

УДК 621.039.633

**КОНЦЕПЦИЯ ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА ТОКАМАКА ИГНИТОР***А.Н. Перевезенцев<sup>1</sup>, М.Б. Розенкевич<sup>1</sup>, М.Л. Субботин<sup>2</sup>*<sup>1</sup>*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия*<sup>2</sup>*НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

В 2015 г. была закончена разработка концептуального проекта ИГНИТОР — российско-итальянского экспериментального токамака, определены параметры всех систем, включая топливную систему. В настоящей работе на основе анализа организации топливного цикла крупных термоядерных установок JET, TFTR, ITER предложена комплексная технологическая схема обращения со всеми тритийсодержащими газовыми и вторичными водными потоками, ожидаемыми при эксплуатации токамака ИГНИТОР. Эта схема включает систему хранения дейтерия и трития в газовых баллонах под давлением 0,4 МПа, очистку отработанной газовой смеси из плазменной камеры с использованием «горячего геттера», разделение изотопной смеси дейтерия и трития методом вытеснительной газовой хроматографии, очистку технологических газовых потоков и воздуха с использованием мокрого скруббера, детритизацию водных потоков методом химического изотопного обмена водорода с водой. Проведена оценка основных технических параметров аппаратов, включённых в состав технологической схемы.

**Ключевые слова:** экспериментальная термоядерная установка, проект ИГНИТОР, топливный цикл, хранение трития и дейтерия, очистка газовой смеси, разделение изотопов, детритизация водных потоков.

**FUEL CYCLE CONCEPT OF TOKAMAK IGNITOR***A.N. Perevezentsev<sup>1</sup>, M.B. Rozenkevich<sup>1</sup>, M.L. Subbotin<sup>2</sup>*<sup>1</sup>*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*<sup>2</sup>*NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

In 2015, the development of the conceptual design of IGNITOR, a Russian-Italian experimental thermonuclear tokamak, was completed, and the parameters of all the systems including the fuel system have been determined. In this paper a complex technological scheme for handling all the tritium-containing gas and secondary water streams expected at the operation of the IGNITOR tokamak is proposed based on the analysis of the fuel cycles of large thermonuclear facilities JET, TFTR and ITER. The scheme includes: a system for storing deuterium and tritium in gas cylinders at a pressure of 0.4 MPa; purification of the exhaust gas mixture from the plasma chamber using a «hot getter»; separation of deuterium and tritium isotopes by the method of displacement gas chromatography; purification of process gas streams and air using a wet scrubber; detritiation of water flows by chemical isotope exchange of hydrogen with water. The estimation of the main technical parameters of the devices included in the technological scheme was carried out.

**Key words:** experimental thermonuclear installation, project IGNITOR, fuel cycle, storing deuterium and tritium, separation of the isotope mixture, purification of gas streams, detritiation of water flows.

DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-1-83-89

**ВВЕДЕНИЕ**

Главная идея российско-итальянского проекта экспериментальной термоядерной установки — токамака ИГНИТОР заключается в достижении условий зажигания термоядерной плазмы с использованием омического нагрева сильным тороидальным током [1]. Начатые в 2004 г. переговоры завершились в 2015 г. разработкой концептуального проекта реактора [2], выполненного организованной годом ранее российско-итальянской рабочей группой и открывающего дорогу к технической стадии проекта.

Реактор ИГНИТОР представляет собой компактный токамак, предназначенный для работы с дейтерий-тритиевой плазмой. Поэтому важнейшей составной частью проекта является топливный цикл, включающий в себя системы хранения и подачи газов в плазменную камеру, систему очистки и переработки отработанной газовой смеси, а также системы очистки от трития газовых и водных потоков с целью снижения радиационной нагрузки на обслуживающий персонал и окружающую среду. Все эти системы должны быть технически и экономически эффективными, обеспечивающими контроль за сбросом трития в окружающую среду как при нормальной работе реактора, так и в аварийных ситуациях. Предложение о дизайне этих систем, основанное на технологиях, используемых или предлагаемых для использования в других крупных термоядерных установках (JET, ITER, TFTR), содержится в [3]. Однако, принимая во внимание исследовательское назначение реактора ИГНИТОР и значительно меньший его

размер по сравнению с упомянутыми токамаками-реакторами, предложенные ранее технологии могут быть подвергнуты ревизии, особенно с учётом минимизации затрат на реализацию каждой из необходимых подсистем обращения с дейтерий-тритиевой смесью.

