

УДК 621.039.63

## ОЦЕНКА УРОВНЯ ГОТОВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ТРИТИЕВОГО ЦИКЛА В РОССИИ НА ПРИМЕРЕ ПРОЕКТА ГИБРИДНОГО РЕАКТОРА ДЕМО-ТИН

*Б.В. Иванов, С.С. Ананьев**НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

В России проектируется гибридный (синтез-деление) реактор ДЕМО-ТИН мощностью DT-синтеза 40 МВт. Для работы реактора необходима разработка систем термоядерного топливного цикла (ТЦ). Они базируются на технологиях обращения с тритием и дейтерием, которые сейчас разрабатывают и применяют в различных областях науки и техники. Необходимость совершенствования тритиевых технологий в России обусловлена переходом к на порядок большим современным газовым потокам и запасам трития в топливном цикле гибридных и термоядерных систем в условиях ограничений на импорт технологий двойного назначения. Для выбора надёжных технологий и интенсификации разработок в критических областях ТЦ необходим анализ уровня готовности технологий. Нами была проведена оценка готовности существующих в России технологий обращения с тритием и дейтерием для применения в топливном цикле ДЕМО-ТИН. Для анализа применялась методика Technology Readiness Level (TRL), в соответствии с которой каждой технологии присваивается уровень готовности от TRL 1 (продемонстрированы базовые принципы технологии) до TRL 9 (технология проверена успешной работой). Рассмотрены технологии мембранного разделения водородсодержащих газовых смесей, криогенной ректификации водорода, хроматографического разделения изотопов водорода, криоадсорбционного разделения, детритизации газов в скруббере и процесс CECE (Combined Electrolysis and Catalytic Exchange). Другие технологии ТЦ будут рассмотрены нами в последующих публикациях. Перечисленные технологии отработаны в России и используются в различных направлениях промышленности и науки. Однако эксплуатационные условия использования технологий отличаются от планируемых параметров ТЦ ДЕМО-ТИН, для которого большинство технологий находятся на стадии разработки (TRL 4—6), отдельные технологии, такие как криоадсорбционное разделение и хроматографические процессы, соответствуют стадии исследования (TRL 1—3). Состояние этих технологий «ниже» или «соответствуют мировому уровню». Для дальнейшего развития рассмотренных технологий необходимы специализированные установки и стенды, которые позволят отрабатывать их совместное использование в условиях, имитирующих эксплуатацию термоядерной установки.

**Ключевые слова:** топливный цикл, тритий, дейтерий, изотопы водорода, уровень готовности технологий, зрелость технологий, ДЕМО-ТИН, ТИН-СТ, термоядерный реактор, тритиевые технологии в России, палладиевые мембраны, криогенная ректификация водорода, CECE-процесс, хроматографическое разделение изотопов водорода, удаление тритийсодержащих примесей адсорбцией при криогенных температурах, удаление паров тритированной воды в скруббере.

## RUSSIAN TRITIUM CYCLE TECHNOLOGY READINESS LEVEL ANALYSIS FOR THE DEMO-FNS HYBRID (FISSION-FUSION) REACTOR

*B.V. Ivanov, S.S. Ananyev**National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

A hybrid (fusion-fission) DEMO-FNS reactor with a DT fusion capacity of 40 MW is being designed in Russia. For the operation of the reactor, it is necessary to develop systems for the fusion fuel cycle (FC). They are based on technologies for handling tritium and deuterium, which are now being developed and used in various fields of science and technology. The need to improve tritium technologies in Russia is due to the transition to larger gas flows (orders of magnitude) and reserves of tritium in the fuel cycle of hybrid and fusion systems in the context of restrictions on the import of dual-use technologies. To select reliable technologies and intensify developments in critical areas of the FC, an analysis of the technology readiness levels is required. We have carried out an assessment of the readiness of existing in Russia technologies for handling tritium and deuterium for use in the DEMO-FNS fuel cycle. For the analysis, the Technology Readiness Level (TRL) methodology was used, in accordance with which each technology was assigned a readiness level from TRL 1 (the basic principles of the technology were demonstrated) to TRL 9 (the technology was tested by successful operation). The following technologies are considered: membrane separation of hydrogen-containing gas mixtures, cryogenic hydrogen rectification, chromatographic separation of hydrogen isotopes, cryoadsorption separation, gas detritiation in a scrubber and the CECE (Combined Electrolysis and Catalytic Exchange)-process. Other technologies of the FC will be considered by us in subsequent publications. The listed technologies have been developed in Russia and are used in various areas of industry and science. However, the operating conditions for the use of technologies differ from the planned parameters of the DEMO-FNS FC, for which most technologies are under development phase (TRL 4—6), certain technologies, such as cryoadsorption separation and chromatographic processes correspond to the research stage (TRL 1—3). The state of these technologies is «below» or «corresponds to the world level». For the further development of the considered technologies, specialized installations and stands are needed, which will allow testing their joint use under conditions that simulate the operation of a fusion installation.

**Key words:** Fuel cycle, tritium, deuterium, hydrogen isotopes, technology readiness level, TRL, technology maturity, DEMO-FNS, fusion reactor, tritium technologies in Russia, palladium membranes, hydrogen cryogenic rectification, CECE-process, chromatographic separation hydrogen isotopes, removal of tritium-containing impurities by adsorption at cryogenic temperatures, removal of tritiated water vapors in a scrubber.

DOI: 10.21517/0202-3822-2021-44-4-5-24

## ВВЕДЕНИЕ

Системы термоядерного топливного цикла (ТЦ) являются исключительно важными для создания и безопасной эксплуатации установок, использующих реакцию термоядерного горения, таких как термоядерные реакторы (ТЯР) и гибридные системы синтез—деление [1]. Системы, образующие ТЦ, должны обеспечивать хранение топливных изотопов водорода (дейтерия и трития), их инжекцию в плазму, откачку из вакуумной камеры, очистку от примесей и переработку смеси газов для многократного их использования.

В нашей стране в сфере технологий управляемого термоядерного синтеза успешно работают различные научные группы и организации. Работы сосредоточены в области физики удержания термоядерной плазмы [2], защиты первой стенки ТЯР от интенсивных потоков энергии и частиц из плазмы [3], диагностических систем [4] либо ориентированы на создание новых установок [5] и работы в рамках проекта ИТЭР [6, 7]. Последние, в основном, не связаны напрямую с системами топливного цикла установки. Эксплуатируемые исследовательские термоядерные установки в РФ (Глобус-М2, Т-10, Т-11 и др.) не предусматривают замкнутый ТЦ в связи с импульсным характером их работы. Также можно выделить концептуальный проект Игнитор, имеющий оригинальный ТЦ [8, 9], а также планируемые работы по созданию прототипа ТЦ на комплексе токамака Т-15МД [10]. В 1993—1997 гг. во ВНИИЭФ был сформирован крупномасштабный тритиевый контур (тритиевая лаборатория) для моделирования процессов вакуумно-тритиевого комплекса ТЯР и ресурсных испытаний технологического оборудования комплекса [11]. Предельное содержание трития в контуре могло достигать 200 г [11]. В остальном, не принимая во внимание устаревшего и не введенного в эксплуатацию стенда ТЦ-токамака ТСП [9, 11], в РФ нет специализированной стендовой базы для испытания технологий ТЦ-токамаков. Такая стендовая база и отдельные установки, например ТИН-СТ [13], должны быть созданы в рамках федерального проекта «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 г.» [1, 14, 15]. Поскольку федеральный проект ориентирован на развитие стационарных гибридных и термоядерных систем, обязательным компонентом которых будет ТЦ, необходимо создать дорожную карту развития его технологий для интенсификации разработок в критических областях и достижения необходимого уровня готовности этих технологий в запланированное время. Для этого необходим анализ текущего состояния и степени готовности технологий топливного цикла. В статье рассмотрены технологии ТЦ, основанные на физико-химических методах обращения с топливной смесью или продуктами её переработки. К таким технологиям относятся мембранное разделение водородсодержащих газовых смесей, криогенная ректификация водорода, хроматографическое разделение изотопов водорода, фазовый изотопный обмен в системе  $\text{H}_2\text{O}^{\text{пар}}-\text{H}_2\text{O}^{\text{жид}}$ , СЕСЕ-процесс и криогенная адсорбция смесей водородсодержащих веществ. Нами проанализирован уровень готовности этих технологий на текущий момент.

Проект промышленного гибридного (синтез—деление) реактора, подразумевает демонстрацию гибридных технологий на установке ДЕМО-ТИН [1, 16] и предварительную отработку стационарных режимов работы термоядерного источника нейтронов (ТИН) на установке ТИН-СТ [13]. Развитие отдельных технологий для гибридных систем синтез—деление (ГССД) должно поддерживаться стендовыми испытаниями на всех этапах программы. При анализе кандидатных технологий ТЦ необходимо ориентироваться на обеспечение требуемых показателей производительности систем ТЦ ДЕМО-ТИН и сокращение количества трития в системах ТЦ. Ранее авторами были рассмотрены возможные технологии [17] для ТЦ установки ДЕМО-ТИН и проанализированы основания для их выбора с учётом особенностей установки на основании моделирования [18—21]. Позже было показано [22], что некоторые технологии могут быть использованы более чем в одной системе ТЦ в различной конфигурации. Это позволяет независимо развивать альтернативные технологии для возможного использования в одной и той же системе. Это целесообразно с точки зрения управления рисками проекта, например, при обнаружении непреодолимых препятствий при разработке и изготовлении оборудования, внедрении или интеграции одной из технологий возможна переориентация технологической схемы ТЦ на альтернативную. В некоторых случаях современный уровень развития технологий не позволяет точно оценить технологические параметры будущей полноформатной установки, а значит и экономическую эффективность, поэтому целесообразно развивать альтернативные технологии, повышая их уровень готовности.

Ранее в России методика TRL не применялась для анализа зрелости технологий ТЦ термоядерных установок. Актуальность проведения анализа обоснована включением в исследовательскую и технологическую программы ДЕМО-ТИН технологий, входящих в перечень двойного назначения [23, 24], импорт

которых из США, Евросоюза и других стран может быть затруднён. В данной работе посредством анализа уровней готовности технологий ТЦ ДЕМО-ТИН решаются задача выбора приоритетов исследовательской программы для достижения необходимых результатов и задача минимизации рисков за счёт своевременной отработки необходимых технологий или их альтернатив.

### ТЦ ДЛЯ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ

Для демонстрации возможности создания гибридных реакторов и отработки их систем планируется строительство компактного сферического токамака ТИН-СТ и установки ДЕМО-ТИН.

