

*М. Г. Кадыков, С. И. Тютюнников, В. И. Фурман, В. В. Чилап*

## **«Энергия плюс трансмутация»: ядерная энергетика — настоящее и будущее**

Со времен создания ОИЯИ электронuclear тематика занимает важное место в планах исследований, проводимых физиками различных лабораторий Института. Эксперименты по изучению размножения нейтронов в массивных мишенях из тяжелых элементов выполнялись на пучках фазотрона ЛЯП (Р. Г. Васильков, В. И. Гольданский), синхрофазотрона ЛВЭ (К. Д. Толстов, Б. А. Кулаков, проект «Энергия») и нуклотрона ЛФВЭ в рамках широкой международной коллаборации «Энергия плюс трансмутация» (М. И. Кривопустов). Существенный вклад в компьютерное моделирование процессов в электронuclear системах был внесен учеными ЛИТ (ЛВТА) (В. С. Барашенков). К настоящему времени эксперименты по электронuclear тематике, проводимые на модернизированном ускорителе нуклотрон-М ЛФВЭ, объединяют физиков ЛФВЭ, ЛНФ, ЛЯП, ЛИТ, представителей десяти стран-участниц ОИЯИ, а также пяти сотрудничающих с Институ-

том стран (Австралия, Германия, Греция, Индия и Сербия). И такой неизменный интерес к данным исследованиям представляется не случайным, если задуматься о том, что альтернативы ядерной энергетике как в ближайшие десятилетия, так и в обозримом будущем не существует [1].

Традиционная атомная энергетика, основанная на использовании в качестве топлива урана, обогащенного изотопом  $^{235}\text{U}$  или  $^{239}\text{Pu}$ , позволила бы, в принципе, решить энергетические проблемы человечества (при условии реализации расширенного воспроизводства топлива), если бы удалось свести к минимуму вероятность аварий с выбросом радиоактивности в окружающую среду, а также создать приемлемую технологию переработки и утилизации отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и долговременного хранения высокоактивных радиоактивных отходов (РАО).

*M. G. Kadykov, S. I. Tyutyunnikov, V. I. Furman, V. V. Chilap*

## **«Energy plus Transmutation»: Nuclear Power — the Present and the Future**

Since the foundation of JINR the electronuclear subjects have occupied an important place in plans of the research performed by physicists at various laboratories of the Institute. Experiments on studying neutron multiplication in massive targets from heavy elements were carried out on beams of the synchrocyclotron of the LNP (R. G. Vasilkov, V. I. Goldansky), the synchrophasotron of the LHE (K. D. Tolstov, B. A. Kulakov, the project «Energy») and the Nuclotron of the VBLHEP within the limits of a wide international collaboration «Energy plus Transmutation» (M. I. Krivopustov). The essential contribution to computer modeling of processes going in electronuclear systems has been brought by scientists of LIT (LCTA) (V. S. Barashenkov). By this time, experiments on the electronuclear topics carried out on the modernized Nuclotron-M of VBLHEP bring together physicists from VBLHEP, FLNP, DLNP, LIT, representatives of ten JINR Member States and also five countries co-operating with the Institute (Australia, Germany, Greece, India, and Serbia). And such interest in this topic does not seem an incidental one if one reflects that alternatives to nuclear power

in the next decades and in the foreseeable future do not exist [1].

The traditional atomic power based on use of natural uranium as fuel, enriched with an isotope  $^{235}\text{U}$  or  $^{239}\text{Pu}$ , would allow one to solve, basically, power problems of mankind (under condition of the expanded reproduction of fuel), if it were possible to reduce to a minimum the probability of incidents with radioactivity emission into environment and also to create comprehensible technology of processing and recycling of the used nuclear fuel (UNF) and long-term storage of highly active radioactive waste (RAW).

In immediate prospects, using traditional reactor technologies, not capital expenses but those on the recycling of UNF, maintenance of nonproliferation mode and for a conclusion from operation of the blocks which have fulfilled the resource will be the basic expenses in atomic power station life cycle. It will lead to an unreasonable rise in price of energy and can essentially slow down world economic development. Another key problem of traditional atomic power is limitation of  $^{235}\text{U}$  stocks — in its power equivalent

В ближайшей перспективе при использовании традиционных реакторных технологий основными затратами в жизненном цикле АЭС будут не капитальные затраты, а расходы на обращение с ОЯТ, обеспечение режима нераспространения и вывод из эксплуатации блоков, отработавших свой ресурс. Это приведет к непомерному удорожанию энергии и может существенно замедлить мировое экономическое развитие. Еще одной ключевой проблемой традиционной атомной энергетики является ограниченность запасов урана-235 — в энергетическом эквиваленте его не больше, чем нефти и газа [1], поэтому говорить об атомной энергетике, основанной только на обогащенном уране, как о полноценной альтернативе органическому топливу, по меньшей мере, некорректно.

Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) были выработаны следующие основные требования к ширококомасштабной ядерной энергетике: 1) наличие запасов сырья для производства ядерного топлива на сотни лет; 2) эквивалентность количества добытой из Земли радиоактивности и радиоактивности, захороненной в ней, образовавшейся в результате работы АЭС; 3) обеспечение условий, гарантирующих нераспространение ядерного оружия; 4) естественная безопасность установок с ядерным топливом.

Условием, определяющим, быть или не быть ширококомасштабной ядерной энергетике, является выполнение 1-го требования МАГАТЭ. Действительно, если нет соответствующих запасов сырья, то нет и предмета для обсуждения. На Земле имеются значительные запасы урана-238 и тория-232, которые потенциально могут обеспечить все энергетические потребности человечества в течение нескольких тысяч лет. Однако в традиционных реакторах они практически гореть не могут.

Альтернативным способом получения атомной энергии может служить использование управляемых ускорителем подкритических размножающих систем, называемых в России электроядерными [2]. Английская аббревиатура классических электроядерных установок — ADS (Accelerator Driven Subcritical) системы.

Идея впервые была высказана во времена бурного развития физики ускорителей еще в 1950-е гг. Однако по ряду причин, в том числе и технологического характера, на практике она реализована не была. К ней вернулись существенно позже — в начале 1990-х гг., на волне осмысления причин и последствий Чернобыльской аварии. В этой технологии протоны с энергией около 1 ГэВ облучают мишень из тяжелого металла (Bi, Pb), находящуюся в центре подкритической активной зоны, в результате чего рождаются быстрые нейтроны.

no more than oil and gas [1]; therefore, to speak about the energy production based only on enriched uranium as about high-grade alternative to organic fuel is at least incorrect.

According to the International Atomic Energy Agency (IAEA), the large-scale nuclear power should meet the following basic requirements: 1) presence of stocks of raw materials for manufacture of nuclear fuel for hundreds of years; 2) equivalence of quantity of the radioactivity extracted from the Earth and radioactivity buried in it, formed as a result of work by the atomic power station; 3) maintenance of the conditions guaranteeing nonproliferation of the nuclear weapon; 4) natural safety of installations with nuclear fuel.

The issue that defines if large-scale nuclear power is «to be or not to be» presupposes the fulfillment of IAEA requirement 1. Really, if there are no corresponding stocks of raw materials there is no subject for discussion. On the Earth there are considerable stocks of uranium-238 and thorium-232 which can potentially provide all energy needs of mankind during several thousand years. However, in traditional reactors they practically cannot burn.

An alternative way to produce atomic energy is to use accelerator-driven subcritical multiplying systems, named

in Russia electronuclear [2] ones. An English abbreviation of classical electronuclear installations is an ADS (accelerator-driven subcritical) system.

The idea has been proposed for the first time at the period of active development of accelerator physics in the 1950s. However, for some reasons, including technological ones, in practice it has not been realized. It has returned essentially later — in the early nineties, on a wave of evaluation of the reasons and consequences of the Chernobyl accident. In this technology protons with energy about 1 GeV irradiate a target from heavy metal (Bi, Pb), being in the centre of a subcritical active zone where fast neutrons are born. Neutrons cause fission of the active zone material (U, Pu) and the heat produced by this process allows producing energy. Such a system is safely operated. And by that it naturally satisfies requirement 4 of IAEA.

Research of physical aspects of an electronuclear way of energy production is actively conducted today in laboratories of many scientific centres of the world, including the USA, Germany, France, Sweden, Switzerland, Japan, Russia, Belarus, China, India, etc. Large national projects aimed at development of demonstration prototypes of industrial ADS systems in Japan (JPARC), the USA (RACE) and

Нейтроны вызывают деление материала (U, Pu) активной зоны, теплосъем с которой позволяет производить энергию. Такая система легко и безопасно управляема. И тем самым удовлетворяет 4-му требованию МАГАТЭ.