Приведённый далее анализ возможных технологий основан на информации, содержащейся в [3—5]. При этом для реактора ИГНИТОР были приняты следующие ограничения:

— общее количество трития, необходимого для заполнения вакуумной камеры, систем её питания и хранения, не превысит 3 г в день, а в случае аварийной ситуации всё это количество может оказаться внутри производственных помещений;

— концентрация примесей в отработанной плазме может быть на уровне 9%, причём 3% из них приходится на водородсодержащие вещества (вода, метан, аммиак и др.);

— величина потока примесей без учёта содержащегося в нём водорода составит  $4 \cdot 10^{-3}$  моль/ч;

— максимальная величина газового потока из плазменной камеры составит 5 моль/ч, концентрация трития в нём — несколько десятков  $\text{млн}^{-1}$  (по объёму);

— количество трития, вводимого в плазменную камеру, составляет около 0,1 г.

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Система хранения и подачи топливной смеси.** Традиционно для хранения изотопов водорода и их подачи в плазменную камеру используют металлические геттеры. Достоинство использования таких геттеров заключается в возможности хранения больших количеств водорода при низких давлениях. Например, гидрид урана  $\text{UH}_3$  содержит 1,5 моля водорода на 1 моль урана при равновесном давлении водорода при комнатной температуре, составляющем несколько Па. Следовательно, в дополнение к функции хранения водорода геттер может функционировать как вакуумный насос для откачки водорода. Водород может быть легко десорбирован до давления 0,1 МПа путём нагревания геттера до температуры около 670 К.

Однако геттерные контейнеры для хранения водорода имеют следующие недостатки:

— у образующих гидриды металлов сильно выражены пирофорные свойства (химическая активность по отношению к воздуху и его компонентам), которые заставляют принимать специальные меры безопасности при конструировании и эксплуатации контейнеров [6];

— измерение количества трития на объекте с использованием комплекса параметров — давления, объёма, температуры, концентрации невозможно, а калориметрические измерения количества трития на месте обладают низкой экспрессностью, точностью и воспроизводимостью из-за многочасовых временных промежутков, требуемых для охлаждения геттерной ловушки перед адсорбцией водорода или нагревания для его десорбции [7];

— для этих ловушек характерным является замедление процесса откачки водорода из системы вследствие так называемого «эффекта покрытия», вызванного содержанием в газовой смеси инертного газа;

— использование высоких температур, необходимых для процесса десорбции водорода, может вызывать повышенную проницаемость трития через стенки контейнера в рабочие помещения, что приводит к необходимости использования не коммерческих, а специально разработанных контейнеров.

С учётом всего изложенного представляется более предпочтительным использовать для хранения изотопов водорода и их подачи в систему питания плазменной камеры газовые баллоны под давлением. Это даёт возможность:

— хранения достаточно большого количества водорода при относительно низких давлениях;

— обеспечить требуемую точность измерения количества газа и величины его потока с использованием контроллеров и измерителей газового потока;

— обеспечить точное измерение в текущее время и непосредственно на месте хранения общего количества хранящегося трития с использованием ионизационной камеры и комплекса параметров: давления, объёма, температуры. Для более точного измерения количества трития легко может быть осуществлён отбор проб для количественного газового анализа. Например, газохроматографический метод анализа позволяет определить химический и изотопный состав смеси с точностью около 1% с пределом определения на уровне сотен  $\text{млн}^{-1}$  [8];

— метод позволяет использовать для хранения изотопов коммерчески доступные газовые баллоны.

**Химическая очистка отработанной смеси из плазменной камеры.** Для выделения изотопов водорода из смеси с другими газами наиболее часто рекомендуется использование метода диффузии водорода через палладиевые мембраны [9]. Этот метод основан на свойстве мембран, изготовленных из палладиевых сплавов, селективно пропускать только водород. Очевидно, что для переработки больших потоков водородсодержащих газовых смесей этот метод является наилучшим.

Однако этот метод требует поддержания большой разности давлений на мембране при прокачке всего водородсодержащего потока. При этом экспериментальный опыт показывает, что достижение низкой концентрации водорода в исходной газовой смеси на выходе из мембранного аппарата вызывает большие трудности: согласно [3] остаточная концентрация водорода в нём может составлять несколько процентов. Для увеличения степени извлечения водорода необходимо использовать несколько последовательных мембранных аппаратов.