Установка ДЕМО-ТИН представляет собой термоядерный источник нейтронов на основе токамака с параметрами  $R/a = 3,2$  м/1 м,  $B = 5$  Тл,  $I_p = 4\text{—}5$  МА,  $P_{\text{NBI}} = 30$  МВт и  $P_{\text{ECR}} = 6$  МВт, мощностью DT-синтеза  $P_{\text{fus}} = 40$  МВт и содержит бланкет с соединениями лития для воспроизводства трития и делящимися нуклидами [25]. Такая конфигурация позволяет использовать и удачно комбинировать известные и отработанные технологии в ядерной и термоядерной частях установки. Благодаря сверхпроводящей магнитной системе, системам нагрева и некоторым другим особенностям конструкции токамака планируется достичь стационарного режима горения плазмы [1]. Применение в бланкете делящихся материалов позволяет производить тепло в количестве, существенно превышающем термоядерную мощность установки, и использовать это тепло для обеспечения установки электроэнергией, а также расширенно воспроизводить тритий (Tritium breeding ratio (TBR) > 1,2), используя существующие технологии. Данные особенности реактора в значительной степени определяют конфигурацию тритий-дейтериевого ТЦ и выбор конкретных технологий. В работе [17] в качестве базовой была предложена конфигурация топливного цикла, состоящая из трёх контуров:

- основного контура для непосредственного обращения с тритиево-дейтериевым топливом, включая очистку, обогащение, ребалансировку изотопов и инъекцию топлива в плазму;
- второго контура для выделения трития из бланкета, включая очистку и разделение изотопов;
- вспомогательного контура для предотвращения попадания трития в окружающую среду и организм персонала при нормальной эксплуатации и при нештатных ситуациях, а также для переработки тритийсодержащих отходов.

Для решения всех обозначенных задач было проведено нульмерное моделирование [18, 19], оптимизирована на его основе архитектура ТЦ и выбраны кандидатные технологии [17]. Основные системы и технологии ДЕМО-ТИН представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные технологии для систем тритиево-дейтериевого цикла ДЕМО-ТИН

Система	Технология
Первый контур	
Откачка	Криогенная Турбомолекулярная Форвакуумная
Экстракция водорода	Мембранное разделение
Разделение изотопов	Мембранно-каталитическое разделение Хроматографические методы
Системы инъекции	Ректификация водорода Пеллет-инъекция Инъекция быстрых нейтронов Газовая инъекция
Второй контур	
Воспроизводство, извлечение трития из бланкета и его доведение до кондиционного состояния	Бридинговые материалы Состав и конструкция гибридного бланкета Методы извлечения и очистки трития
Третий контур	
Детритизация газов	Адсорбционные методы
Работа с радиоактивными отходами	Фазовый изотопный обмен
Работа с plasma enhancement gases (PEG)	СЕСЕ-процесс Криогенная адсорбция
Другие системы	
Удержание трития и безопасность	Системы обеспечения безопасности
Хранение трития и водорода	Сорбционные методы
Конструкционные и функциональные материалы для работы с тритием	Конструкционные материалы
Вспомогательные устройства	Покртия
Транспортировка трития	Аналитическое оборудование Транспортные контейнеры и безопасность

Система тритиевого топливного цикла является одной из ключевых систем гибридного реактора. В работе [17] авторы рассматривали конкретные технологические решения для остальных систем реактора ДЕМО-ТИН, таких как вакуумная камера, электромагнитная система, ядерный бланкет и др. Проект ДЕМО-ТИН находится в начальной стадии разработки технического проекта, поэтому возможны изменения подходов и технологических решений основных систем реактора. Изменения этих систем могут в значительной мере повлиять на конфигурацию топливного цикла ДЕМО-ТИН и на возможность применения тех или иных технологий.

Гибридную установку ДЕМО-ТИН создают на основе токамака, который по своим основным параметрам сопоставим с ранее построенными машинами (JT-60, JET и TFTR) и значительно меньше строящегося ИТЭР. Тритиевый топливный цикл ДЕМО-ТИН по количеству трития и потокам топлива в плазму занимает промежуточное положение между этими установками. Большее количество трития в ДЕМО-ТИН (~2000 г), чем в JET (60 г) и TFTR (25 г), связано с его стационарной работой. Также перед установками JET и TFTR не стояла задача воспроизводства трития в установке.

В табл. 2 показано, как могут использоваться выбранные технологии в основных системах ТЦ ТИН. Поскольку одни и те же технологии могут применяться в различных системах (и в различном качестве), необходим подробный анализ для выбора оптимальных технологий на всех этапах создания ГССД с учётом требований к системам ТЦ и степени готовности технологий.

Т а б л и ц а 2. Таблица использования конкурентных технологий [22] в основных и вспомогательных системах ТЦ

Технология	Основные системы				Вспомогательные системы			
	Выделение водорода	Разделение изотопов	Улавливание Т в газовых потоках	Хранение и подача трития и изотопов водорода (ИВ)	Переработка тритийсодержащих ЖРО	Разделение примесных газов	Выделения Т из бланкета	Детритизация теплоносителя
Газовая хроматография		I удаление Т в СНИ II удаление протия III разделение ИВ					✓ разделение смеси Т и протия	
Реактивизация водорода		✓ разделение ИВ			✓ выделение Т из ЖРО		✓ разделение смеси Т и протия	
Криогенная абсорбция	✓ очистка потока Т от примесей				Разделение PEG I Разделение PEG + T (imp) II		✓ выделение потока Т из смеси с He	
Адсорбция при нормальной температуре			✓ улавливание Т-воды					
Мембранное разделение		I выделение Т и ИВ из смеси с He II очистка потока Т от примесей III выделения Т и ИВ в СРИ IV выделения Т и ИВ из потока (в режиме с противотоком)			✓ выделение ИВ/очистка ИВ от паров H <sub>2</sub> O		✓ выделение потока Т из смеси с He	
Фазовый изотопный обмен			✓ Улавливание Т-воды					
СЕСЕ-процесс					✓ выделение Т из ЖРО		Выделение Т из теплоносителя (H <sub>2</sub> O) ✓	
Сорбенты (хранение)				I кратковременное хранение ИВ II долгосрочное хранение III транспортировка ИВ			✓ выделение потока Т из смеси с He	

Примечание. Цветом условно обозначена важность развития технологий: ■ — высокая; ■ — средняя; ■ — ниже среднего. В случае применения технологий в различных процессах используется нумерация и символ ✓ (I, II, III, IV, ✓, расшифровка которых размещена рядом; ЖРО — жидкие радиоактивные отходы; СНИ — система нейтральной инъекции; СРИ — система разделения изотопов

Степень важности развития технологии была определена по следующим критериям: режим работы (постоянный или периодический), количество трития в системе, возможность эффективной замены другой технологией, контур, в который включена технология (основной контур, контур бланкета, вспомогательный контур). В результате наиболее важными технологиями были выбраны ректификация водорода, мембранное разделение и сорбционное хранение. Эти технологии будут использованы в основном контуре переработки топливной смеси, системы на их основе работают в непрерывном режиме (за исключением сорбционного хранения) и содержат большое количество трития. Эти технологии не могут быть заменены другими без значительного снижения эффективности или режима работы систем.

Одним из требований для проекта ДЕМО-ТИН является использование отработанных, надёжных и эффективных технологий для обеспечения быстрой разработки и разумных затрат для ввода реактора в эксплуатацию. В СССР и затем в России, в первую очередь, благодаря военному применению были развиты технологии переработки и обращения с высоко концентрированным тритием. Достаточно длительное время идёт успешный процесс их заимствования и развития в гражданской сфере, в том числе в термоядерном синтезе [26].

## МЕТОДИКА

Оценку зрелости кандидатных технологий тритий-дейтериевого топливного цикла гибридного реактора ДЕМО-ТИН авторы в данной работе проводят с помощью методики TRL. Методика TRL — оценка уровня готовности технологии была разработана национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства США (NASA), а затем адаптирована в широком круге государственных и коммерческих организаций [27]. Методика TRL адаптирована в различных государственных и коммерческих организациях, последовательно применяется в рамочных исследовательских программах (например, Horizon 2020 [28]), а также включена в международные стандарты [29]. В России методику TRL наряду с другими применяют государственные структуры для анализа инвестиционной привлекательности и конкурентоспособности разработок [30, 31].

Методика TRL неоднократно применялась различными группами для оценки готовности технологий в проектах, относящихся к термоядерной тематике: для совокупности систем промышленного термоядерного реактора [32]; топливного цикла реактора ДЕМО [33]; для материалов, применяемых в термоядерных реакторах [34], для диагностик плазмы [35] и т.д. В приведённых работах продемонстрирована эффективность методики TRL для оценки различных термоядерных технологий и планирования исследовательских программ.

В узком смысле методика TRL позволяет оценить готовность отдельной технологии для использования в конкретном устройстве или технической системе (например, космическом аппарате), в широком — для выполнения целей научной или технологической программы. Также методика TRL позволяет формально оценить технологические разрывы, планировать необходимые исследования и инвестиции, определить возможные риски. Применение TRL позволяет с помощью объективных и системных критериев количественно оценить зрелость конкретной технологии в целевой сфере применения. Общий подход к описанию уровней TRL показан в табл. 3 [32].

Т а б л и ц а 3. Описание уровней готовности технологий: общий подход [32] и пример подхода для ДЕМО-ТИН

Стадия разработки технологии	Уровень готовности	Общий подход	Подход к системе криоразделения ИВ
Исследование	TRL 1	Сформулированы и продемонстрированы базовые принципы	Экспериментально определены термодинамические, кинетические и др. параметры процесса криогенной ректификации изотопов водорода
	TRL 2	Сформированы концептуальный подход и области применения	Разработаны модели для расчёта и проектирования системы криогенной ректификации изотопов водорода.
	TRL 3	Получено подтверждение концепции. Проведены критический анализ и экспериментальное подтверждение	Работа пилотной установки разделения продемонстрирована на смеси изотопов водорода в лабораторном масштабе
Разработка	TRL 4	Проведена проверка компонентов/макетов в лабораторных условиях	Работа прототипа системы продемонстрирована на тритиево-дейтериевой смеси в лабораторном или промышленном масштабе
	TRL 5	Проведена проверка компонентов/макетов в операционной среде*	Работа прототипа системы продемонстрирована на тритиево-дейтериевой смеси с интеграцией одной или нескольких систем ТЦ (например, СЕСЕ-процесса)
Демонстрация	TRL 6	Проведена демонстрация модели системы / подсистемы или прототипа в операционной среде	Работа прототипа установки криоректификации продемонстрирована на тритиево-дейтериевой смеси с интеграцией систем топливного цикла (СЕСЕ-процесс и другие)
	TRL 7	Демонстрация прототипа системы в операционной среде	Работа прототипа системы продемонстрирована в условиях тритиевого цикла термоядерного реактора
	TRL 8	Фактическая система завершена, проведены тестирование и демонстрация	Эффективная работа системы продемонстрирована в рамках топливного цикла ДЕМО-ТИН
	TRL 9	Фактическая система, проверенная успешной работой	Успешная, надёжная, эффективная работа системы в рамках топливного цикла ДЕМО-ТИН при эксплуатации

\*Здесь под операционной средой понимается вся совокупность условий и факторов, которые будут присутствовать в процессе эксплуатации системы в условиях ТЯР (нейтронные, тепловые и плазменные потоки, температура, циклические тепловые воздействия и циклические механические и электромагнитные нагрузки, воздействие агрессивной среды, характерной для ТЯР, и т.п.).

Методика определения уровня готовности конечного продукта включает выбор отдельных объективных критериев на основе общего подхода, приведённого в табл. 3, и заключается в дальнейшем экспертном анализе. Для оценки конкретных технологий в целевой области применения нами были сформулированы критерии, использованные в следующих разделах статьи.