Исследования физических аспектов электроядерного способа получения энергии сегодня активно проводятся в лабораториях многих научных центров мира, в том числе в США, Германии, Франции, Швеции, Швейцарии, Японии, России, Белоруссии, Китае, Индии и др. Осуществляются крупные национальные проекты создания демонстрационных прототипов промышленных ADS-систем в Японии (JPARC), США (RACE) и совместный европейский проект EUROTRANS. В России ряд исследований с облучением малых мишеней на прямых протонных пучках ведется в ИТЭФ. Эксперименты же с долгоживущими осколками деления и трансураниевыми мишенями как на прямых пучках, так и в потоках испарительных нейтронов проводились только в ОИЯИ, который здесь является лидером. Эти работы по изучению трансмутации долгоживущих отходов, в первую очередь  $^{129}\text{I}$  и младших актинидов  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{238,239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ , в течение ряда последних лет проводятся в рамках широкой международной коллаборации на подкритической  $^{238}\text{U}/\text{Pb}$  уста-

новке «Энергия плюс трансмутация» на пучках нукло-трона ЛФВЭ.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований классических ADS-систем выявили ряд их серьезных недостатков. Дело в том, что стартовая подкритичность рассматриваемых активных зон является достаточно высокой ( $k_{\text{eff}} \sim 0,97 \div 0,98$ ) благодаря включению в них урана-235 и/или плутония-239. Поэтому спектр нейтронов в активной зоне ADS-системы формируется в основном нейтронами деления и является близким к реакторному спектру. Жесткая же часть нейтронного спектра, образованного в процессе внутриядерного каскада, который вызывается релятивистским пучком иницирующих протонов, дает относительно малый вклад в полный нейтронный спектр. Таким образом, при работе классической ADS-системы с использованием в качестве базового материала активной зоны естественного урана или тория наряду с осколками деления образуются плутоний-239 или уран-233, а также минорные актиниды, которые осложняют управление системой. При этом использование для «выжигания» нарабатываемых минорных актинидов жесткой части спектра нейтронов становится неэффективным из-за большого вклада делительного нейтронного спектра, ведущего к их образованию.

the joint European project EUROTRANS are carried out. In Russia some studies of small target irradiation on direct proton beams is conducted at ITEP, Moscow. Experiments with long-lived fission products and transuranium targets both on direct beams and in evaporation neutron fields were carried out only at JINR, which is the leader in this area of investigation. The work on studying a transmutation of long-living radioactive waste, first of all,  $^{129}\text{I}$  and minor actinides  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{238,239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ , has been conducted in the last few years within the framework of a wide international collaboration on the basis of the subcritical  $^{238}\text{U}/\text{Pb}$  setup «Energy plus Transmutation» with beams of the VBLHEP Nuclotron.

Results of theoretical and experimental research of classical ADS systems have revealed a number of their serious drawbacks. The matter is that the starting subcriticality of the considered active zones is high enough ( $k_{\text{eff}} \sim 0,97 \div 0,98$ ), thanks to inclusion of  $^{235}\text{U}$  and/or  $^{239}\text{Pu}$  into them. Therefore, the spectrum of neutrons in such an active zone of the ADS system is formed basically by fission neutrons and is close to the reactor spectrum. The high-energy part of the neutron spectrum formed in the course of the intranuclear cascade, which is caused by a relativistic beam

of initiating protons, gives rather small contribution to the full neutron spectrum. Thus, the work of the classical ADS system using as a base material an active core of natural uranium or thorium gives rise to  $^{239}\text{Pu}$  or  $^{233}\text{U}$  along with fission products as well as minor actinides which complicate management of the system. Thus, the use of high-energy («rigid») part of a neutron spectrum for «burning out» minor actinides becomes inefficient because of the dominative contribution of the fission neutron spectrum leading to their formation.

Recently on the basis of experimental and theoretical studies of different years, carried out in some Russian scientific centres including JINR [3–5], a fundamentally new scheme of the nuclear relativistic technology (NRT) of energy production was proposed [6]. This scheme is based on an effective utilization of a high-energy part of the neutron spectrum formed in the course of irradiation of the deep subcritical active zone with relativistic particles.

The idea of NRT is in return to a quasi-infinite active zone of the natural or depleted uranium or thorium as was proposed in papers on electronuclear breeding, executed in different years at JINR [3, 5]. Such active zones are deeply subcritical. As was shown by G. I. Marchuk in 1958 [7],

Недавно на основе экспериментальных и теоретических исследований разных лет, проведенных в ряде научных центров России, включая ОИЯИ [3–5], была предложена принципиально новая схема ядерной релятивистской технологии (ЯРТ) получения энергии [6]. Эта схема базируется на эффективном использовании жесткой части нейтронного спектра, образующегося в процессе облучения глубоко подкритичной активной зоны релятивистскими частицами.

