

ОБЗОРЫ

УДК 621.039.67:530.145

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ БУДУЩЕГО

¹Тертышник Э.Г., ²Епифанова И.Э.

¹ФГБУ «Научно-производственное объединение «Тайфун» Росгидромета РФ, Обнинск, e-mail: edtertysh23@yandex.ru;

²ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии», Обнинск, e-mail: epifan.obninsk@gmail.com

Данная работа представляет собой обзор и анализ успешно проведенных экспериментальных исследований отечественных и зарубежных специалистов, дающих основание для подтверждения существования явления низкоэнергетических ядерных реакций (НЭЯР), имеющих место при температурах от 20 до 1400 °С, и возможности получения экологически чистой ядерной энергии на основе подобных ядерных реакций. Приведено краткое описание существующих общих принципов получения ядерной энергии – как путем слияния легких ядер, так и в процессе деления тяжелых ядер. Отмечено отсутствие существенных достижений при создании установок управляемого термоядерного синтеза. Показаны многообещающие преимущества энергетики, основанной на низкоэнергетических ядерных реакциях, по сравнению с современной ядерной энергетикой: запасы топлива – водород и дейтерий на Земле практически неисчерпаемы. К тому же энергетика, основанная на НЭЯР, экологически безопасна, и, следовательно, можно приблизить производителя энергии к её потребителю и тем самым значительно снизить стоимость электроэнергии. Отмечено, что разработка адекватной теории низкоэнергетических ядерных реакций и трансмутации элементов в условиях низких температур является важным фактором для овладения новой технологией в ядерной энергетике и для окончательного признания феномена НЭЯР официальной наукой.

Ключевые слова: экологически безопасная энергетика, ядерный синтез, энергия связи, дейтерий, трансмутация, низкоэнергетическая ядерная реакция

EXPERIMENTAL RESEARCHS OF POSSIBILITY OF THE APPLICATION OF LOW ENERGETIC NUCLEAR REACTIONS IN THE FUTURE ENERGETICS

¹Tertyshnik E.G., ²Epifanova I.E.

¹Research and Production Association «Typhoon» of Roshydromet RF, Obninsk, e-mail: edtertysh23@yandex.ru;

²Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, e-mail: epifan.obninsk@gmail.com

This work is a review and analysis of successfully carried out experimental studies of Russian and foreign experts, giving a basis for confirming the existence of the phenomenon of low energy nuclear reactions (LERN), which occur at temperatures from 20 °C to 1400 °C, and for demonstration of possibility of obtaining the environmentally safe nuclear energy based on such nuclear reactions. A brief description of the existing general principles for obtaining nuclear energy, both by fusion of light nuclei and in the process of fission of heavy nuclei, is given. The absence of significant achievements in the creation of controlled thermonuclear fusion plants was noted. The promising advantages of energy based on low energy nuclear reactions, compared with modern nuclear energy, are shown: fuel reserves -hydrogen and deuterium on the Earth are practically inexhaustible. In addition, energy based on LERN is environmentally safety, and therefore it is possible to bring the energy producer closer to its consumer and thereby significantly reduce the cost of electricity. It was noted that the development of an adequate theory of low energy nuclear reactions and transmutation of elements at low temperatures is an important factor for mastering new technology in nuclear energy and for the final recognition of the LERN phenomenon as official science.

Keywords: environmental safe energy, nuclear fusion, binding energy, deuterium, transmutation, low energy nuclear reaction

Производство электроэнергии на АЭС и переработка отработавшего ядерного топлива связаны с образованием значительных объемов радиоактивных отходов. Это обстоятельство, наряду с негативным отношением населения к ядерной энергетике, которое возникло из-за опасений повторения радиационных катастроф, подобных Чернобыльской, привело к тому, что ряд стран отказывается от развития ядерной энергетике.

Современная ядерная энергетика, использующая энергию, выделяющуюся при

делении тяжёлых ядер (²³⁵U и ²³⁹Pu), имеет ограниченные запасы сырьевых ресурсов и сопровождается образованием больших объемов долгоживущих радиоактивных отходов. Поэтому возможные перспективы ядерной энергетике основаны на получении энергии, которая освобождается при слиянии лёгких ядер (реакции ядерного синтеза) и ядерных реакциях, связанных с трансмутацией ядер.