### КРИТЕРИИ ДЛЯ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ

Ранее были рассчитаны требуемые производительности систем топливного цикла установки ДЕМО-ТИН [17]. С их помощью были сформулированы требования к системам ТЦ, где также были учтены физические и технико-экономические ограничения рассматриваемых процессов. В данной работе сформированы критерии готовности технологий ТЦ с учётом предполагаемой архитектуры ТЦ, особенностей работы реактора ДЕМО-ТИН, а также соображений безопасности и экономической целесообразности. Полученные критерии завершённого тритиевого топливного цикла ДЕМО-ТИН перечислены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4. Критерии выбора технологий для тритиевого топливного цикла ДЕМО-ТИН

Критерий	Описание
Коэффициент воспроизводства трития	Воспроизводство трития в реакторе с учётом необходимого запаса для штатных и нештатных ситуаций и прогнозируемых потерь при сопоставимых экономических параметрах в течение всего жизненного цикла реактора
Безопасность	Сопоставимые с существующими ядерными и энергетическими объектами уровни безопасности и влияния на окружающую среду, персонал и население с учётом специфических рисков данного типа реакторов. Полное соответствие нормам радиационной, ядерной безопасности и др. правовым нормам
Минимизация количества трития	Минимальное количество операционных запасов и задержек трития в технологическом оборудовании, а также конструкционных и функциональных материалах. Минимизация потерь трития
Надёжность и эффективность	Надёжная, стабильная, непрерывная работа оборудования тритиевого цикла

Анализ уровней TRL проводился на основе литературных данных, выступлений на конференциях и других источников.

### ОЦЕНКА УРОВНЯ ГОТОВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА ДЕМО-ТИН

Оценка уровня готовности была проведена для следующих технологий: криогенная ректификация ИВ; экстракция водорода в мембранных реакторах; хроматографическое разделение ИВ; удаление тритийсодержащих примесей адсорбцией при криогенных температурах; удаление паров тритированной воды в скруббере; СЕСЕ-процесс. Данные системы в России находятся на различных уровнях технологической готовности, также эти технологии могут быть отнесены к разным контурам топливного цикла реактора ДЕМО-ТИН.

**Разделение изотопов водорода методом криогенной ректификации.** В топливном цикле ДЕМО-ТИН метод криогенной ректификации водорода будет применён для получения изотопов водорода (трития и дейтерия) и удаления протия из топлива. Очищенная от примесей смесь трития—дейтерия с концентрацией трития от 50 до 70% является входящим потоком в систему криогенного разделения. Дополнительно в систему разделения будет поступать поток водорода из колонны СЕСЕ с малой концентрацией тяжёлых изотопов. Система должна работать в непрерывном режиме для обеспечения систем инжекции моноизотопными потоками трития и дейтерия (концентрация целевого изотопа не ниже 99% ат.) [17]. Производительность системы будет составлять около 50 моль/ч по входящей смеси ИВ.

Криогенная ректификация водорода — метод разделения изотопов водорода, основанный на разнице давления насыщенного пара изотопных модификаций водорода ( $H_2$ , HD, HT,  $D_2$ , DT,  $T_2$ ). Так, температура кипения  $H_2$  — 20,38 К,  $D_2$  — 23,5 К,  $T_2$  — 25,0 К при атмосферном давлении [36]. Процесс разделения осуществляется в противоточной колонне, в которую сверху подают жидкий водород, а снизу — газообразный. Разделение изотопов водорода происходит за счёт многократного уравнивания концентрации изотопов между жидкой и газообразной фазами. Обращение потоков производят на концах колонны, соответственно конденсируя газообразный водород и испаряя жидкий. Колонна заполнена высокоэффективной

насадкой для увеличения поверхности контакта фаз. Процесс проводят при температуре кипения жидкого водорода и атмосферном давлении. Описание процесса можно найти в работе [36].

Метод криогенной ректификации применяли в СССР для получения тяжёлой воды [36]. В дальнейшем метод был использован на комбинате «Маяк» (г. Озерск) [37] для очистки трития при его производстве. В период 2000—2009 гг. было проведено переоснащение производства несколькими современными криогенными установками при участии РХТУ им. Д.И. Менделеева и ОАО «Криогенмаш» [26, 37]. Обновлённые установки позволили проводить концентрирование трития, а также его очистку от <sup>3</sup>He (продукта распада, накапливающегося в тритии при хранении).

Также метод криогенной ректификации рассматривался для очистки тяжёлой воды отражателя высокопоточного реактора ПИК (НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, г. Гатчина) [38]. В период 1976—1980 гг. сотрудники Лаборатории разделения изотопов водорода (ЛРИВ) в сотрудничестве с ОАО «Криогенмаш» и другими организациями ввели в эксплуатацию пилотную экспериментальную установку для определения основных технологических параметров процесса криогенной ректификации водорода [38, 39]. Благодаря полученным в процессе опытной эксплуатации данным, а также другим работам, для очистки тяжёлой воды от трития был выбран двухступенчатый метод на основе СЕСЕ-процесса (для начального концентрирования) и криогенная ректификация (КР) для конечного концентрирования трития. Концентрат трития (0,15% ат.) предполагается отбирать и переводить в дейтерид-тритид титана для длительного безопасного хранения [38, 40]. После возобновления работ по вводу в эксплуатацию реактора ПИК был разработан проект и изготовлена установка извлечения трития (УИТ), которая должна быть введена в эксплуатацию в 2021—2022 гг. [40]. В ПИЯФ была спроектирована, изготовлена и запущена в Институте Пауля Шеррера (Швейцария) колонна криогенной ректификации водорода для изотопной очистки протия от следов дейтерия и получения высокообогащённого дейтерия для научных исследований [41, 42].

Как отмечено ранее, в РФ на промышленном уровне эксплуатируются установки криогенной ректификации, работающие с тритием высоких концентраций (ПО «Маяк»), а также будет эксплуатироваться УИТ (НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ), которая, помимо обработки тритий-дейтериевой смеси, подразумевает интеграцию с колонной СЕСЕ-процесса. Эти установки разрабатывались непосредственно в России с преимущественным использованием отечественного оборудования и комплектующих. Производительность системы разделения ИВ в ТЦ ДЕМО-ТИН примерно в 2 раза выше производительности колонны криогенной ректификации установки УИТ [40].

В табл. 5 показан уровень TRL для системы разделения изотопов. Приведённые примеры использования данной технологии позволяют нам оценить уровень её готовности в России в TRL 4 с потенциалом быстрого перехода до уровня TRL 5 после успешного ввода УИТ в эксплуатацию. В данном случае мы рассматриваем приведённые примеры как прототипы по причине масштаба действующих установок и технологических особенностей их работы. Так, в случае очистки трития в ПО «Маяк» работа изначально ведётся с тритием высокой концентрации и, предположительно, в периодическом режиме, а в случае УИТ в колонну криогенной ректификации будет поступать один питающий поток водорода с относительно небольшой концентрацией трития. Дальнейшую отработку технологии криогенной ректификации необходимо проводить в ходе непосредственной интеграции в термоядерный топливный цикл ТИН-СТ или с использованием специальной стендовой базы для работы с тритием.

Т а б л и ц а 5. TRL для системы разделения изотопов

TRL	Россия	Мир
1	+	+
2	+	+
3	+	+
4	+	+
5	±	+
6		+
7		±
8		
9		

Примечание. ■ — достигнутый уровень, ■ — в процессе.

Метод криогенной ректификации используется для производства трития при выделении его из теплоносителя/замедлителя тяжеловодных реакторов (прежде всего реакторов типа CANDU) и в других сферах. Метод был использован в топливных циклах термоядерных установок JET и TFTR для разделения топливной смеси ИВ. Данные системы с точки зрения использования в ТЦ ДЕМО-ТИН можно рассматривать как прототипы ввиду низкой производительности и периодического режима работы. Также данные установки были интегрированы с системами, применение которых не предусмотрено проектом ТЦ ДЕМО-ТИН. Мы оцениваем уровень готовности данной технологии в мире на уровне TRL 6 с потенциалом быстрого перехода до уровня TRL 7 после успешной эксплуатации в рамках кампании DTE2 JET (2021—2022 гг.), которая предусматривает работу на смеси дейтерия и трития. Разницу в уровне TRL в данном случае мы рассматриваем как некритическую ввиду высокой степени отработки технологии в РФ в смежных сферах.

**Хроматографическое разделение изотопов водорода.** Хроматографическое разделение в системах водород—гидрид металла — периодический процесс, при котором через неподвижную твёрдую фазу (обычно порошок гидридообразующего металла, нанесённого на различную керамику) пропускают поток водорода. Разделение обусловлено разницей равновесного парциального давления ИВ над твёрдой фазой. Наиболее простым способом организации процесса разделения является вытеснительная хроматография с использованием Pd в качестве сорбента. Дополнительным преимуществом хроматографии с использованием металлических сорбентов является протекание реакции гомомолекулярного изотопного обмена, что позволяет получать чистые моноизотопные потоки без дополнительных манипуляций. Подробное описание процесса приведено в работе [43, с. 130—143].

В топливном цикле ДЕМО-ТИН хроматографическое разделение ИВ предусмотрено для систем инъекции, работающих с моноизотопными смесями в периодическом режиме. При работе этих систем в них накапливается водород практически моноизотопного состава с небольшими примесями других изотопов. Хроматографическое разделение необходимо для поддержания требуемой чистоты моноизотопных смесей. Данный процесс не требует большой производительности и непрерывного режима работы.

Хроматографические процессы разделения изотопов водорода в России применяются, в основном, в аналитических целях, количественное разделение в специализированных установках представлено единичными работами [44—46]. Исследованием процессов разделения ИВ в системах газ—твёрдое тело активно занимались учёные из РХТУ им. Д.И. Менделеева [47]. Обзор исследований термодинамических и кинетических характеристик гидридообразующих материалов представлен в работе [48].

В России исследования процесса периодического разделения ИВ в хроматографических колонках носят единичный характер. В статье [46] описан стенд, состоящий из разделительной колонны, заполненной смесью порошков палладия и алюминия (75% Pd—25% Al), газовых ёмкостей, вакуумного и аналитического оборудования. Разделение ИВ осуществлялось методом вытеснительной газовой хроматографии. Эксперименты проводили на смеси протия и дейтерия. В результате работы были получены зависимости чистоты извлекаемого дейтерия от степени извлечения при различных температурах колонны и начальных концентрациях дейтерия в смеси [46].

В работах [44, 45] описана новаторская установка с реализованным псевдопротivotочным движением твёрдой и газообразной фаз. В качестве сорбента в ней использовался гранулированный сорбент состава 75% масс Pd—25% масс Al. Установка состояла из 12 одинаковых секций, заполненных сорбентом, накопительных ёмкостей для хранения обеднённой и обогащённой по тяжёлым изотомам водорода смесей, нагревательных элементов для десорбции водорода из сорбента [44]. Перераспределение потока газообразного водорода происходило с помощью основного элемента конструкции — многоканального поворотного крана, специально разработанного и изготовленного для данной установки. Поворотный кран позволял обеспечить виртуальное перемещение секций сорбента, прежде всего адсорбера и десорбера, относительно потока водорода, что позволяло создать псевдопротivotочный режим движения фаз в установке [44, 45]. В работах [44, 45] продемонстрировано эффективное разделение смеси ИВ, в том числе трития и дейтерия, описаны основные характеристики данной установки и псевдопротivotочного процесса разделения. Принцип, описанный в работах [44, 45], не был развит в дальнейшем из-за сложности поддержания вакуумной герметичности многоканального поворотного крана при длительной эксплуатации.