Применительно к топливному циклу ИГНИТОР представляется более предпочтительным вариантом очистки газовой смеси из плазменной камеры использование так называемых «горячих геттеров». Материалы, являющиеся водородными геттерами, при повышенных температурах являются очень активными с точки зрения образования оксидных, нитридных, карбидных и др. соединений металлов. В реакциях, приводящих к образованию этих соединений, содержащийся в исходных примесях водород выделяется в молекулярной форме [10]. В результате на выходе в газовой смеси, прошедшей через горячий геттер, остаются только водород и инертные газы. Водород из этой смеси может быть выделен за счёт адсорбции на водородном геттере при комнатной температуре. Использование водородных геттеров с низким равновесным давлением сорбции, например, урана, позволяет достичь очень низкой остаточной концентрации в примесных газах. Этот метод успешно использовался на тритиевом заводе термоядерной установки JET для очистки отработанной газовой смеси из плазменной камеры токамака [11].

Недостатком этого метода является образование твёрдых радиоактивных отходов. Однако применительно к токамаку ИГНИТОР это обстоятельство не представляет особой проблемы вследствие ожидаемого малого количества таких отходов. Например, реактор, загруженный 1 кг урана и работающий как горячий геттер, с учётом образования твёрдых продуктов  $UO_2$ ,  $UC$  и  $UN$  при взаимодействии с кислородом, парами воды, углеводородами, аммиаком и др., содержащимися в качестве примесей в отработанной газовой смеси, при указанном газовом потоке из плазменной камеры позволяет проводить очистку камеры не менее чем для 10 000 импульсов.

**Разделение изотопов водорода.** Регенерация отработанного топлива из плазменной камеры путём разделения изотопной смеси на дейтерий и тритий является общепринятой практикой при эксплуатации термоядерных установок. Наиболее часто используемой для этого технологией является криогенная дистилляция водорода. Эта технология разработана и эксплуатируется в промышленном масштабе. При этом, несмотря на относительно небольшой однократный коэффициент разделения даже при температуре 20 К, высокие значения степени разделения достигаются при умножении однократного эффекта в противоточных колоннах, заполненных высокоэффективными контактными устройствами.

Однако получение моноизотопных продуктов с низким остаточным содержанием других изотопов с использованием этой технологии представляет некоторые сложности. Одной из причин этого является необходимость конвертации молекул HD, HT и DT в молекулы  $H_2$ ,  $D_2$ ,  $T_2$ , для чего необходимо весь разделяемый поток направлять в каталитический реактор, работающий при комнатной температуре. Применительно к токамаку ИГНИТОР вследствие небольшой величины потока изотопной смеси использование этой технологии потребует применения криогенных разделительных колонн очень малого диаметра. Учитывая, что для таких колонн существуют технические ограничения в организации их эффективной работы, целесообразность использования этой технологии вызывает большие вопросы. Существенным недостатком криогенной дистилляции для получения чистого тритиевого продукта применительно к реактору ИГНИТОР является необходимость задержки в разделительной колонне большого количества трития, не предусмотренного сценарием работы токамака. Это обстоятельство создаёт потребность в разработке дополнительных мер безопасности для случаев возникновения аварийных ситуаций, приводящих к выходу трития в рабочие помещения.

Альтернативой этой разделительной технологии является газовая хроматография с использованием системы водород—палладий. Эта система характеризуется большим термодинамическим однократным

разделительным эффектом [12]. Эффективность этой системы в варианте вытеснительной хроматографии успешно продемонстрирована при работе с отработанной тритийсодержащей плазмой на тритиевом заводе токамака JET [13]. Исходная изотопная смесь адсорбировалась на входе в разделительную колонну и затем перемещалась вдоль неё за счёт вытеснения сорбированных в виде гидрида палладия дейтерия и трития потоком водорода природного изотопного состава. В результате процесса разделения получали чистые тритий и дейтерий. Дейтерий-тритиевую смесь, возникающую как промежуточный продукт на выходе колонны, использовали для последующего повторного разделения. Природный водород, содержащий после нескольких циклов разделения остаточные концентрации дейтерия и трития, подвергали очистке с последующим сбросом в окружающую среду в системе детритизации воды. Одна хроматографическая колонна тритиевого завода токамака JET способна за один разделительный цикл переработать 1 моль смеси изотопов водорода. Полный разделительный цикл, включая регенерацию колонны, занимает 6 ч.