Цель работы – привлечь внимание исследователей к проблеме использования

НЭЯР в энергетике, чтобы расширить круг инженеров и научных сотрудников, работающих над тематикой экологически чистой ядерной энергии.

Ядерная энергия (принцип получения)

В реакциях синтеза энергия выделяется при слиянии ядер легких элементов и образовании более тяжелых ядер. Например, при слиянии двух протонов (ядер водорода) образуется ядро дейтерия (${}^2\text{H} = \text{D}$) и выделяется 2,2 МэВ энергии: $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu$. Подобные реакции широко распространены в природе – считается, что энергия звезд, и в том числе Солнца, производится в результате цепочки ядерных реакций синтеза, превращающих четыре ядра атома водорода в ядро гелия [1; 2].

Из-за наличия кулоновского отталкивания между ядрами сечения реакций при низкой энергии частиц ничтожно малы, и поэтому при обычной температуре смесь изотопов водорода и других легких атомов практически не реагирует. Для того чтобы реакция имела заметное сечение, сталкивающимся частицам нужно иметь большую кинетическую энергию. Тогда частицы смогут преодолеть кулоновский барьер, сблизиться на расстояние порядка ядерных и прореагировать. Например, максимальное сечение для реакции дейтерия с тритием достигается при энергии частиц около 80 КэВ, а для того чтобы в смеси DT иметь большую скорость реакций, ее температура должна быть масштаба ста миллионов

градусов, $T = 10^8$ °К. Проблема получения ядерной энергии путём слияния лёгких ядер в условиях сверхвысоких температур, реализованная в виде установок (реакторов) управляемого термоядерного синтеза (УТС), до настоящего времени не решена [1; 2].

В мировом океане дейтроны (ядра дейтерия) постоянно образуются при захвате тепловых нейтронов свободными протонами: $n + p \rightarrow d + \gamma$. Рассчитаем энергию, выделяющуюся в этой реакции, используя табличные значения массы ядер нейтрона, протона и дейтрона, приведённые в [3]. В таблице масса ядер приводится в энергетических единицах (кэВ) согласно соотношению массы и энергии Эйнштейна: $E = mc^2$.

Масса нейтрона	8071 кэВ,
масса протона	7289 кэВ
Сумма	15360 кэВ
Масса ядра дейтрона	13136 кэВ

Энергия, полученная в результате реакции синтеза, 2224 кэВ (энергия на один нуклон – 1112 кэВ).

Для разделения ядра дейтрона на нейтрон и протон необходимо затратить точно такую энергию (2224 кэВ), поэтому эту величину называют энергией связи. На рис. 1 приведена зависимость энергии связи, рассчитанная на один нуклон, от массового числа ядра, из которого видно, что изотопы водорода являются наиболее эффективным топливом при использовании реакций ядерного синтеза [2].

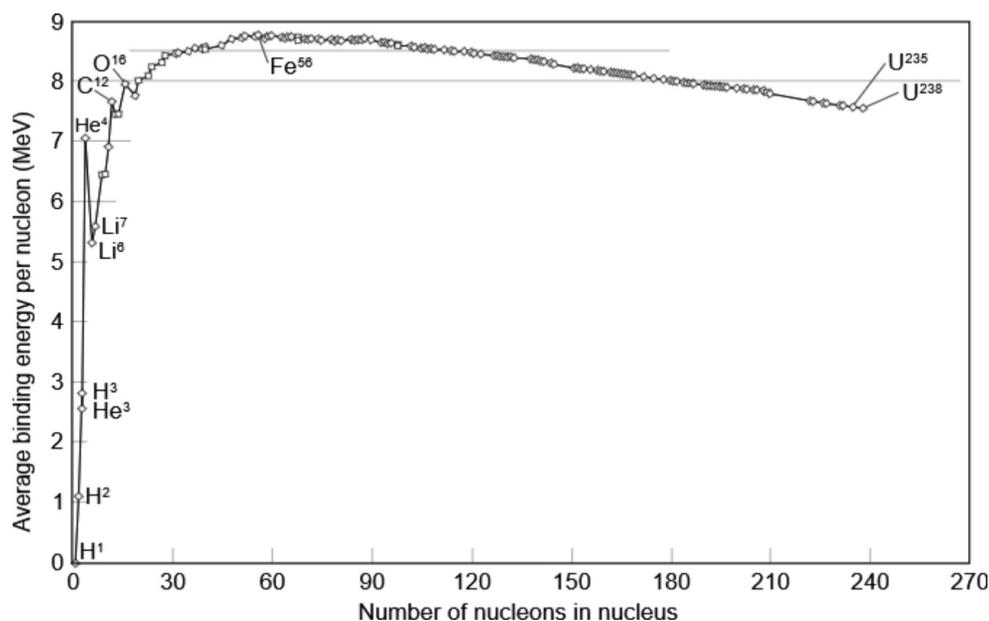
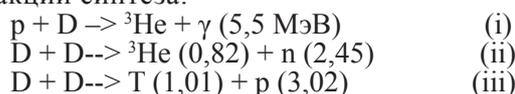