Как показано ранее, в России накоплены многочисленные данные о свойствах и способах изготовления материалов для хроматографического разделения ИВ, а также опробованы способы разделения в хроматографических колонках и установках с псевдодвижущейся фазой сорбента. Эксперименты проводили с тритийсодержащими смесями. Мы оцениваем готовность данной технологии на уровне TRL 3 (табл. 6).

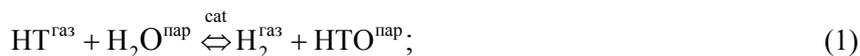
Т а б л и ц а 6. TRL системы хроматографического разделения изотопов

TRL	Россия	Мир
1	+	+
2	+	+
3	+	+
4		+
5		+
6		+
7		+
8		
9		

В мире хроматографическое разделение ИВ более развито. Установка препаративной газовой хроматографии была использована в AGHS JET во время DT-кампании (DTE 1) [49]. Во время и после кампании было переработано около 160 г трития [49]. Установка показала свою надёжность и хорошо сочеталась с другими системами топливного цикла токамака JET. Режимы работы и производительность данной установки сопоставимы с планируемой к эксплуатации в ДЕМО-ТИН. Исходя из этого, уровень готовности технологии хроматографического разделения ИВ в мире можно оценить в TRL 7. Следует также отметить, что в Национальной лаборатории Саванна-Ривер и в Тритиевой лаборатории Карлсруэ (KIT) были опробованы методы короткоциклового сорбции при переменной температуре (TSCAP) [50—52], которые позволяют организовать полунепрерывный процесс разделения ИВ с использованием хроматографических колонн.

**СЕСЕ-процесс.** В ТЦ ДЕМО-ТИН СЕСЕ-процесс будет применён для детритизации воды, образующейся при переработке «выхлопа» токамака, и водного теплоносителя (в настоящее время вода рассматривается в качестве теплоносителя наряду с He и сверхкритическим CO<sub>2</sub>). Согласно предварительным оценкам [17] производительность колонны СЕСЕ в ТЦ ДЕМО-ТИН составит: входящий поток ~5 кг/ч H<sub>2</sub>O, производительность электролизёра ~7 м<sup>3</sup>/ч.

Название СЕСЕ-процесса является английской аббревиатурой словосочетания Combined Electrolysis and Catalytic Exchange Process, которое можно перевести на русский язык как «комбинированный процесс электролиза воды и каталитического изотопного обмена водорода и воды». Процесс совмещает химический изотопный обмен в системе H<sub>2</sub>—H<sub>2</sub>O на специальном катализаторе в противоточной колонне и электролиз воды в нижнем узле обращения потоков. Для целей детритизации в колонну подают воду природного изотопного состава, поэтому верхний узел обращения потоков отсутствует, что несколько упрощает установки такого типа. Разделение изотопов происходит за счёт протекания реакций



при которых тяжёлые изотопы водорода концентрируются в жидкой фазе (воде), дополнительно эффективность установки повышается за счёт изотопного эффекта при электролизе воды по реакции



где тяжёлые изотопы также концентрируются в жидкой фазе. Подробное описание процесса приведено в работах [53, 54].

В России СЕСЕ-процесс был исследован, разработан в РХТУ им. Д.И. Менделеева [54], включая отечественную технологию производства гидрофобного платинового катализатора на основе сополимера стирола с дивинилбензолом (катализатор РХТУ-3СМ). В 1995 г. в рамках работ по созданию тяжеловодного исследовательского реактора ПИК в НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ была введена в эксплуатацию пилотная установка ЭВИО [55] на основе СЕСЕ-процесса с использованием указанного катализатора. Эта установка позволяет исследовать процесс детритизации тяжёлой воды для поддержа-

ния её оптимального изотопного состава. Изначально установка была предназначена для удаления трития из некондиционной тяжёлой воды с концентрацией дейтерия больше 45% ат. В 2004 и 2017 г. [56] к установке ЭВИО были добавлены новые колонны химического изотопного обмена (Liquid Phase Catalytic Exchange, LPCE), что сделало возможным детритизацию тяжёлой воды. В настоящее время установка ЭВИО находится в эксплуатации более 25 лет, за это время коллективом Лаборатории разделения изотопов водорода (ЛРИВ) НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ были получены уникальный опыт и научные результаты. Установка ЭВИО также используется для переработки тяжеловодных отходов и производства чистого дейтерия и тяжёлой воды для реализации на внутреннем рынке и за рубежом.

В настоящее время для реактора ПИК создаётся промышленная установка УИТ для удаления трития из тяжёлой воды на основе комбинации СЕСЕ-процесса и криогенной ректификации водорода [40], которая должна быть введена в эксплуатацию в 2021—2022 гг. [40]. Производительность УИТ по тритию будет составлять 1110 ТБк/год (30 000 Ки/год), по тритию 40 кг/год, максимальное допустимое содержание трития в тяжёлой воде реактора ПИК 74 ГБк/кг D<sub>2</sub>O (2 Ки/кг) [40].

Работы по использованию СЕСЕ-процесса для очистки теплоносителя атомных реакторов ведут в РХТУ им. Д.И. Менделеева [57]. В РХТУ им. Д.И. Менделеева также был создан катализатор РХТУ-ЗСМ, который показал высокую эффективность и надёжность в течение более чем 25 лет эксплуатации в установке ЭВИО [56], а также разрабатываются более эффективные катализаторы [58, 59], в том числе для разделения изотопов водорода в системе вода—водород по двухтемпературной схеме [60].

По своим основным параметрам установка для детритизации жидких тритийсодержащих отходов в топливном цикле реактора ДЕМО-ТИН на основе СЕСЕ-процесса [17] сопоставима с описанной установкой УИТ [40]. Параметры УИТ [40]: входящий поток 7,5 кг/ч D<sub>2</sub>O, производительность электролизёра ~11,8 м<sup>3</sup>/ч. Научные коллективы в России обладают достаточным опытом для проектирования, создания и эксплуатации подобного рода установок. Большинство необходимых комплектующих и материалов производятся в России в настоящее время. Единственным серьёзным исключением являются высокопроизводительные электролизёры, предназначенные для работы с тритием. Поэтому уровень готовности СЕСЕ-процесса оценен в TRL 4 с перспективой перехода на TRL 5 (табл. 7) после успешного ввода в эксплуатацию установки УИТ в ПИЯФ (г. Гатчина). Для дальнейшего развития технологии необходимы специальные стенды для отработки совместной эксплуатации в рамках замкнутого тритиевого цикла.

Т а б л и ц а 7. TRL системы разделения водород—другие газы

TRL	Россия	Мир
1	+	+
2	+	+
3	+	+
4	+	+
5	±	
6		
7		
8		
9		

Примечание. ■ — достигнутый уровень, ■ — в процессе.

Для данной технологии уровень готовности соответствует мировому опыту, в частности, установка на основе СЕСЕ-процесса эксплуатируется в КИТ [61] для переработки тритийсодержащих отходов, образующихся при экспериментальной работе стендовой базы КИТ. Несмотря на проектные работы, проведённые в ЖЕТ [62], конструкция установки на основе СЕСЕ-процесса не была начата. Вместо этого в 2014 г. была построена и введена в эксплуатацию установка на основе криогенной дистилляции водорода [63]. Это позволяет оценить уровень готовности данной технологии в мире на уровне TRL 4 в сфере термоядерных реакторов.

**Мембранная экстракция водорода из «выхлопных» газов токамака.** Для ТЦ ДЕМО-ТИН мембранное разделение водородсодержащих смесей будет применено для переработки «выхлопа» токамака, который содержит топливные изотопы водорода (тритий и дейтерий), примесный протий, гелий, газы для улучшения свойств плазмы (PEG, такие как N<sub>2</sub>, Ne, Ar и некоторые инертные газы), а также газы, образованные при взаимодействии плазмы с первой стенкой (углеводороды, пары воды и др.), атмо-

сферные газы ( $N_2$ ,  $O_2$  и др.) и другие примесные газы (аммиак и др.). В ДЕМО-ТИН рассматривается трёхстадийная переработка «выхлопа» токамака с помощью мембранных и мембранно-каталитических реакторов для выделения молекулярного водорода, выделения водорода из водородсодержащих соединений, детритизации остаточных газов. Производительность системы для переработки «выхлопа» токамака должна составлять не менее 65 моль/ч по входящему потоку [17, 64], что примерно в 5 раз меньше производительности аналогичной системы установки ИТЭР [65].

Для применения в ТЦ ДЕМО-ТИН нами рассматриваются натекатели с палладий-серебряными мембранами как наиболее отработанная технология. Они эксплуатируются при давлении в диапазоне 1,5—2 атм. Выделение молекулярного водорода из смеси газов происходит за счёт высокой селективности сплавов палладия по отношению к водороду. Выделение водорода из соединений (например,  $CH_4$ ,  $H_2O$ ,  $NH_3$  и др.) происходит за счёт предварительного каталитического разложения или реформинга. Движущая сила процесса обусловлена разницей парциального давления водорода с разных сторон мембраны. Для большей эффективности процесса в подмембранном пространстве создают значительное разрежение. Подробное описание процесса приведено в работах [66, 67].

Мембранное разделение для выделения высокочистого водорода — известный и широко применяющийся метод, в том числе в России. К настоящему времени в РФ исследования в этой сфере были направлены на модификацию известных и поиск новых функциональных материалов: разрабатывались композитные мембранные материалы на основе ванадия, ниобия, тантала или их сплавов с покрытиями из палладия [68—70]. Подобные материалы обеспечивают сопоставимые или превосходящие показатели по водородопроницаемости по сравнению с чистым палладием или палладий-серебряными сплавами и требуют значительно меньшие затраты на производство, в основном за счёт снижения количества палладия. В работе [68] использован гальванический метод нанесения покрытий, который позволяет использовать его для мембран сложной конструкции, например трубок. Испытание таких мембранных материалов происходит на специальном лабораторном оборудовании, в том числе с использованием дейтерия для определения изотопных эффектов, а также в сочетании с каталитическими конверторами для получения водорода из  $CH_4$  и органических топлив [71].

В работе [11] описаны испытания блока химической очистки топлива в рамках комплекса, моделирующего экспериментальный замкнутый контур термоядерного реактора. Блок был предназначен для отработки технологий и испытаний аппаратов химической очистки топливной смеси. В частности, были проведены испытания палладиевых фильтров, изготовленных из капилляров ( $\varnothing$  0,5 мм и толщиной стенки 0,12 мм), выполненных из промышленного палладиевого сплава В-1. Большую часть экспериментов провели с использованием дейтерия с примесями  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  (до 4%) и  $He$  (до 90%) в диапазоне температуры 575—875 К и давления 0,1—50 МПа [11]. Авторы отметили, что отравляющего действия  $CO$ ,  $CO_2$  и  $CH_4$  не было обнаружено. Также были проведены несколько экспериментов с ДТ-смесью. В них было показано, что в указанных условиях удельная проницаемость фильтров из сплава В-1 практически одинакова с измеренной для дейтерия ( $Q_D/Q_{DT} \leq 1,05—1,07$ ) [11].