Две подобные разделительные колонны могут обеспечить все потребности топливного цикла токамака ИГНИТОР. При этом дополнительным преимуществом хроматографического метода является низкая задержка трития, которая максимально составляет величину, равную содержанию трития в питающей колонну газовой смеси.

**Детритизация технологических газовых потоков и воздуха.** Наиболее часто используемая технология детритизации газов, которая в соответствии с [3] предлагается для использования в проекте ИГНИТОР, основана на каталитическом окислении всех водородсодержащих газообразных веществ до воды с последующей осушкой газового потока за счёт адсорбции воды на молекулярных ситах. Наиболее крупной системой детритизации газов этим методом является система, реализованная на реакторе JET производительностью 500 м<sup>3</sup>/ч [14]. В такой системе после насыщения парами воды адсорбент должен быть регенерирован. Поэтому адсорбер после стадии адсорбции должен быть переведён в режим регенерации, когда его температура повышается до 600—650 К, затем аппарат должен быть охлаждён и снова переведён в режим адсорбции. Таким образом, для реализации непрерывного процесса осушки газа система должна состоять как минимум из двух аппаратов (тогда как система осушки реактора JET состоит из трёх аппаратов). Сорбент после регенерации аппарата обеспечивает остаточную влажность газа на уровне точки росы, соответствующей –90 °С, и снова переключается в режим регенерации, когда влажность газа на выходе соответствует точке росы –60 °С [15]. Осушка атмосферного воздуха с температурой 288—303 К и относительной влажностью 50% до указанных величин точки росы (эквивалентных парциальному давлению паров воды в диапазоне 9,5·10<sup>-3</sup>—0,25 Па) обеспечивает фактор осушки, равный 2·10<sup>5</sup>—4·10<sup>3</sup>. Однако анализ работы системы осушки газов токамака JET показывает, что достигаемый на практике фактор детритизации существенно меньше фактора осушки [15]. При этом закономерности процесса осушки тритийсодержащих газов на молекулярных ситах не позволяют рассчитывать на возможность существенного повышения фактора детритизации.

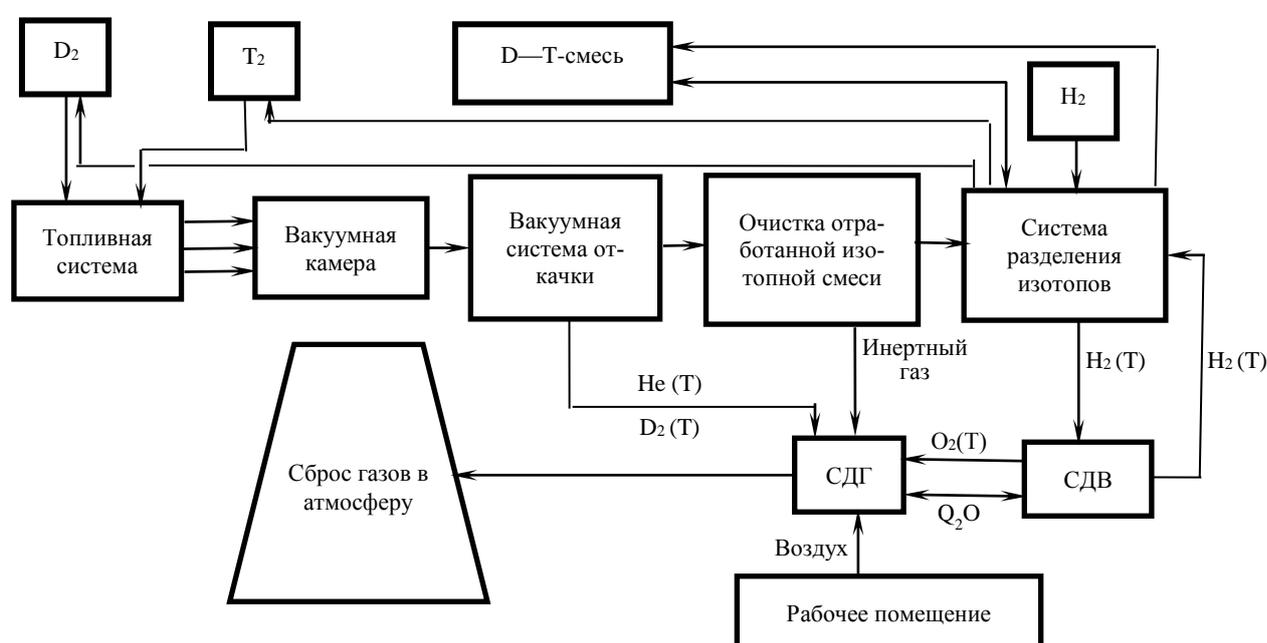
В последние годы для детритизации газовых потоков была предложена новая технология, основанная на использовании скрубберных колонн [16], возможности которой для детритизации воздуха продемонстрированы в [17]. В настоящее время эта технология принята для решения задач детритизации газовых потоков реактора ИТЭР [18]. Аналогично адсорбционной технологии на первой стадии тритий, содержащийся в водородсодержащих веществах, конвертируется в водяные пары, которые затем удаляются из газового потока в противоточной насадочной колонне за счёт многоступенчатого изотопного обмена с орошающей колонну природной водой. При этом насадочная колонна диаметром 0,35 м и высотой несколько метров обеспечивает очистку от трития газового потока 500 м<sup>3</sup>/ч с фактором детритизации 1000—10 000. Колонна может работать как в непрерывном режиме, так и в режиме ожидания. Количество образующейся тритированной воды при использовании для очистки газов скрубберной колонны равно или даже меньше, чем количество воды, собранной в адсорбере. Эта вода в дальнейшем может быть переработана.