Рис. 1. Зависимость энергии связи (на один нуклон) от массового числа ядер

Эксперименты по изучению возможностей проведения реакций ядерного синтеза при низких температурах

В обзоре [4] описан эксперимент по разложению тяжелой воды электролизом на кислород и дейтерий: при этом в процессе растворения палладиевого катода в нем происходят реакции ядерного синтеза. Нейтронное излучение, так же как и радиоактивные отходы, при этом отсутствовало. Автор приведенной работы Филимоненко И.С. создал гидролизную энергетическую установку, предназначенную для получения энергии от реакций «теплого» ядерного синтеза, идущих при температуре всего 1150 °С. Реактор представлял собой металлическую трубу диаметром 41 мм и длиной 700 мм, изготовленную из сплава, содержащего несколько граммов палладия. Топливом служил дейтерий, сорбированный палладием. Заявка на изобретение «Процесс и установка термоэмиссии» [5] была отклонена Государственной патентной экспертизой на том основании, что термоядерные реакции не могут идти при столь низкой температуре. Таким образом, приоритет открытия холодного ядерного синтеза (ХЯС) советским изобретателем не был зафиксирован. Интерес к проблеме ХЯС возник после публикации [6]: в работе М. Флейшмана и С. Понса сообщалось об обнаружении нового явления в науке – ядерного синтеза при комнатной температуре в процессе насыщения электролитическим путем палладия дейтерием при проведении электролиза в тяжелой воде с палладиевым катодом. При этом наблюдалось выделение избыточного тепла, рождение нейтронов и гамма-квантов, а также образование трития. Для возникновения ХЯС существенным является влияние кристаллической решетки насыщенного дейтерием металла (Pd, W, Pt), под воздействием которой величина кулоновского барьера снижается. Авторы [6] могли наблюдать результаты следующих реакций синтеза:



Надо отметить, что результаты [6] оказались плохо воспроизводимыми. В работе [7] выдвинуто предположение, что причина неудач исследователей, пытавшихся воспроизвести результаты [6], связана с тем, что для получения интенсивного выделения тепла [6] необходимо вести электролиз очень продолжительное время – 66 суток (5,6·10⁶с). Можно предположить, что наблюдаемое интенсивное выделение

тепла связано с воздействием космического излучения, а время, в течение которого необходимо проводить электролиз для регистрации всплеска тепловыделения, определяется частотой возникновения широких атмосферных ливней в месте расположения установки. Только после того, как работы [6; 7] стали широко известны, Филимоненко И.С. удалось опубликовать свои результаты в сборнике, малодоступном для большинства учёных [8].

Описаны результаты эксперимента по инициированию реакции ХЯС в процессе ультразвуковой кавитации в тяжелой воде. Зарегистрирован достоверный (максимальное превышение над уровнем естественного фона 12σ) выход нейтронов как следствие инициированной реакции синтеза (ii) при кавитации суспензии мелкодисперсного дейтерида LaNi₅D_{5,5}. В то время как при ультразвуковом воздействии на тяжелую воду, в которой отсутствовали взвеси, число зарегистрированных нейтронов не превышало фоновых значений [9].

Эксперименты по изучению возможности проведения низкотемпературной трансмутации ядер

Производство экологически чистой ядерной энергии возможно не только при ХЯС, но также в результате трансмутации ядер, имеющей место при сравнительно низких температурах – холодная трансмутация ядер (ХТЯ). В последнее время процессы ХЯС и ХТЯ объединяют термином «низкоэнергетические ядерные реакции» (Low Energy Nuclear Reactions – LENR). При трансмутации некоторый набор стабильных нуклидов переходит в другой наиболее энергетически выгодный набор стабильных нуклидов с выделением энергии, а также процессов взаимодействия ядер с электронами, позитронами и нейтрино [10].