Описанные фильтры применяли в комплексе газового обеспечения экспериментов по мюонному катализу ядерных реакций синтеза (установка ТРИТОН) [72] для очистки трития, выделяемого из транспортных ловушек, а также ДТ- и НДТ-смесей перед их подачей в мишень. Данные работы были проведены в период с 1997 по 2018 г., палладиевые фильтры работали без сбоев и потери эффективности [26].

Также в РФ проводят исследования эффекта сверхпроницаемости металлов V группы (ванадий, ниобий, тантал) надтепловыми ( $\geq 1$  эВ) частицами водорода [73—75]. Данные исследования были проведены с различными изотопами водорода, в том числе с тритием (не более 10 Ки) при давлении  $10^{-2}$ — $10^{-5}$  мбар. Эксперименты показали высокую эффективность данного метода, в том числе в качестве водородного насоса [73]. Диапазон рабочих давлений и энергия частиц, необходимая для эффективной работы натекателя на эффекте сверхпроницаемости, делают его привлекательным для прямого рециклирования тритий-дейтериевой смеси из токамака или дивертора непосредственно в системы инжекции топлива [73]. Устройство на основе данного эффекта (The HERMES Setup) разработано в Технологическом институте Карлсруэ (KIT, Германия) [76], подобные работы ведутся и в других научных центрах в лабораторном масштабе. В настоящее время информация о применении сверхпроводящих мембранных устройств непосредственно в топливных циклах в термоядерных установках отсутствует.

В настоящее время в РФ доступны установки на основе палладий-серебряных мембран лабораторного масштаба, достигнут существенный прогресс в исследовании новых материалов для мембранного разделения, однако, помимо материаловедческих, необходимо решить конструкционные и инженерные проблемы для успешного внедрения палладиевых натекателей в ТЦ реактора ДЕМО-ТИН. Исходя из этого, нами оценен уровень готовности технологии мембранного разделения в TRL 4 (табл. 8). Для перехода на более высокие уровни необходимы значительное финансирование и специальные НИОКР, а также отработка технологии на специализированных тритиевых стендах.

Т а б л и ц а 8. TRL для технологии мембранной экстракции «выхлопных» газов токамака

TRL	Россия	Мир
1	+	+
2	+	+
3	+	+
4	±	+
5		+
6		+
7		
8		
9		

Примечание. ■ — достигнутый уровень, ■ — в процессе.

Установка CAPER на основе трубчатых палладиевых мембран была разработана и испытана в КИТ на тритий-дейтериевой смеси с ожидаемыми для «выхлопа» токамака примесями [77]. В настоящее время CAPER используется для тритиевого цикла установки КАТРИН наряду с системой криогенного разделения водорода и другими технологическими системами [78]. Подобные работы проводятся в США [79] и других странах. Исходя из этого, уровень готовности данной технологии в мире можно оценить на уровне TRL 6.

**Очистка водорода и разделение изотопов адсорбцией при температуре  $N_2$  жид.** Как показано в статье [17], криогенное адсорбционное разделение компонентов «выхлопа» токамака может быть применено в ТЦ ДЕМО-ТИН. Данная система рассматривается для удаления примесей с относительно высокой температурой конденсации, таких как пары воды, углеводороды, аммиак, углекислый газ, аргон и др. С помощью такой системы будет снижена нагрузка на систему мембранного разделения. Также криогенное адсорбционное разделение рассматривается как метод разделения компонентов «бланкетного газа» — смеси гелия и ИВ, которой продувается тритийвоспроизводящий бланкет.

Криогенное разделение на молекулярных ситах основано на процессе физической адсорбции газообразных компонентов на поверхности сорбента. Для криогенного разделения тритийсодержащих смесей применяют различные сорбенты (цеолиты, активированные угли, нанопористые углеродные материалы и др.). Помимо разделения и очистки газообразных смесей, на основе данного процесса могут быть созданы системы компримирования и перекачки тритийсодержащих газов [80]. Ввиду значительных изотопных эффектов возможно разделение ИВ в данной системе [81, 82].

В России работы по данной тематике редки, поэтому для анализа также были использованы работы по адсорбционному разделению ИВ. Два этих метода достаточно близки по аппаратному исполнению и условиям протекания процесса разделения, они могут быть исследованы на одних и тех же стендах. Параметры, определённые при разделении ИВ, могут быть использованы при проектировании разделительных установок для переработки смесей водорода с другими газами.

Исследование процесса адсорбции ИВ для разделения было проведено в НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ и других организациях. Были исследованы термодинамические параметры адсорбции, а также зависимость коэффициента разделения изотопомеров водорода ( $H_2$ —HT,  $D_2$ —DT,  $H_2$ — $D_2$ ) от температуры в широком диапазоне давлений для сорбентов CaE [80], NaA [81, 82], KA [83] и нанопористых углеродных материалов [84]. Работы были проведены с минимальными количествами трития, в частности, в работах [81, 82, 84] концентрация трития в разделяемых смесях составляла  $10^{-6}$ % ат. В работе [80] описаны устройство и работа криогенного форвакуумного насоса для откачки и хранения ИВ. В работе [85] описана установка МГУ-ДЕТРА для получения очищенных диводородов ( $p$ — $H_2$ ,  $o$ — $H_2$ , HD,  $p$ — $D_2$ ,  $o$ — $D_2$ , HT, DT,  $p$ — $T_2$ ,  $o$ — $T_2$ ) методом изотопного криогенно-адсорбционного разделения. Авторы отмечают вы-

сокую эффективность установки при получении нерадиоактивных диводородов, но из-за ограничений безопасности эксперименты с тритием не были проведены.

Из приведённых примеров можно заключить, что технологическая зрелость системы криогенного разделения смесей, содержащих тритий и его соединения, в России находится на уровне TRL 2—3 (табл. 9). Работы в данном направлении носят фундаментальный характер и сосредоточены на исследовании свойств сорбентов и основных параметров процесса. Эксперименты проводят с модельными объектами (стабильными ИВ и следовыми количествами трития) в лабораторном масштабе.

Таблица 9. TRL системы криоадсорбционного разделения водородсодержащих соединений

TRL	Россия	Мир
1	+	+
2	+	+
3	±	+
4		+
5		+
6		
7		
8		
9		

Примечание. ■ — достигнутый уровень, ■ — в процессе.

В мире были исследованы свойства сорбентов (молекулярных сит) при разделении смесей, содержащих водород или его соединения. Так, в работе [86] были получены изотермы адсорбции изотопов водорода, в том числе трития, на сорбентах MS5A, MS4A и активированном угле. Исследование эффективности очистки газовых смесей от примесей были проведены в различных работах: от паров воды [87], от метана [88]. В работе [89] была исследована адсорбция ИВ из смеси с гелием на сорбентах MS5A и морденита методом прорыва. Была последовательно отработана технология адсорбционного разделения смеси гелий—изотопы водорода на установках лабораторного и опытно-промышленного масштаба на модельной смеси гелий—протий (дейтерий). В работе [90] описана полупромышленная адсорбционная криогенная установка на основе сорбента MS5A и измерены основные параметры процесса. В работе [91] продемонстрирована работа крупномасштабного криоадсорбционного модуля установки PGLoop. Параметры эксперимента соответствуют процессу извлечения трития в проектируемой в Корею установке Helium Cooled Ceramic Reflector (HCCR) Test Blanket System (TBS). Эксперимент был проведён с водородом природного состава при различном содержании водорода и давлении в модуле (исследуемый сорбент MS5A). Эффективность разделения смеси гелий—водород составила 96% в сравнении с ранее полученными результатами на установках меньшего масштаба.

Из приведённых примеров следует, что технологическая зрелость системы криогенного разделения смесей, содержащих тритий и его соединения, находится в мире на уровне TRL5, а именно продемонстрирована работа крупномасштабных макетов установок криоадсорбционного разделения на модельных объектах (смесях, содержащих нерадиоактивные ИВ) в условиях, приближенных к операционным. Также исследованы свойства различных сорбентов, в том числе при взаимодействии с тритием или его соединениями.

**Удаление паров тритированной воды в скруббере (фазовый изотопный обмен).** В ТЦ ДЕМО-ТИН детритизация газовых потоков необходима при переработке «выхлопа» токамака на поздних стадиях, для удаления трития из атмосферы боксов и рабочих помещений, для ликвидации последствий аварийных ситуаций. Масштаб системы детритизации во многом будет определён требованиями радиационной безопасности по тритию.

Процесс удаления трития из газовых потоков планируется проводить в две стадии. На первой стадии тритийсодержащие вещества окисляются до воды и других оксидов в каталитическом реакторе с добавлением воздуха или кислорода [92]. На второй стадии пары тритиевой воды улавливают и переводят в жидкую фазу по реакции (2) в противоточной насадочной колонне (скруббере), в которую подают жидкую воду природного состава [92—94]. Данная технология детритизации основана на фазовом изотопном обмене (ФИО) в системе пары воды—жидкая вода.

В РХТУ им. Д.И. Менделеева совместно с сотрудниками АО «ВНИИНМ» и НИЦ «Курчатовский институт» была создана пилотная установка детритизации воздуха методом ФИО [95]. В период с 2013 по 2016 г. в РХТУ им. Д.И. Менделеева была проведена серия работ для ИТЭР [96] по исследованию процесса детритизации газовых потоков и соединений трития. В частности, были исследованы активность катализаторов окисления водорода [97, 98], массообменные характеристики процесса ФИО при применении регулярных и нерегулярных насадок из различных материалов [92, 96, 99—101], влияние влажности поступающего газа, температуры и других параметров на эффективность детритизации, а также отработаны оптимальные режимы работы установки ФИО [96, 100—102]. В работе [94] представлены результаты математического моделирования процесса. Позже математическая модель процесса была представлена и в работе [103]. Дополнительно исследовалась эффективность различных катализаторов в реакторе для окисления тритийсодержащих соединений при попадании в него дымовых компонентов (моделирование аварийной ситуации — пожара) [98].

На основе метода ФИО был разработан высокоэффективный способ улавливания паров тритированной воды для аналитических целей (пробоотбора) [104].

В 2018—2019 гг. была изготовлена и поставлена в тритиевую лабораторию АО «ВНИИНМ» установка для очистки содержащих тритий газообразных выбросов перед их сбросом в окружающую среду [105]. Установка совмещает каталитическое окисление водорода и органических соединений до воды при повышенной температуре и удаление паров тритированной воды из газового потока в противоточном насадочном аппарате. В противоточный аппарат подаётся дистиллированная вода природного состава.

Для оценки уровня готовности данной технологии нами учитывалась её автономность относительно других систем топливного цикла. Данная технология является конечной стадией переработки газообразных тритийсодержащих сбросов или воздуха из рабочих помещений. Поэтому интеграция технологии с другими может быть отработана практически на любом тритиевом объекте с сопоставимым с ТЦ ДЕМО-ТИН уровнем выброса трития. На основании перечисленного уровень готовности технологии удаления соединений трития из газовых потоков с использованием комбинации процессов каталитического окисления и фазового изотопного обмена в России можно оценить в TRL 5 (табл. 10). В дальнейшем необходимо отрабатывать данную технологию на специализированных стендах или ТЦ реактора ТИН-СТ.