**Детритизация воды.** Для обеспечения работоспособности всей системы детритизации газовых потоков и рециркуляции трития с целью замыкания топливного цикла в проекте ИГНИТОР предусматривается система детритизации воды, основанная на процессе CECE (Combined Electrolyzer and Catalytic Exchange). Начиная с 1980-х годов, этот процесс начал успешно использоваться в разных странах для

решения различных задач разделения изотопов водорода [19]. Суть процесса заключается в осуществлении противоточного процесса каталитического изотопного обмена водорода с водой. Тритированная вода в электролизёре конвертируется в водород, поступающий в колонну LPCE (Liquid Phase Catalytic Exchange), в которой тритированный водород обменивается с подаваемой сверху колонны жидкой водой, не содержащей трития. При этом тритий концентрируется в воде, и его концентрация в ней увеличивается сверху вниз по колонне, а в водороде,двигающемся в противоположном направлении, уменьшается. В эту же колонну поступает загрязнённый тритием водород из системы хроматографического разделения изотопов. Очищенный от трития водород сбрасывается в окружающую среду. Концентрат трития в виде водорода из электролизёра может быть направлен в систему разделения изотопов водорода. Образующийся в электролизёре кислород, содержащий примеси трития, направляется в систему детритизации газов.

## ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ КОМПЛЕКСНАЯ СХЕМА ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА ТОКАМАКА ИГНИТОР

Комплексная схема топливного цикла токамака ИГНИТОР показана на рисунке.



Принципиальная схема топливного цикла токамака ИГНИТОР: СДВ — система детритизации воды; СДГ — система детритизации газов ( $Q_2O$  — пары воды, содержащие тяжёлые изотопы водорода — дейтерий и/или тритий)

Компоненты топлива — дейтерий, тритий и их смесь хранятся в баллонах под давлением и по мере необходимости поставляются в топливную систему. Баллоны имеют вторую оболочку, находящуюся в атмосфере инертного газа. Отработанная газовая смесь из плазменной камеры и другие газы, например, гелий или дейтерий, откачиваются из плазменной камеры вакуумной системой. В зависимости от режима работы реактора вакуумная система перекачивает газовую смесь либо в систему очистки отработанной газовой смеси (в случае высокой концентрации трития), либо в систему детритизации газов (например, газы тлеющего разряда с низкой концентрацией трития). Система очистки отработанной газовой смеси отделяет смесь изотопов водорода от примесей и направляет её в систему разделения изотопов. Поток газовых примесей направляется в систему детритизации газов для удаления трития и сбрасывается в атмосферу. Система разделения изотопов разделяет смесь на чистые дейтерий и тритий, которые возвращаются в систему хранения. Смесь дейтерия и трития, полученная в результате хроматографического процесса разделения, хранится в отдельном газовом баллоне и по мере возможности подвергается дополнительному хроматографическому разделению. Водород, загрязнённый тритием в системе разделения изотопов, направляется в колонну LPCE системы детритизации воды и после очистки сбрасывается в атмосферу. Все загрязнённые тритием газовые потоки из вакуумной системы, системы очистки отработанной газовой смеси, системы детритизации воды, образованные после выделения основного потока смеси изотопов, поступают перед