В [11] описана работа теплогенератора России E-cat (Energy Catalyzer), в котором ядерная энергия генерируется как результат ХТЯ. В 2014 г. группа международных экспертов провела испытания варианта теплогенератора России. Как сообщается в отчете об испытаниях [12; 13], устройство представляет собой керамическую трубку (Al₂O₃), внутри которой помещено топливо – смесь 1 г порошка никеля 0.1 г алюмогидрида лития (LiAlH₄) с намотанной на её поверхности нагревательной спиралью. С помощью этой спирали трубка с топливом нагревалась до 1260–1400 °С. В процессе тестирования велся контроль количества электроэнергии, затраченной на нагрев, и количества тепловой энергии, генерированной установкой. Указано,

что в течение 32 суток испытаний устройство произвело 5800 Мдж тепла, что более чем в 3 раза превышало энергию, израсходованную на электроподогрев. Отработавшее топливо подвергли масс-спектрометрическому анализу, которые обнаружили существенные изменения в изотопном составе топлива, однозначно свидетельствующие о ядерном происхождении полученной энергии. На основании данных [11; 12] в работе [14] показано, что ядерная энергия, генерируемая E-cat, обусловлена трансмутацией ядер ^{58}Ni в ^{62}Ni , а затраченная на нагрев энергия равна энергии, необходимой для преобразования ^7Li в ^6Li и превращения протонов (ядер водорода) в нейтроны. Делается вывод [14] о соблюдении закона сохранения энергии при работе тестируемого устройства. Но наблюдения закона сохранения недостаточно для адекватного объяснения функционирования теплогенератора Росси. Возможно, как и в рассмотренных ранее экспериментах, существенным является взаимодействие протонов с кристаллической решёткой никеля, которое позволяет превращать протоны в нейтроны путём обратного бета-процесса с участием электронов и нейтрино [10].

Сообщается о создании российскими учёными никель-водородного реактора, непрерывно проработавшего 7 месяцев [15]. В отличие от устройства Росси [11], в котором применялся твёрдотельный источник протонов (LiAlH_4) и нейтронов (^7Li), в этом теплогенераторе в качестве источника протонов использовался газообразный водород, сорбированный никелем. В результате улучшилась стабильность работы, но существенно снизилась (более чем в 8 раз) мощность устройства. Отметим, что изотопный состав никеля в от-

работавшем топливе не изменился, а в поверхностном слое керамической трубки, соприкасающемся с порошком никеля, появились значительные количества кальция и кремния [15]. Это может свидетельствовать о реакциях $p + ^{27}\text{Al} = ^{28}\text{Si} + 116 \text{ keV}$ и $p + ^{41}\text{K} = ^{42}\text{Ca} + 40,6 \text{ keV}$, в результате протекания которых генерируется тепло.

В установке «Энергонива», созданной в 1994 г. в Магнитогорском государственном техническом университете [16], поток воды пропускаться через область плазменного высокочастотного разряда, и в результате синтезировались новые элементы. Скорость их образования составляла порядка кг/мин [17]. Принципиальная схема основного элемента установки – реактора приведена на рис. 2.

При пропускании потока воды со скоростью 0,2...0,8 м/с через медные трубчатые электроды (2 и 3), в зазоре между которыми формировали плазменное образование в виде пленки (1), на выходе реактора наблюдалось выпадение из потока воды порошка, который содержал новые элементы (в основном железо). Эти элементы нерадиоактивны. При работе установки также не зафиксированы радиоактивные излучения. Инициация процесса производилась с помощью импульсных электродов, изготовленных из медных стержней диаметром 3...8 мм и длиной 5...10 м (6). В работе [18] отмечено, что применялось не 2, а 4 электрода, расположенных под углом 90° . Поверх диэлектрического корпуса реактора (4) размещалась катушка (5), с помощью которой создавалось магнитное поле в разрядном промежутке. Кроме того, индуктивность этой катушки вместе с паразитной ёмкостью формировали колебательный контур, определяющий частоту следования генерируемых импульсов (20–30 МГц).