Таблица 10. TRL системы детритизации газов в скруббере

TRL	Россия	Мир
1	+	+
2	+	+
3	+	+
4	+	+
5	+	+
6		
7		
8		
9		

В мире технология детритизации газовых потоков на основе фазового изотопного обмена известна и развивается для применения в масштабных тритиевых комплексах, таких как ИТЭР [94], ДЕМО и других. В работе [103] описана развитая модель процесса детритизации выбросов тяжеловодных реакторов в Канаде. В работе [106] аналитически исследована отказоустойчивость системы детритизации воздуха ИТЭР на основе фазового изотопного обмена. Было проведено сравнение с системой на основе осушителей с молекулярными ситами. Продемонстрировано значительное снижение риска отказа оборудования и большая долговечность системы на основе ФИО. В Японии разрабатывают новые и совершенствуют существующие катализаторы для окисления соединения трития [107]. В работе [108] была исследована эффективность каталитического реактора окисления трития в присутствии углеводородов (моделирование пожара). Было показано, что тритированные углеводороды образуются в реакторе, но его эффективности достаточно для их полного сжигания, отсутствуют риски неконтролируемого нагрева реактора вследствие экзотермических реакций, избыточная влажность может временно снизить эффективность реактора окисления. На основе данных, полученных в РХТУ им. Д.И. Менделеева, в Японии построена и проходит различные испытания полупромышленная установка для детритизации воздуха на

основе ФИО [109]. Уровень развития данной технологии в мире, по нашей оценке, сопоставим с уровнем в РФ и составляет TRL 5.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОЦЕНКИ

Результаты проведённого анализа обобщены в табл. 11. Достигнутый уровень TRL обозначен знаком «+», уровень, который может быть достигнут в ближайшее время в результате реализации уже начатых проектов, обозначен «±». Там же жёлтым цветом отмечены технологические разрывы с необходимыми для эксплуатации установки ТИН-СТ уровнями. Ячейки с диагональной штриховкой показывают уровень, который требуется при эксплуатации установки ТИН-СТ или на других масштабных стендах или экспериментальных комплексах, имитирующих операционные условия работы токамака. Более высокие значения (TRL 8 и 9) для технологий ТЦ необходимы при эксплуатации систем тритий-дейтериевого топливного цикла в составе комплекса установки ДЕМО-ТИН, что соотносится с методикой TRL, описанной ранее.

Т а б л и ц а 11. Сводная таблица готовности технологий ТД-цикла реактора ДЕМО-ТИН

Технология топливного цикла	Исследование			Разработка				Демонстрация	
	1	2	3	Технология топливного цикла				8	9
<b>Мембранное разделение</b>									
Россия	+	+	+	±					
Мир	+	+	+	+	+	+			
<b>Хроматографическое разделение ИВ</b>									
Россия	+	+	+						
Мир	+	+	+	+	+	+	+		
<b>Криогенное разделение</b>									
Россия	+	+	+	+	±				Достижение уровней возможно только при эксплуатации систем топливного цикла в рамках ДЕМО-ТИН
Мир	+	+	+	+	+	+	±		
<b>СЕСЕ-процесс</b>									
Россия	+	+	+	+	±				
Мир	+	+	+	+					
<b>Адсорбция при температуре N<sub>2</sub>(ж.)</b>									
Россия	+	+	±						
Мир	+	+	+	+	+				
<b>ФИО в скруббере</b>									
Россия	+	+	+	+	+				
Мир	+	+	+	+	+				

Результаты анализа зрелости технологий тритий-дейтериевого топливного цикла установки ДЕМО-ТИН (см. табл. 11) свидетельствуют о достаточно высоком уровне развития технологий криогенной ректификации водорода, детритизации газов в скруббере и СЕСЕ-процесса. Они находятся в стадии разработки (TRL 4—6), и для дальнейшего развития необходимы специальные научные программы и финансирование для преодоления существующего технологического разрыва, создания специальных стендов и интеграции технологий в рамках установки ТИН-СТ. Развитие технологий мембранного, криоадсорбционного и хроматографического разделения в России соответствует стадиям исследований и лабораторных экспериментов (TRL 1—3), за исключением мембранного разделения TRL 4, и несёт в себе наибольшие риски для запуска ТЦ установок ТИН-СТ и ДЕМО-ТИН ввиду недостаточной готовности. Рассмотренные технологии развиты в мире и имеют высокие уровни готовности в интересующей нас сфере. Важность перечисленных технологий также связана с отсутствием сопоставимых по производительности и эффективности альтернатив, что делает необходимость их освоения критически важной задачей.

Следует отметить, что технологии на стадии разработки (TRL 4—6) несут в себе существенные риски для достижения целей программы ГССД. Своевременные разработка и совершенствование этих технологий, поиск и отработка технологических решений являются актуальнейшими задачами разработки и проектирования ТЦ ДЕМО-ТИН. Также в программе развития ГССД необходимо учитывать возможность использования технологий-аналогов для минимизации рисков, а именно риска неготовности отдельных технологий к моменту запуска ТИН-СТ. Например, технология разделения водорода и примесей в мембранных палладиевых аппаратах может быть заменена технологией криоадсорбционного разделения.

С точки зрения соответствия мировому уровню технологий, которые будут использованы в ТЦ ДЕМО-ТИН, следует отметить следующее: прогресс во многих направлениях систем ТЦ ИТЭР превосходит известные аналоги в РФ. Технологическая и научная программа ИТЭР, в том числе разработка ТЦ реактора, опирается на гражданские технологии, разработанные специально для термоядерного реактора. В России развиты тритиевые технологии в военной сфере, что делает возможным осуществление процесса их трансфера в сферу гражданского применения [26, 110]. Это позволяет надеяться, что освоение некоторых перечисленных технологий для ТЦ ДЕМО-ТИН будет быстрым и эффективным. Дополнительным преимуществом ТЦ ДЕМО-ТИН является его меньший по сравнению с ТЦ ИТЭР масштаб [17], что позволяет в некоторых случаях прямо переносить отработанные в других отраслях системы и устройства.

Высокий уровень готовности в мире некоторых рассмотренных нами технологий делает привлекательной возможность импорта этих технологий, поэтому целесообразно проводить работу по усилению международного сотрудничества в сфере применения тритиевых технологий в термоядерных исследованиях.

Анализ готовности технологий позволяет начать разработку проекта дорожной карты развития технологий ТЦ ДЕМО-ТИН. При её формировании должны быть учтены основные приоритеты развития технологий с учётом текущих уровней готовности, а также возможные альтернативные разработки. Важной частью дорожной карты должны стать вопросы интеграции технологий и их отработка последовательно на стендах и разномасштабных установках (например, ТИН-СТ и ДЕМО-ТИН). Обязательным условием дальнейшего совершенствования технологий и установок является их отработка и испытания с дейтерий-тритиевыми смесями. Дорожная карта будет дополняться в соответствии с результатами анализа TRL по другим технологиям ТЦ, перечисленным в табл. 1.

## ВЫВОДЫ

На примере технологий, основанных на физико-химических процессах обращения с тритием и его соединениями в топливном цикле токамаков, продемонстрирована эффективность анализа методом TRL технологической готовности базовых систем при сооружении термоядерных и гибридных установок.

Анализ готовности технологий ТЦ ДЕМО-ТИН с использованием методики TRL показал, что в России их можно разделить на две группы.

К первой группе относятся технологии криогенной ректификации водорода, СЕСЕ-процесс и детритизация газов в скруббере. Уровень развития этих технологий сопоставим с мировым. Стадия готовности технологий разрабатываемого проекта (TRL 4—6) является наиболее ресурсно-затратной и вносит существенные риски реализации. Это связано с необходимостью отработки технологий в специальных операционных условиях, приближенных к условиям реальной эксплуатации. Такие условия возможно обеспечить в рамках прототипов термоядерных реакторов или масштабных тритиевых стендов.

Ко второй группе относятся технологии мембранного, криоадсорбционного и хроматографического разделения. Для них отмечено отставание от мирового уровня развития, которое обусловлено отсутствием или прекращением целенаправленных работ по их освоению. В этом перечне выделяется технология мембранного разделения тритийсодержащих газов, так как она рассматривается для одной из важнейших систем установки ДЕМО-ТИН (система переработки «выхлопных» газов токамака) и не имеет аналогов. Импорт устройств, функционирующих на основе данной технологии, невозможен ввиду её присутствия в перечне технологий двойного назначения. Значительный прогресс по развитию данных технологий возможен при финансировании целевых НИОКР.

Отметим, что целесообразно развивать технологии тритиевого топливного цикла в рамках единого тритиевого комплекса, в котором возможна интеграция отдельных технологий в единый тритиевый цикл. В качестве примера подобного комплекса и организации работ с технологиями термоядерного топливного цикла можно использовать крупномасштабный замкнутый контур (тритиевую лабораторию) во ВНИИЭФ (г. Саров) [11] и тритиевую лабораторию Технологического института в Карлсруэ (KIT) [111, 112].

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ № 1953 от 29.09.2020).