Идея ЯРТ состоит в возврате к квазибесконечной активной зоне из природного (обедненного) урана или тория, как это и предлагалось в работах по электроядерному бридингу, выполненных в разные годы в ОИЯИ [3, 5]. Такие активные зоны глубоко подкритичны. Г. И. Марчуком еще в 1958 г. было показано [7], что только в глубоко подкритичной системе можно перейти к спектру нейтронов, который определяется внешним источником, т. е. получить существенно более жесткий, по сравнению с делительным, спектр нейтронов. Это позволяет «сжигать» для производства энергии базовый материал активной зоны — природный (обедненный) уран или торий — и одновременно использовать большой набор конкурирующих между собой неупругих реакций для целей трансмутации долгоживущих

ядер, образующихся в процессе работы электроядерной системы.

В схеме ЯРТ предполагается повысить энергию первичного протонного/дейтронного пучка до  $10 \div 20$  ГэВ. Это позволит на порядок снизить требуемый ток ускорителя при той же мощности пучка и значительно повысить долю энергии пучка, идущую на генерацию жесткого нейтронного поля в объеме активной зоны. Повышение энергии падающего пучка позволит задействовать важный дополнительный механизм повышения жесткости нейтронного спектра — мезообразование. При этом, в отличие от классических ADS-систем, существенно упрощается решение проблем окна ввода пучка в активную зону и охлаждения нейтронопроизводящей мишени.

Важной и весьма привлекательной особенностью схемы ЯРТ является возможность ее использования для утилизации отработанных тепловыделяющих сборок (ТВС), содержащих отработанное ядерное топливо, без их сложной радиохимической переработки и разделения. Длительное облучение элементов ТВС жестким нейтронным спектром в ЯРТ-системе позволит обеспечить значительное снижение долгоживущей активности ОЯТ и объемов захораниваемых РАО при

only in deeply subcritical system it is possible to obtain a neutron spectrum which is defined by an external source, i.e., to obtain it essentially more rigid, in comparison with fission neutron spectrum. It makes it possible to «burn» a base material of an active zone — the natural (depleted) uranium or thorium, for energy production — and simultaneously to use the rich set of inelastic reactions competing among themselves for a transmutation of the long-lived nuclides formed in the course of work of the electronuclear system.

In the scheme of NRT it is supposed to raise energy of a primary proton/deuteron beam to  $10 \div 20$  GeV. It allows us to lower 10 times the demanded flux of the accelerator at the same power of a beam and considerably to raise the share of energy of the bunch, going on generation of a high-energy part of neutron field within the volume of the active zone. An increase of the incident beam energy allows one to involve such an important additional mechanism of increase of rigidity of a neutron spectrum as meson production. Thus, unlike classical ADS systems, the solution of problems of a window for beam introduction into the active core and cooling neutron-productive target essentially becomes simpler.

The important and quite attractive feature of the NRT scheme is a possibility of its use for recycling exhaust fuel element assemblies (FEA), containing the waste nuclear fuel, without their difficult radiochemical processing and separation. The long irradiation of FEA by a rigid neutron spectrum in the NRT system will allow one to provide considerable decrease in long-living activity of UNF and volumes of the buried RAW, at essential increase of its technical and economic indicators.

Thus, by means of the proposed NRT scheme it is possible to satisfy all the four fundamental requirements of IAEA to large-scale nuclear power, including those on non-proliferation of the nuclear weapon and preservation of radiating background of the Earth.

The analysis of physics and technical features, prospects and technological readiness for realization of the NRT scheme for power production and processing of UNF carried out leans against rather convincing arguments [6]. However, it is based, appreciably, on extrapolation of available results of experimental and theoretical works [3–5]. It is obvious that there are not enough data available today and computation methods derived up to now for designing of prototypes of plants based on this new scheme of an elec-

существенном повышении ее технико-экономических показателей.

Таким образом, с помощью предложенной схемы ЯРТ принципиально возможно выполнить все четыре фундаментальных требования МАГАТЭ к широкомасштабной ядерной энергетике, в том числе по нераспространению ядерного оружия и сохранению радиационного фона Земли.