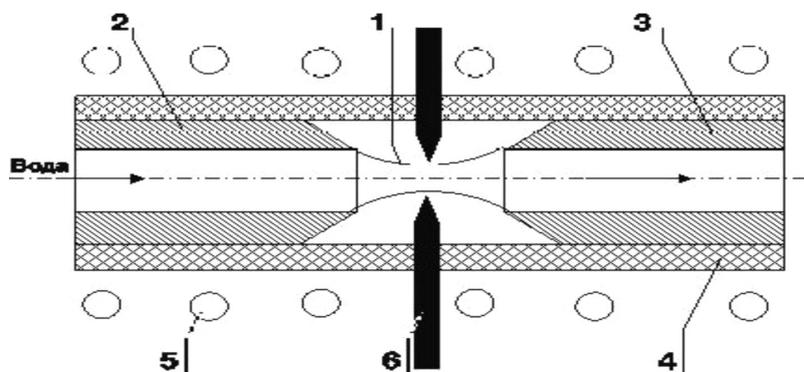


Рис. 2. Схема реактора: 1 – область разряда; 2 – верхний трубчатый электрод; 3 – нижний трубчатый электрод; 4 – корпус реактора; 5 – катушка (индуктор); 6 – импульсные электроды

Выход твёрдых продуктов в установке «Энергонива-2» в зависимости от диаметра трубчатых электродов [15]

D, мм	10	15	20	25	32	40	52
Выход, г/мин	90	180	270	450	720	1080	1800

Выход новых элементов, полученных на установке «Энергонива-2», в зависимости от диаметра D трубчатых электродов приведён в таблице.

Использовались два режима работы установки: металлургический и энергетический. Первый, с приоритетом получения металлического порошка, и второй – получение электрической энергии. При синтезе металлического порошка вырабатывалась электрическая энергия, которая отводилась от установки. Количество электрической энергии оценивалось примерно до 3 МВтч на 1 м³ воды и зависело от режима работы установки, диаметра реактора D и количества наработанного порошка. Отмечено, что «Энергонива-2» работала в автономном режиме около 2 суток.

После смерти создателя установки Вацаева А.В. в 2000 г. сотрудники института не смогли запустить его установку. Ноу-хау запуска до сегодняшнего дня исследуется в лабораториях [18]. Можно предположить скрытое применение источника ионизирующего излучения (ИИИ) для создания ионизации в разрядном промежутке реактора при запуске процесса – официальное разрешение на использование ИИИ большой активности связано с определенными сложностями.

В лаборатории физического факультета МГУ исследователем А.А. Корниловой был выполнен ряд экспериментов, однозначно свидетельствующих о трансмутации стабильных и радиоактивных нуклидов в растущих биологических системах. Её соавтор профессор Киевского национального университета В.И. Высоцкий предложил теоретическое обоснование возможности протекания низкоэнергетических ядерных реакций (НЭЯР) при комнатной температуре с позиций квантовой теории когерентных коррелированных состояний [19–22]. Использование биологической трансмутации долгоживущих радиоактивных изотопов (например, ¹³⁷Cs) для снижения активности жидких радиоактивных отходов, предложенное авторами, на наш взгляд, в настоящее время проблематично из-за существенного снижения скорости биологической трансмутации со временем.

Результаты работ [22–24] могут существенно приблизить реализацию ядер-

ной энергетики на основе НЭЯР. С помощью установки, схема которой приведена на рис. 3, исследовалась генерация рентгеновского излучения [23], связанная с процессами кавитации и последующим возбуждением ударных волн. Вода под давлением 250 атм через сопло подавалась в кавитационную камеру (1), на внешней (наружной) поверхности мишени (2) регистрировался интенсивный поток рентгеновского излучения (3). Из кавитационной камеры вода отводилась через патрубок (4). Характеризуя поток рентгеновского излучения, авторы ошибочно использовали единицу радиоактивности (0,1 Ки). Продолжение исследований с использованием кавитационной камеры (рис. 3) позволило установить, что при определённых условиях наряду с рентгеновским излучением на внешней поверхности мишени в воздухе генерируются незатухающие температурные волны [23; 24].

