-установок формируется так же, как и в обычном реакторе, в основном нейтронами спектра деления.

Анализ показывает существенную ограниченность возможностей традиционных реакторных и классических ADS-систем, основанных на использовании нейтронов спектра деления, в решении ключевых проблем современной атомной энергетики. Это, во-первых, проблема утилизации отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и, во-вторых, проблема вовлечения запасов отработанного урана (^{238}U) и тория в производство энергии.

В настоящее время перспективным и кардинальным решением проблем современной атомной энергетики представляется использование существенно более жесткого, чем делительный, спектра нейтронов.

Для практической реализации этого пути предлагается принципиально новая схема электроядерного метода, основанная на ядерных релятивистских технологиях (ЯРТ).

Схема ЯРТ нацелена на использование максимально жесткого нейтронного спектра, формируемого пучками релятивистских частиц в подкритичной квазибесконечной (обеспечивающей минимальную утечку нейтронов) активной зоне на основе природного (обедненного) урана, тория и ОЯТ, — для утилизации ОЯТ атомных электростанций и производства энергии.

С этой целью программа исследований в ЛФВЭ ОИЯИ основывается на использовании установки «Квинта» (с коэффициентом размножения нейтронов $K = 0,36$) с массой мишени из природного урана ~ 500 кг, которая моделирует центральную область квазибесконечной урановой мишени «Буран». Квазибесконечная урановая мишень «Буран» массой ~ 21 т станет полномасштабной ядерно-физической моделью активной зоны ЯРТ-реактора.

Установка «Квинта» (рис. 1) облучалась дейтронами и ядрами углерода. Действия коллектива коллаборации направлены на расширение, развитие и отработку методов и методик измерений ядерно-физических

and it is obtained with “fuse” uranium-235. As a result, neutron spectrum in the active zone (AZ) of ADS setups is formed in the same way as in the usual reactor, mainly by fission-spectrum neutrons.

The analysis shows a significant limitation of capacities of the traditional reactor and classic ADS systems based on using the fission-spectrum neutrons. In solving key problems of the modern nuclear power engineering this is: 1) utilization problem of the spent nuclear fuel (SNF) and 2) problem of involving the spent uranium (^{238}U) and thorium supply into the energy production.

Today a perspective of radical solution of the modern nuclear power problems is the use of a more rigid neutron spectrum than of the fissile one. For practical realization of this technique, a new scheme of electronuclear method based on the nuclear relativistic technologies (NRT) is suggested.

The NRT scheme is aimed at using the most rigid neutron spectrum formed by beams of relativistic particles in the subcritical quasi-infinite (providing the minimal leakage of neutrons) active zone. The spectrum is formed based on natural (depleted) uranium, thorium, and SNF —

for utilization of nuclear power stations SNF and energy production.

For this purpose, the VBLHEP research programme is based on using the Quinta setup (with multiplication factor $K = 0.36$) with the target mass ~ 500 kg of natural uranium. Quinta models the central area of the Buran quasi-infinite uranium target. The Buran quasi-infinite uranium target with the mass ~ 21 t will become a full-scale nuclear physics model of the NRT-reactor active zone.

The Quinta setup (Fig. 1) was irradiated with deuterons and carbon nuclei. The activity of the collaboration team is aimed at expansion, development and adjustment of the measurement methods and procedures of the processes nuclear physics parameters in the interests of the experiments preparation on the Buran setup.

In 2015, to measure the neutron spectra obtained by irradiating the uranium target of Quinta, devices based on diamond-based detectors [1] (Fig. 2) and liquid scintillators DEMON have been developed.

Testing of the amplitude spectra and their calibration were carried out on the stand using the neutron generator that gives the line $E_n = 14$ MeV.

параметров процессов в интересах подготовки экспериментов на установке «Буран».

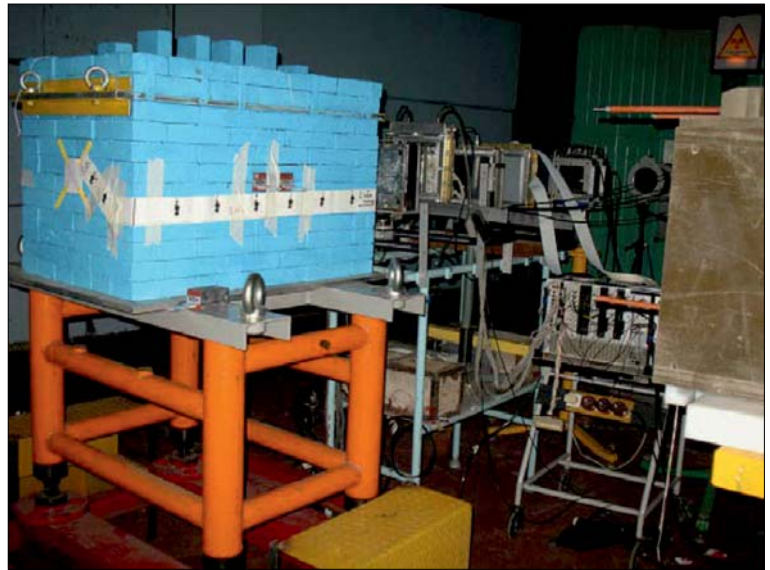
В 2015 г. для измерения спектров нейтронов, получаемых при облучении урановой мишени установки «Квинта», были разработаны устройства на основе алмазных детекторов [1] (рис. 2) и жидких сцинтилляторов DEMON.

Обработка амплитудных спектров, их калибровка осуществлялись на стенде с помощью нейтронного генератора при $E_n = 14$ МэВ.