Авторы выражают огромную благодарность И.А. Алексееву, Б.В. Кутееву, А.В. Овчарову, М.Б. Розенкевичу, А.В. Спицину, П.В. Ширнину и А.А. Юхимчуку за экспертную оценку анализируемых технологий, консультации и предоставление дополнительных материалов, а также критические замечания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kuteev B.V. et al.** Development of DEMO-FNS tokamak for fusion and hybrid technologies. — Nucl. Fusion, 2015, vol. 55, p. 073035.
2. **Bakharev N.N. et al.** First Globus-M2 results. — Plasma Phys. Reports, 2020, vol. 46, p. 675—682.
3. **Mirnov S.V., Lazarev V.B.** Li experiments at the tokamak T-11M in field of steady state PFC investigations. — J. Nucl. Mater., 2011, vol. 415(1), p. S417—S420.
4. **Ключников Л.А., Крупин В.А., Коробов К.В., Нурғалиев М.Р., Немец А.Р., Днестровский А.Ю., Науменко Н.Н., Тугаринов С.Н., Серов С.В., Деньщиков Д.С.** Возможности спектроскопической диагностики CXRS в токамаке Т-10. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2016, т. 39, вып. 1, p. 95—104.
5. **Khvostenko P.P. et al.** Experimental thermonuclear installation tokamak T-15MD. — Probl. A. Sci. Technol. Ser. Termonucl. Fusion, 2019, vol. 42, p. 15—38.
6. **Kapustin Y.V., Rogov A.V.** The investigation of molybdenum mirror degradation at modeling of a leakage in the water cooling system of ITER. — Ibid., p. 57—65.
7. **Kukushkin A.B., Neverov V.S., Lisitsa V.S., Shurygin V.A., Alekseev A.G.** Analysis of accuracy of measuring the flux density of all hydrogen isotopes from first wall to plasma using the H-alpha diagnostics in ITER. — Ibid., 2019, vol. 42, p. 37—51.
8. **Rozenkevich M. et al.** Optimisation of fuel cycle for IGNITOR tokamak at TRINITY in Russia: critical review. — Int. J. Hydrogen Energy, 2020, vol. 45, p. 32311—32319.
9. **Subbotin M.L., Gostev A., Anashkin I., Belov A., Levin I.** Status and tasks of TRINITY site infrastructure modernization for the Ignitor project. — Fusion Eng. Des., 2019, vol. 146, p. 866—869.
10. **Khvostenko P.P. et al.** Current status of tokamak T-15MD. — Fusion Eng. Des., 2021, vol. 164, p. 112211.
11. **Веденев А.И. и др.** Экспериментальный замкнутый контур для динамического моделирования вакуумно-тритиевого комплекса термоядерных реакторов: Препринт ВНИИЭФ, 1997, вып. 57.
12. **Azizov E.A., Chuyanov V.A.** Tokamak with strong magnetic field and adiabatic plasma compression. — In: 12th IAEA Intern. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research. October 1988, p. 239—245.
13. **Kuteev B.V. et al.** Steady-state operation in compact tokamaks with copper coils. — Nucl. Fusion, 2011, vol. 51, p. 1—6.
14. **Указ Президента Российской Федерации от 16.04.2020 № 270** «О развитии техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации».
15. **Kuteev B.V., Goncharov P.R.** Fusion-fission hybrid systems: yesterday, today, and tomorrow. — Fusion Sci. Technol., 2020, vol. 76, p. 836—847.
16. **Kuteev B.V., Shpanskiy Y.S.** Status of DEMO-FNS development. — Nucl. Fusion, 2017, vol. 57, p. 076039.
17. **Ananyev S.S., Ivanov B.V., Kuteev B.V.** Analysis of promising technologies of DEMO-FNS fuel cycle. — Fusion Eng. Des., 2020, vol. 161, p. 111940.
18. **Ananyev S.S., Dnestrovskij A.Y., Kukushkin A.S., Spitsyn A.V., Kuteev B.V.** Integration of coupled modeling of the core and divertor plasmas into FC-FNS code and application to DEMO-FNS project. — Ibid., 2020, vol. 155, p. 111562.
19. **Ananyev S.S., Spitsyn A.V., Kuteev B.V.** Hydrogen isotopes distribution modeling by FC-FNS code in fuel systems of fusion neutron source DEMO-FNS. — Ibid., 2019, vol. 146, p. 582—585.
20. **Ananyev S.S., Spitsyn A.V., Kuteev B.V.** Electronic model FC-FNS of the fusion neutron source DEMO-FNS fuel cycle and modeling hydrogen isotopes flows and inventories in fueling systems. — Ibid., vol. 138, p. 289—293.
21. **Ananyev S.S., Dnestrovskij A.Y., Kukushkin A.S., Spitsyn A.V., Kuteev B.V.** Architecture of fuel systems of hybrid facility DEMO-FNS and algorithms for calculation of fuel flows in the FC-FNS model. — Fusion Sci. Technol., 2020, vol. 76, p. 503—512.
22. **Ananyev S.S., Ivanov B.V., Spitsyn A.V., Kuteev B.V.** Development of a candidate technology development program for the main DEMO-FNS fuel cycle systems. — In: 31st Symposium on Fusion Technology SOFT2020. Poster session, P1.35.
23. **Council of the European Union.** Council Regulation (EC) № 428/2009. Off. J. Eur. Union, 2009.
24. **Wassenaar Arrangement Secretariat.** Wassenaar Arrangement on Export Controls for Conventional Arms and Dual-Use Goods and Technologies. 2015, vol. II, p. 1—156.
25. **Shpanskiy Y.S.** Progress in the design of the DEMO-FNS hybrid facility. — Nucl. Fusion, 2019, vol. 59, p. 076014.
26. **Yukhimchuk A.A.** Tritium-related activities in the Russian Federation. — Fusion Sci. Technol., 2020, vol. 76, p. 567—577.
27. **Héder M.** From NASA to EU: the evolution of the TRL scale in Public Sector Innovation. — Innov. J., 2017, vol. 22, p. 1—23.
28. **European Commission.** General Annexes Horizon 2020. Horiz. 2020, Work Program. 2014—2015, p. 36.
29. **ISO 16290:2013** Space systems. Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment.
30. **Оленин Ю.А., Мотыкина Ю.В.** Перечень уровней готовности технологий и производства. — ГК «Росатом», 2018.
31. **Трубников Г.В.** Методика определения уровней готовности технологии в рамках проектов федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы», 2017.
32. **Tillack M.S. et al.** An evaluation of fusion energy R&D gaps using technology readiness levels. — Fusion Sci. Technol., 2009, vol. 56, p. 949—956.

33. **Hörstemsmeier Y.N., Butler B., Day C., Franza F.** Analysis of the EU-DEMO fuel cycle elements: Intrinsic impact of technology choices. — *Fusion Eng. Des.*, 2018, vol. 136, p. 314—318.
34. **Tillack M.S., Tanigawa H., Zinke S.J., Kimura A.** Technology readiness applied to materials for fusion applications. — In: 15th Intern. Conf. on Fusion Reactor Materials, 2011.
35. **Orsitto F.P. et al.** Diagnostics and control for the steady state and pulsed tokamak DEMO. — *Nucl. Fusion*, 2016, vol. 56(2), p. 1—23.
36. **Malkov M.P.** Industrial production of heavy water. — *Sov. J. At. Energy*, 1961, vol. 7, p. 613—619.
37. **Ентяков Б.Н.** Создание производства трития в СССР. — В сб.: Сборник докладов Пятой международной конференции и Девятой международной школы молодых ученых и специалистов им. А.А. Курдюмова. Под ред. д-ра техн. наук А.А. Юхимчука, 2014, с. 28—38.
38. **Алексеев И.А., Коноплев К.А., Тренин В.Д.** Установка изотопной очистки; <http://nrd.pnpi.spb.ru/base/isotop.html>.
39. **Trenin V.D. et al.** Full-scale experimental assembly for hydrogen isotopes separation studies by cryogenic distillation: assembly and results of the studies. — *Fusion Technol.*, 1995, vol. 28, p. 761—766.
40. **Bondarenko S.D., Alekseev I.A., Fedorchenko O.A., Vasyanina T.V.** The current status of the heavy water detritiation facility at the NRC «Kurchatov Institute»—PNPI. — *Fusion Sci. Technol.*, 2020, vol. 75(5), p. 690—695.
41. **Alekseev I., Fedorchenko O., Kravtsov P., Vasilyev A., Vznuzdaev M.** Experimental results of hydrogen distillation at the low power cryogenic column for the production of deuterium depleted hydrogen. — *Fusion Sci. Technol.*, 2008, vol. 54, p. 407—410.
42. **Alekseev I. et al.** Cryogenic distillation facility for isotopic purification of protium and deuterium. — *Rev. Sci. Instrum.*, 2015, vol. 86(12).
43. **Перевезенцев А.Н., Розенкевич М.Б.** Технология трития для термоядерного реактора. — М.: Издательский дом «Интеллект», 2018.
44. **Андреев Б.М., Селиваненко И.Л., Веденеев А.И., Голубков А., Теняев Б.** Исследование периодического процесса разделения изотопов водорода противоточным методом в системе водород—палладий. — В сб.: Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул. Звенигород, 4—8 окт. 1999 г. Сб. докл. 4-й Всерос. (Междунар.) науч. конф. — ЦНИИатоминформ, 1999, с. 147—152.
45. **Andreev B.M. et al.** Hydrogen isotope separation installation for tritium facility. — *Fusion Technol.*, 1995, vol. 28, p. 505—510.
46. **Бучирин А.В., Голубков А.Н.** Разделение изотопов водорода на Pd-содержащем сорбенте. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2009, вып. 3, с. 61—63.
47. **Andreev B.M., Magomedbekov E.P., Sicking G.H.** Interaction of Hydrogen Isotopes with Transition Metals and Intermetallic Compounds. — Heidelberg: Springer Verlag, 1996. 168 p.
48. **Перевезенцев А.Н., Андреев Б.М., Капышев В.К., Ривкис Л.А., Малек М.П., Быстрицкий В.М., Столупин В.А.** Гидриды интерметаллических соединений и сплавов, их свойства и применение в атомной технике. — Физика элементарных частиц и атомного ядра, 1988, вып. 19, с. 1386—1439.
49. **Lässer R. et al.** Preparative gas chromatographic system for the JET Active Gas Handling System — tritium commissioning and use during and after DTE1. — *Fusion Eng. Des.*, 1999, vol. 47, p. 301—319.
50. **Horen A.S., Lee M.W.** Metal hydride based isotope separation. Large-scale operations. — *Fusion Technol.*, 1992, vol. 21, p. 282—286.
51. **Heung L.K., Sessions H.T., Xiao X., Mentzer H.L.** Demonstration of the next-generation TCAP hydrogen isotope separation process. — *Fusion Sci. Technol.*, 2009, vol. 56, p. 1471—1475.
52. **Neugebauer C., Hörstemsmeier Y., Day C.** Technology development for isotope rebalancing and protium removal in the EU-DEMO fuel cycle. — *Fusion Sci. Technol.*, 2020, vol. 76, p. 215—220.
53. **Spagnolo D.A., Miller A.I.** CECE alternative for upgrading/detritiation in heavy water nuclear reactors and for tritium recovery in fusion reactors. — *Fusion Technol.*, 1995, vol. 28, p. 748—754.
54. **Andreev B.M. et al.** Installations for separation of hydrogen isotopes by the method of chemical isotopic exchange in the water—hydrogen system. — *Fusion Technol.*, 1995, vol. 28, p. 515—518.
55. **Fedorchenko O.A., Alekseev I.A., Bondarenko S.D., Vasyanina T.V.** Recent progress in the experimental study of LPCE process on EVIO pilot plant. — *Fusion Sci. Technol.*, 2017, vol. 71, p. 432—437.
56. **Fedorchenko O.A., Alekseev I.A., Bondarenko S.D., Vasyanina T.V.** Experimental results and experience with the LPCE process. — *Fusion Sci. Technol.*, 2020, vol. 76, p. 341—346.
57. **Rozenkevich M.B. et al.** Atomic-hydrogen energy and tritium purification of NPP discharges based on WWER generation 3 + reactors. — *Nanotechnologies Russ.*, 2020, vol. 15, p. 350—355.
58. **Ткаченко В.А., Овчаров А.В., Розенкевич М.Б.** Концентрационная зависимость скорости каталитического изотопного обмена водорода с парами воды на катализаторе PXTU-3СМ. — Атомная энергия, 2016, vol. 121, p. 340—346.
59. **Ivanova N.A., Levchenko M.A., Pak Y.S.** Synthesis, characterization and application of thermostable hydrophobic Pt catalysts for oxidation of H<sub>2</sub>. — *Katal. v Promyshlennosti*, 2018, vol. 18, p. 57—65.
60. **Bukin A.N. et al.** Development of technology for liquid radioactive waste detritiation by two-temperature catalytic isotope exchange method in a water-hydrogen system. — *Fusion Sci. Technol.*, 2020, vol. 76, p. 358—365.
61. **Welte S. et al.** Setup and commissioning of a combined water detritiation and isotope separation experiment at the Tritium Laboratory Karlsruhe. — *Fusion Eng. Des.*, 2013, vol. 88, p. 2251—2254.
62. **Pervezentsev A.N., Bell A.C.** Development of water detritiation facility for JET. — *Fusion Sci. Technol.*, 2008, vol. 53, p. 816—829.
63. **Smith R.** The AGHS at JET and preparations for a future DT campaign. — *Fusion Sci. Technol.*, 2015, vol. 67, p. 571—575.
64. **Ananyev S.S., Ivanov B.V., Dnestrovskiy A., Kukushkin A.S., Spitsyn A.V., Kuteev B.V.** Concept development and candidate technologies selection for the DEMO-FNS fuel cycle systems. — *Nucl. Fusion*, 2021, no. Ii.