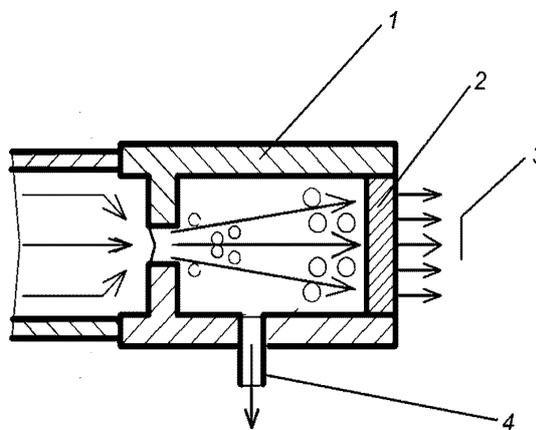


Рис. 3. Схема установки для генерации рентгеновского излучения и незатухающих тепловых волн при кавитации струи воды в камере: 1 – стенка кавитационной камеры; 2 – мишень (из молибдена или вольфрама); 3 – поток рентгеновских квантов; 4 – выход воды из камеры

В работе [25] впервые обнаружено, что при воздействии высокочастотных незатухающих тепловых волн на деутерированный поликристаллический образец титана происходит устойчивая управляемая генерация альфа-частиц в результате реакций

синтеза с участием дейтерия при комнатной температуре.

Энергетика, основанная на НЭЯР, имела бы важные преимущества. Топливо – водород или дейтерий – получают известными методами из обычной воды, запасы которой в океанах и морях практически неисчерпаемы. Природных ресурсов используемых металлов хватит на миллионы лет [26]. Эта энергетика экологически безопасна. Появляется возможность приблизить производителей энергии и потребителей и существенно снизить стоимость энергии.

Необходимым условием овладения новой технологией и окончательным признанием НЭЯР официальной наукой является создание адекватной теории НЭЯР и трансмутации элементов. Для появления такой теории, вероятно, потребуются смена парадигм [27] ядерной физики.

Закключение

Ядерная энергетика, основанная на делении тяжёлых ядер, исчерпала перспективы дальнейшего развития из-за проблем возрастания объема радиоактивных отходов и ограниченных запасов ядерного топлива. Поэтому изучение возможностей использования альтернативных источников энергии, в частности энергии, основанной на реакциях ядерного синтеза при низких температурах, является актуальной задачей для современной науки.

Попытки воспроизвести в земных условиях реакции термоядерного синтеза, которые происходят в недрах звёзд при сверхвысоких температурах и давлениях, продолжают без видимого успеха длительное время и требуют затрат космического масштаба.

На основании изложенных выше материалов можно предположить, что в ближайшие десятилетия начнётся производство энергии с помощью НЭЯР в промышленных масштабах.