Проведенный анализ физико-технических особенностей, перспективности и технологической готовности к реализации схемы ЯРТ для энергетике и переработки ОЯТ опирается на весьма убедительные аргументы [6]. Однако он в значительной мере основан на экстраполяции имеющихся результатов экспериментальных и расчетно-теоретических работ [3–5]. Очевидно, что имеющихся к настоящему времени совокупных данных и расчетных методов недостаточно как для проектирования прототипов промышленных установок на основе этой новой схемы электроядерного метода, так и для принятия соответствующих экономически обоснованных политических решений.

Именно поэтому на базе ОИЯИ разработана комплексная целевая программа, имеющая целью экспериментальную демонстрацию эффективности схемы ЯРТ для энергетических систем, включая переработку ОЯТ. Выполнение программы предполагается осуществить в рамках широкой научно-технической кооперации в составе: ОИЯИ (ЛФВЭ,

ЛНФ, ЛЯП и др.), ЦФТП «Атомэнергомаш» (Москва), ГНЦ РФ ФЭИ (Обнинск), НПО «Луч» (Подольск), ОИЭИЯИ «Сосны» НАН Белоруссии, ИФ НАН Белоруссии, а также с привлечением членов международной коллаборации «Энергия плюс трансмутация». Наличие положительного опыта совместной работы, включая многолетние плодотворные эксперименты этой коллаборации в ОИЯИ, а также комплекс работ, выполненных по инициативе ЦФТП «Атомэнергомаш» в 2008–2009 гг. в ОИЯИ и ПИЯФ РАН, позволяют надеяться на успешную реализацию намеченной программы исследований. Очень важно, что именно в ОИЯИ имеются уникальные технические возможности для выполнения планируемых экспериментов, а именно: работающий ускоритель релятивистских частиц нуклотрон, необходимый набор делящихся материалов и отработанные методики измерений.

Исследования по ядерной релятивистской технологии должны стать одним из ключевых звеньев инновационного пояса ОИЯИ.

tronuclear method, and for making economically well-founded political decisions.

For this reason, on the basis of JINR the special programme aimed at experimental demonstration of feasibility and efficiency of the NRT scheme for power production systems, including processing of UNF, is developed. The programme performance is supposed to be carried out within the framework of wide scientific and technical cooperation of JINR (VBLHEP, FLNP, DLNP, etc.), CPTP «Atomenergomash» (Moscow), SSC RF IPPE (Obninsk), SPC «LUCH» (Podolsk), JIPNR-Sosny and IP of Belarus NAS, and members of the international collaboration «Energy plus Transmutation». The presence of positive experience of teamwork, including long-term fruitful experiments of this collaboration at JINR, as well as the set of work executed at the initiative of CPTP «Atomenergomash» in 2008–2009 at JINR and PINP RAS (Gatchina), allows us to hope for successful realization of the planned programme of research. It is very important that the exactly unique technical possibilities for performance of planned experiments, namely, the working accelerator of relativistic particles Nuclotron, necessary stock of fissile materials, and the adjusted measurement techniques at JINR are available.

Research on nuclear relativistic technology should become one of the key links of the JINR innovative belt.

## Список литературы / References

1. Субботин В. И. // ЭЧАЯ. 1998. Т. 29. С. 333 / *Subbotin V. I.* // Part. Nucl. 1998. V. 29. P. 333.
2. Васильков Р. Г. и др. // Атомная энергия. 1970. Т. 29, вып. 3. С. 151–158 / *Vasil'kov R. G. et al.* // Atomic Energy. 1970. V. 29, No. 3. P. 151–158.
3. Васильков Р. Г. и др. // Атомная энергия. 1978. Т. 44, вып. 4. С. 329 / *Vasil'kov R. G. et al.* // Atomic Energy. 1978. V. 44, No. 4. P. 239.
4. Юревич В. И. и др. Препринт ОИЯИ P1-2005-79. Дубна, 2005 / *Jurevich V. I. et al.* JINR Preprint P1-2005-79. Dubna, 2005.
5. Баращенко В. С. и др. Препринты ОИЯИ P2-91-422. Дубна, 1991; P2-92-125. Дубна, 1992; P2-92-285. Дубна, 1992 / *Barashenkov V. S. et al.* JINR Preprints P2-91-422. Dubna, 1991; P2-92-125. Dubna, 1992; P2-92-285. Dubna, 1992.
6. <http://cftp-aem.ru/Pages/05.html>.
7. Марчук Г. И. Численные методы расчетов ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1958 / *Marchuk G. I.* Numerical Methods for Calculations of Nuclear Reactors. M.: Atomizdat, 1958.