В сеансе ускорителя нуклотрон-М были проведены измерения угловых распределений нейтронов перпендикулярно оси урановой сборки, которые представлены на рис. 3.

Рис. 1. Установка «Квинта» на позиции облучения

Fig. 1. The Quinta setup on the position of irradiation



a



b

Fig. 2. Electronic unit of specialized tract (a); charge-sensitive preamplifier and a diamond detector in the housing (b)

During the Nuclotron-M run, measurements of the angular distributions of neutrons in transverse direction of the uranium assembly were made, and they are presented in Fig. 3.

To investigate the dependence of the neutron spectrum rigidity on the energy of the primary beam of relativistic particles incident on the uranium assembly, a scintillation spectrometer DEMON is used. A peculiarity of us-

Для исследований зависимостей жесткости нейтронного спектра от энергии падающего на урановую сборку первичного пучка релятивистских частиц применяется сцинтилляционный спектрометр DEMON. Особенность применения детектора заключается в том, что измеряется аппаратный спектр, который является сверткой спектра нейтронов $f(E_n)$ и спектральной чувствительности $\varepsilon(E_n)$:

$$A(N) = \int_0^{E_{\max}} f(E_n) \varepsilon(E_n N) dE_n.$$

Для восстановления функции $f(E_n)$ были проведены измерения аппаратных функций для дискретных значений E_n на пучке ядер нуклотрона-М.

ing the detector is that we measure the apparatus spectrum that is the convolution of the neutron spectrum $f(E_n)$ and spectral sensitivity $\varepsilon(E_n)$:

$$A(N) = \int_0^{E_{\max}} f(E_n) \varepsilon(E_n N) dE_n.$$

В детекторе DEMON сигналы разделялись по времени высвечивания на две группы: легкую группу, содержащую в основном гамма-кванты, а также легкие частицы (электроны, мюоны), и тяжелую группу, содержащую сигналы от нейтронов (протонов отдачи), а также тяжелых заряженных частиц (протонов, дейтронов) из мишени.

Были получены функции отклика для средних энергий нейтронов. В дальнейших экспериментах с релятивистскими ядрами на нуклотроне-М можно будет восстановить спектры нейтронов, полученные при взаимодействии с урановой мишенью, и, соответ-

ственно, определить число делений ^{238}U высокоэнергетической частью спектра.

Экспериментальные исследования, проведенные на установке «Квинта» на пучках дейтронов на нуклотроне-М и на пучках протонов с энергией $E_p = 660$ МэВ на фазотроне, дают значение коэффициента энергетического усиления $k_{yc} \approx 2 \pm 0,2$.

Список литературы

Берлев А.И. и др. Измерения нейтронного потока алмазным детектором в экспериментах на установке «Квинта» // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13, вып. 3.

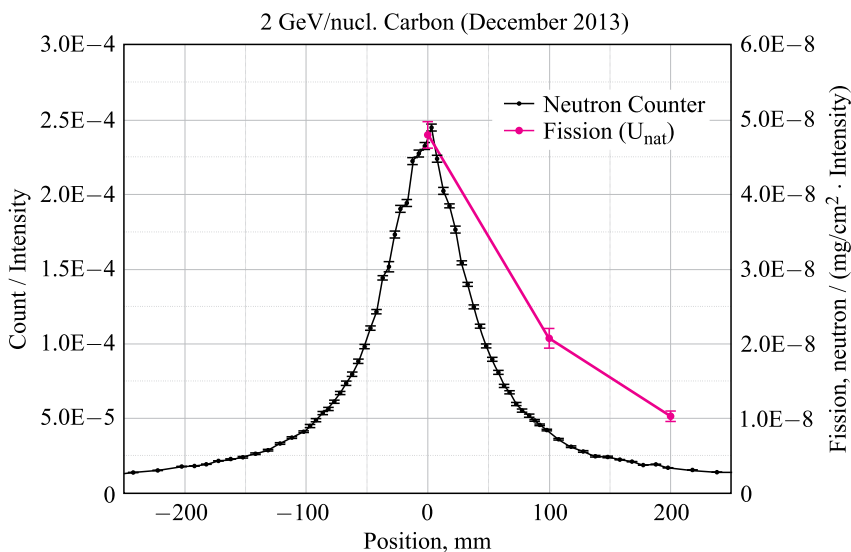


Рис. 3. Профили распределения по оси x на выходе «Квинты». Распределение нейтронного поля с энергией $E_n \geq 10$ МэВ

Fig. 3. Distribution profiles along the x axis at the Quinta exit. Distribution of the neutron field with energy $E_n \geq 10$ MeV

To restore the function $f(E_n)$, hardware features were measured for discrete values of E_n on the Nuclotron-M beam nuclei.

The detector DEMON signals were separated by time decay into two groups: mild group containing mainly gamma rays and light particles (electrons, muons), and heavy group containing signals from neutrons (recoil protons) and heavy charged particles (protons, deuterons) from the target.

The response functions for the medium-energy neutrons were obtained. In subsequent experiments with relativistic nuclei at the Nuclotron-M, the spectra of neutrons produced in the interaction with the uranium target can be

restored, and, thus, the number of fissions of ^{238}U high-energy part of the spectrum can be determined.

Experimental studies with the Quinta on neutron beams at the Nuclotron-M and on beams of protons with energy $E_p = 660$ MeV at the Phasotron give the value of the energy gain coefficient $k_g \approx 2 \pm 0.2$.

References

Berlev A. I. et al. The Measurements of the Neutron Flux by Diamond Detector in Experiments on the Quinta // Part. Nucl., Lett. 2016. V. 13, No. 3.