Список литературы

1. Сазонов А.Б. Ядерная физика. М.: Юрайт, 2019. 320 с.
2. Бекман И.Н. Ядерные технологии. М.: Юрайт, 2018. 404 с.
3. Справочные данные по энергии связи ядер. The 2012 Atomic Mass Evaluation. [Электронный ресурс]. URL: <https://www-nds.iaea.org/amdc/ame2016/mass16.txt> (дата обращения: 22.05.2020).
4. Просвирнов А.А., Ратис Ю.Л. Сомнений не осталось, LERN существует // Атомная стратегия. 2013. № 11. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=4921> (дата обращения: 22.05.2020).
5. Филимоненко И.С. Процесс и установка термоэмиссионной установки для ядерного синтеза // Перестройка Естествознания-92: материалы III науч. симпозиума. Волгодонск, Россия, 17–19 апреля 1992 г.
6. Fleischmann M., Pons S. Electrochemically induced nuclear fusion of deuterium. The Journal of Electroanalytical Chemistry. 1989. V. 261 (2a). P. 301–308.
7. Fleischmann M., Pons S., Anderson M.W., Lian Jun Li and Hawkins M. Calorimetry of the palladium-deuterium-heavy water system. The Journal of Electroanalytical Chemistry. 1990. V. 287. P. 293.
8. Филимоненко И.С. Демонстрационная термоэмиссионная установка для ядерного синтеза // Перестройка Естествознания-92: материалы III науч. симпозиума. Волгодонск, Россия, 17–19 апреля 1992 г.
9. Липсон А.Г., Дерягин В.В., Клюев В.А., Топоров Ю.П., Сиротюк М.Г., Хаврошкин О.Б., Саков Д.М. Иницирование ядерных реакций синтеза при кавитационном воздействии на дейтерийсодержащие среды // Журнал технической физики. 1992. Т. 62. № 12. С. 121–130.
10. Пархомов А.Г. Многообразие нуклидов, возникающих в процессе холодных ядерных трансмутаций с участием электронов // Журнал формирующихся направлений науки. 2018. № 21–22 (6). С. 131–132.
11. Focardi S., Rossi A. A new energy source from nuclear fusion. Journal of Nuclear Physics. 2010. [Электронный ресурс]. URL: www.journal-of-nuclear-physics.com (дата обращения: 22.05.2020).
12. Levi G., Forchi E., Essen H. Observation of abundant heat production from a reactor device and of isotopic changes in the fuel. P. 53. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sifferkoll.se/sifferkoll/wp-content/uploads/2014/10/LuganoReportSubmit.pdf> (дата обращения: 22.05.2020).
13. Пархомов А.Г. Отчёт международной комиссии об испытании высокотемпературного теплогенератора России // Журнал формирующихся направлений науки. 2014. № 6 (2). С. 57–61.
14. Тертышник Э.Г., Епифанов А.О., Епифанова И.Э. Анализ некоторых аспектов испытаний теплогенератора России // Актуальные вопросы науки: материалы 39 Международ. науч.-практ. конф. Уфа: АЭТЕРНА. 2018. С. 204–209.
15. Пархомов А.Г., Жигалов В.А., Забавин С.Н., Соболев А.Г., Темирбулатов Т.Р. Никель-водородный реактор, непрерывно проработавший 7 месяцев // Журнал формирующихся направлений науки. 2019. № 23–24 (7). С. 57–63.
16. Вачаев А.В., Иванов Н.И., Иванов А.Н., Павлова Г.А. Способ получения элементов и устройство для его осуществления. Патент РФ №2096846, МКИ G21 G1/100, H05 H1/24. Заявл. 31.05.94 // Изобретения, 1997. № 32. С. 369.
17. Балакирев В.Ф., Крымский В.В., Болотов Б.В., Васильева Н.В., Вачаев А.В., Иванов Н.И., Казбанов В.И., Павлова Г.А., Солин М.И., Уруцкоев Л.И. Взаимопревращения химических элементов. Екатеринбург: УРО РАН, 2003. 92 с.
18. Хрищанович А.П. Технологический процесс в установке «Энергонива», описанный в книге В.Ф. Балакирева и В.В. Крымского «Взаимопревращения химических элементов». [Электронный ресурс]. URL: <http://koledj.ru/docs/index-7909.html> (дата обращения: 22.05.2020).
19. Высоцкий В.И., Корнилова А.А. Ядерные реакции и трансмутация изотопов в биологических системах (предыстория, текущее состояние и перспективы) // Журнал формирующихся направлений науки. 2017. № 17–18 (5). С. 34–42.
20. Vysotskii V.I., Vysotskyy M.V. Coherent correlated states of interacting particles – the possible key to paradoxes and features LENR. Current Science. 2015. V. 108. № 4. P. 52–530
21. Vysotskii V.I., Vysotskyy M.V., Bertalucci S. Features of the Formation of Correlated Coherent States and Nuclear Fusion Induced by the Interaction of Slow Particles with Crystals and Free Molecules. Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2018. V. 127(3). P. 479–490.
22. Высоцкий В.И., Василенко А.О., Василенко В.Б., Высоцкий М.В. Неравновесные тепловые эффекты при импульсном воздействии на проводящие среды // Физика и химическая обработка материалов. 2014. № 1. С. 5–11.

23. Высоцкий В.И., Василенко А.О., Василенко И.Б. Генерация и распространение незатухающих температурных волн при импульсном воздействии на поверхность мишени // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 4. С. 68–75.

24. Высоцкий В.И., Корнилова А.А., Василенко А.О., Томак В.И. Обнаружение и исследование незатухающих температурных волн, возбуждаемых при кавитации струи воды // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 11. С. 106–112.

25. Корнилова А.А., Высоцкий В.И., Сапожников Ю.А., Власова И.Э., Гайдамака С.Н., Новакова А.А., Авдюхи-

на В.М., Левин И.С., Высоцкий М.В., Хайт Е.И., Волкова Н.Х.. Проблема и реализация устойчивой генерации альфа-частиц дейтерированным титаном, находящимся в поле тепловой волны // Инженерная физика. 2018. № 5. С. 13–22.

26. Киркинский В.А. Холодный ядерный синтез и трансмутации элементов: эксперименты, теория, патенты, природные проявления. «Холодному синтезу – 30 лет: итоги и перспективы». [Электронный ресурс]. URL: <https://regnum.ru/news/innovatio/2631134.html> (дата обращения: 22.05.2020).

27. Кун Т. Структура научных революций. М.: АСТ, 2009. 310 с.