65. **Bornschein B. et al.** Tritium tests with a technical PERMCAT for final clean-up of ITER exhaust gases. — *Fusion Eng. Des.*, 2003, vol. 69, № 1—4 SPEC, p. 51—56.
66. **Rahimpour M.R., Samimi F., Babapoor A., Tohidian T., Mohebi S.** Palladium membranes applications in reaction systems for hydrogen separation and purification: a review. — *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2017, vol. 121, p. 24—49.
67. **Tosti S., Pozio A.** Membrane processes for the nuclear fusion fuel cycle. — *Membranes (Basel)*, 2018, vol. 8, p. 1—14.
68. **Alimov V.N., Busnyuk A.O., Notkin M.E., Livshits A.I.** Pd—V—Pd composite membranes: hydrogen transport in a wide pressure range and mechanical stability. — *J. Memb. Sci.*, 2014, vol. 457, p. 103—112.
69. **Alimov V.N., Busnyuk A.O., Notkin M.E., Peredistov E.Y., Livshits A.I.** Hydrogen transport through V—Pd alloy membranes: hydrogen solution, permeation and diffusion. — *J. Memb. Sci.*, 2015, vol. 481, p. 54—62.
70. **Busnyuk A.O., Notkin M.E., Grigoriadi I.P., Alimov V.N., Lifshitz A.I.** Thermal degradation of a palladium coating on hydrogen-tight niobium membranes. — *Tech. Phys.*, 2010, vol. 55, p. 117—124.
71. **Alimov V.N. et al.** Extraction of ultrapure hydrogen with V-alloy membranes: from laboratory studies to practical applications. — *Int. J. Hydrogen Energy*, 2018, vol. 43, p. 13318—13327.
72. **Юхимчук А.А., Апасов В.А., Виноградов Ю.И. и др.** Комплекс газового обеспечения экспериментов по мюонному катализу ядерных реакций синтеза. — *Приборы и техника эксперимента*, 1999, т. 6, с. 17—23.
73. **Yukhimchuk A.A. et al.** Prometheus setup for study of tritium superpermeation. — *Fusion Sci. Technol.*, 2002, vol. 41, p. 929—933.
74. **Skovoroda A.A. et al.** Plasma-driven superpermeation of hydrogen through Nb membranes: Bulk effects. — *J. Nucl. Mater.*, 2002, vol. 306, p. 232—240.
75. **Musyaev R.K. et al.** Study of hydrogen isotopes superpermeation through vanadium membrane on Prometheus setup. — *Fusion Sci. Technol.*, 2008, vol. 54, p. 523—525.
76. **Peters B.J., Day C.** Analysis of low pressure hydrogen separation from fusion exhaust gases by the means of superpermeability. — *Fusion Eng. Des.*, 2017, vol. 124, p. 696—699.
77. **Bornschein B. et al.** Successful experimental verification of the tokamak exhaust processing concept of ITER with the CAPER facility. — *Fusion Sci. Technol.*, 2005, vol. 48, p. 11—16.
78. **Bornschein B.** The closed tritium cycle of KATRIN. — *Prog. Part. Nucl. Phys.*, 2006, vol. 57, p. 38—48.
79. **Wilson J., Becnel J., Demange D., Rogers B.** The ITER tokamak exhaust processing system permeator and palladium membrane reactor design. — *Fusion Sci. Technol.*, 2019, vol. 75, p. 802—809.
80. **Alekseev I.A., Karpov S.P., Trenin V.D.** Zeolite cryopumps for hydrogen isotopes transportation. — *Fusion Technol.*, 1995, vol. 28, p. 499—504.
81. **Alekseev I., Trenin V.** Temperature dependence of the separation factor for hydrogen isotopes during adsorption on zeolite NaA. — *Russian J. of Applied Chemistry*, 1993, vol. 66, p. 111—115.
82. **Alekseev I.A., Varanov I.A., Novozhilov V.A., Sukhorukova G.A., Trenin V.D.** Separation of hydrogen isotopes H<sub>2</sub>—HT and D<sub>2</sub>—DT by adsorption on NaA synthetic zeolites. — *Sov. At. Energy*, 1983, vol. 54, p. 423—424.
83. **Парбузин В.С., Лукьянов А.А., Яковлев В.А.** Теплоты адсорбции тритийсодержащих диводородов на внешней поверхности кристаллов цеолита типа КА. — *Вестник Московского университета. Сер. 2. Химия*, 2001, вып. 42, с. 256—258.
84. **Bondarenko S.D., Alekseev I.A.** Study of isotopic effect for hydrogen and deuterium adsorption on nanoporous carbon (NPC) at 67—78 K. — *Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials*, 2007, p. 493—497. doi:10.1007/978-1-4020-5514-0\_62.
85. **Парбузин В.С., Яковлев В.А.** МГУ-ДЕТРА — многоцелевая газоразделительная установка для получения адсорбцией высокообогащенных дейтерия и трития. — *Вестник Московского университета. Сер. 2. Химия*, 2003, вып. 44, с. 299—303.
86. **Kawamura Y. et al.** Adsorption isotherms for tritium on various adsorbents at liquid nitrogen temperature. — *Fusion Technol.*, 2000, vol. 37, p. 54—61.
87. **Bekris N., Hutter E., Albrecht H., Penzhorn R.D., Murdoch D.** Cold trapping of traces of tritiated water from the helium loops of a fusion breeder blanket. — *Fusion Eng. Des.*, 2001, vol. 58—59, p. 423—428.
88. **Enoeda M. et al.** Recovery of hydrogen isotopes and impurity mixture by cryogenic molecular sieve bed for GDC gas cleanup. — *Fusion Technol.*, 1995, vol. 28, p. 591—596.
89. **Munakata K., Kawamura Y.** Adsorption behavior of hydrogen and deuterium on natural mordenite adsorbent at 77 K. — *Fusion Sci. Technol.*, 2012, vol. 62, p. 71—76.
90. **Beloglazov S., Bekris N., Glugla M., Wagner R.** Semi-technical cryogenic molecular Sieve Bed for the tritium extraction system of the test blanket module for ITER. — *Fusion Sci. Technol.*, 2005, vol. 48, p. 662—665.
91. **Park S.C. et al.** Hydrogen adsorption performance for large-scale cryogenic molecular sieve bed. — *Fusion Eng. Des.*, 2019, vol. 146, p. 1863—1867.
92. **Perevezentsev A.N., Rozenkevich M.B., Pak Y.S., Marunich S.A., Bukin A.N.** Phase isotope exchange of water as a gas detritiation method. — *Theor. Found. Chem. Eng.*, 2013, vol. 47, p. 47—54.
93. **Perevezentsev A.N. et al.** Wet scrubber column for air detritiation. — *Fusion Sci. Technol.*, 2009, vol. 56, p. 1455—1461.
94. **Perevezentsev A.N. et al.** Wet scrubber technology for tritium confinement at ITER. — *Fusion Eng. Des.*, 2010, vol. 85, p. 1206—1210.
95. **Розенкевич М.Б. и др.** Новая технология детритизации газовых потоков. — *Перспективные материалы*, 2013, вып. 14, с. 345—351.
96. **Rozenkevich M. et al.** Main features of the technology for air detritiation in scrubber column. — *Fusion Sci. Technol.*, 2016, vol. 70, p. 435—447.

97. **Букин А.Н., Горбатенко Е.А., Марунич С.А., Розенкевич М.Б.** Особенности глубокого каталитического окисления водорода с использованием катализатора Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> применительно к процессу детритизации воздуха. — Успехи в химии и химической технологии, 2010, вып. XXIV, с. 44—49.
98. **Ivanova A.S., Bukin A.N., Marunich S.A., Pak Y.S., Rozenkevich M.B.** Catalytic oxidation of trace quantities of hydrogen in tritium-containing gas flows in the event of a fire at nuclear facilities. — At. Energy, 2016, vol. 120, p. 127—133.
99. **Гаспарян М.Д. и др.** Применение керамических высокопористых блочно-ячеистых контактных устройств в процессе фазового обмена изотопов водорода. — Химическая промышленность сегодня, 2014, вып. 9, с. 35—43.
100. **Сумченко А.С. и др.** Влияние способа запуска насадочной колонны на эффективность процессов ректификации воды и детритизации газов методом фазового изотопного обмена. — Теоретические основы химической технологии, 2015, вып. 49, с. 267—276.
101. **Bukin A.N., Moseeva V.S., Rozenkevich M.B.** Isotope purification of gases containing deuterium and tritium by the method of the phase isotopic exchange of water. — Theor. Found. Chem. Eng., 2018, vol. 52, p. 488—494.
102. **Букин А.Н., Сумченко А.С., Розенкевич М.Б.** Разработка оптимальных режимов работы установки детритизации воздуха методом фазового обмена при его относительной влажности от 0 до 100%. — Успехи в химии и химической технологии, 2012, вып. XXVI, с. 11—15.
103. **Busigin A.** Rigorous tritium wet scrubber column modeling and design. — Fusion Sci. Technol., 2020, vol. 76, p. 252—256.
104. **Букин А.Н., Иванова А.С., Розенкевич М.Б., Пак Ю.С., Марунич С.А.** Способ отбора проб тритированной воды методом фазового изотопного обмена. Заводская лаборатория. — Диагностика материалов, 2017, вып. 83, с. 27—31.
105. **Ганжур О.** Учёные ВНИИИМ сделали ядерную батарейку для авиации и космоса. Страна Росатом, 2020.
106. **Hayashi T. et al.** R&D of atmosphere detritiation system for ITER in JAEA. — Fusion Eng. Des., 2010, vol. 85, p. 1386—1390.
107. **Iwai Y., Edao Y., Asahara H., Hayashi T.** Development of hydrophobic platinum catalyst for oxidation of tritium in JAEA. — Nucl. Mater. Energy, 2016, vol. 9, p. 267—272.
108. **Edao Y., Sato K., Iwai Y., Hayashi T.** Effect of hydrocarbons on the efficiency of catalytic reactor of detritiation system in an event of fire. — J. Nucl. Sci. Technol., 2016, vol. 53, p. 1831—1838.
109. **Kurihara K.** Current status of ITER components manufacturing and JT-60SA assembly. — In: Symposium on the ITER/BA Activities Fusion Energy Forum of Japan, 2018.
110. **Yukhimchuk A.A.** Tritium activities in Russia. — Fusion Sci. Technol., 2002, vol. 41, p. 334—338.
111. **Welte S., Besserer U., Osenberg D., Wendel J.** Tritium Laboratory Karlsruhe: Administrative and technical framework for isotope laboratory operation. — Fusion Sci. Technol., 2015, vol. 67, p. 635—638.
112. **Wendel J. et al.** 30 Years Tritium Laboratory Karlsruhe — From basic technology to advanced experiments and analytics. — In: 31st Symposium on Fusion Technology, SOFT2020. Poster session, P1.799.



Борис Владимирович Иванов, м.н.с.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Сергей Станиславович Ананьев, в.н.с., к.ф.-м.н., лауреат премий Правительства РФ, им. И.В. Курчатова и А.П. Александрова; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия  
Ananyev\_SS@nrcki.ru

Статья поступила в редакцию 12 сентября 2021 г.  
После доработки 24 сентября 2021 г.  
Принята к публикации 28 сентября 2021 г.  
Вопросы атомной науки и техники.  
Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 44, вып. 4, с. 5—24.