сбросом в атмосферу в систему детритизации газов. Эта система предназначена также для детритизации воздуха рабочих помещений, если концентрация трития в нём превышает разрешённый уровень. Тритированная вода, образованная в системе детритизации газов, направляется для переработки в систему детритизации воды. Электролизёр этой системы установлен в герметичном боксе. Все газовые потоки, используемые во втором корпусе баллонов хранения изотопов или для создания защитной атмосферы в перчаточных боксах, перед их сбросом в окружающую среду проходят очистку в системе детритизации газов.

В таблице приведены основные расчётные параметры различных узлов топливного цикла токамака ИГНИТОР в расчёте на суммарное количество трития в цикле 10 г.

**Основные параметры системы хранения изотопов и систем детритизации воды и газов для токамака ИГНИТОР**

Система	Основные параметры
Хранение трития	Газовый баллон объёмом 10 л при давлении 0,4 МПа
Хранение дейтерия	Газовый баллон объёмом 60 л при давлении 0,4 МПа
Хранение смеси дейтерия и трития	Газовый баллон объёмом 60 л при давлении 0,4 МПа
Очистка отработанной плазмы	Переработка потока величиной до 10 моль/ч, получение водорода чистотой не менее 99,9%
Разделение изотопов	Изотопная чистота продуктов хроматографического разделения (дейтерия и трития) более 99,0%
Детритизация воды	Производительность СЕСЕ установки 10 кг/ч тритированной воды, производительность электролизёра 25 нм <sup>3</sup> /ч, фактор детритизации в колонне LPCE 10 <sup>5</sup> —10 <sup>6</sup> в зависимости от концентрации трития в электролизёре
Детритизация газов	Производительность скрубберной колонны 500 нм <sup>3</sup> /ч, фактор детритизации 10 <sup>3</sup> —10 <sup>4</sup> в зависимости от концентрации трития в газе на входе в колонну

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основываясь на анализе технологий, принятых при организации топливных циклов экспериментальных термоядерных токамаков-реакторов JET, ITER, TFTR, и предпроектных параметрах, предложена комплексная схема организации топливного цикла токамака ИГНИТОР, включающая в себя:

— хранение чистых трития и дейтерия, а также их смеси в газовых баллонах объёмом 10—60 л при давлении 0,4 МПа;

— систему химической очистки отработанной плазмы от газообразных примесей, используя метод «горячего геттера» на основе урана;

— систему разделения смеси изотопов водорода методом вытеснительной газовой хроматографии;

— систему детритизации газовых потоков и воздуха с использованием каталитической конверсии всех водородсодержащих соединений до воды с последующим удалением образовавшихся паров тритированной воды в мокрых скрубберах;

— систему детритизации воды с использованием технологии СЕСЕ (химического изотопного обмена в системе вода—водород).

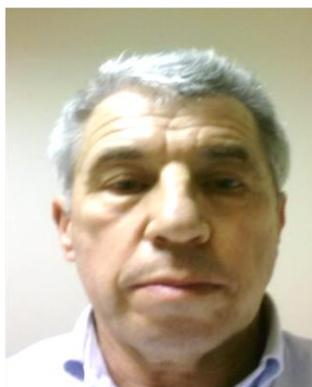
Все перечисленные технологии хорошо отработаны в России. С точки зрения авторов, использование таких технологий в интегрированном виде обеспечит надёжную защиту персонала, населения и окружающей среды от воздействия трития. При этом рассмотренный топливный цикл токамака ИГНИТОР может быть создан и эксплуатироваться с наибольшей экономической эффективностью.

Публикация подготовлена по результатам исследований, выполненных с использованием оборудования УНУ «Комплекс установки ТСП». Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (уникальный идентификатор проекта RFMEFI59917X0001).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Черковец В.Е.** Российско-итальянский проект экспериментального токамака ИГНИТОР, презентация 2010 г.; <http://2010.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/Present/>.
2. <http://www.atomic-energy.ru/Ignitor>.
3. **Rizello C., Tosti S.** Overview of the tritium system of IGNITOR. — Fusion Engineering and Design, 2008, vol. 83, p. 594—600.
4. **Azizov E.A. et al.** System analysis of the requirements to the IGNITOR tokamak site location. — In: Symposium of Fusion Technology. San Sebastian, Spain, September 29 — October 03, 2014, P3-018.

5. **Zucchetti M.B. et al.** Design basis accident analysis for the IGNITOR experiment. — *Fusion Engineering and Design*, 2015, vol. 98—99, p. 2235—2238.
6. **Perevezentsev A.N. et al.** Safety aspects of tritium storage in metal hydride form. — *Fusion Technology*, 1995, vol. 28, p. 1404—1409.
7. **Lasser R. et al.** Overview of the performance of the JET active gas handling system during and after DTE1. — *Fusion Engineering and Design*, 1999, vol. 47, p. 173—203.
8. **Lasser R. et al.** The analytical gas chromatographic system of the JET active gas handling system — tritium commissioning and use during DTE1. — *Fusion Engineering and Design*, 1999, vol. 47, p. 333—353.
9. **Koonce J. et al.** Design of ITER plasma exhaust. — *Fusion Technology*, 1995, vol. 28, p. 630—635.
10. **Perevezentsev A.N. et al.** Absorption kinetics and dynamics of gaseous impurities in helium and hydrogen by intermetallic compounds. — *J. of Alloys and Compounds*, 2002, vol. 335, p. 246—253.
11. **Perevezentsev A. et al.** Operational experience with the JET impurity processing system during and after DTE1. — *Fusion Engineering and Design*, 1999, vol. 47, p. 355—360.
12. **Andreev B.M. et al.** Effect of isotopic concentration on the separation coefficient of H—T, H—D and D—T mixtures in the hydrogen-palladium system. — *Soviet J. Atomic Energy*, 1979, vol. 45, p. 710—716 (in Russian).
13. **Lasser R. et al.** The preparative gas chromatographic system for the JET active gas handling system — tritium commissioning and use during and after DTE1. — *Fusion Engineering and Design*, 1999, vol. 47, p. 301—309.
14. **Wong D.P. et al.** The exhaust detritiation system for the JET active gas handling plant — engineering, construction, installation and first commissioning results. — *Fusion Technology*, 1992, vol. 21, p. 572—576.
15. **Sabathier F. et al.** Assessment of the performance of the JET exhaust detritiation system. — *Fusion Engineering and Design*, 2001, vol. 54, p. 547—553.
16. **Perevezentsev A.N. et al.** Wet scrubber column for air detritiation. — *Fusion Science and Technology*, 2009, vol. 56, p. 1455—1461.
17. **Rozenkevich M. et al.** Main features of the technology for air detritiation in scrubber column. — *Fusion Science and Technology*, 2016, vol. 70, p. 435—447.
18. **Perevezentsev A.N. et al.** Wet scrubber technology for tritium confinement at ITER. — *Fusion Engineering and Design*, 2010, vol. 85, p. 1206—1210.
19. **Graham W.R.C. et al.** Demonstration of very high detritiation factors with a pilot-scale CECE facility. — *Fusion Science and Technology*, 2002, vol. 41, p. 1137—1141.



Александр Николаевич Перевезенцев, ведущий научный сотрудник кафедры технологии изотопов и водородной энергетики, к. хим. н.; научный сотрудник; Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 125047 Москва, Миусская площадь 9, Россия



Михаил Борисович Розенкевич, заведующий кафедрой технологии изотопов и водородной энергетики, д. хим. н., профессор, Заслуженный работник Высшей школы РФ, награждён ведомственным знаком отличия ГК «Росатом» «Академик И.В. Курчатов» 3-й степени; Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 125047 Москва, Миусская площадь 9, Россия  
rozenkev@mail.ru



Михаил Леонидович Субботин, заместитель руководителя Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий по международному научно-техническому сотрудничеству, ветеран атомной энергетики и промышленности, награждён ведомственным знаком отличия ГК «Росатом» «Академик И.В. Курчатов» 2-й и 3-й степеней; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия

Статья поступила в редакцию 26 декабря 2017 г.  
Вопросы атомной науки и техники.  
Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 1, с. 83—89.