

УСТАНОВКА ОЧИСТКИ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ ОТ ТРИТИЯ

Тивикова Ольга Александровна (arkad@triton.vniief.ru), Юхимчук Аркадий Аркадьевич, Максимкин Игорь Петрович, Балувев Виктор Викторович, Буряк Евгений Викторович, Мусяев Рафаэль Камилевич, Кирдяшкин Александр Александрович, Рыжухина Алёна Вячеславовна, Першина Валентина Михайловна

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

При проведении работ с тритием одним из основных является вопрос обеспечения безопасности: существует необходимость очистки рабочей газовой смеси (воздух или инертный газ) от трития и поддержания общего радиационного фона в пределах регламентированной нормы. В РФЯЦ-ВНИИЭФ для этого разработан ряд специализированных установок, основанных на принципе накопления трития и тритий-содержащих примесей (тритиевая вода) на специальных сорбентах.

В докладе представлены принципиальная схема установки очистки газовой среды от трития и ее конструкция. Описаны принципы работы отдельных узлов, приведены основные технические характеристики, полученные в ходе испытаний одной из установок.

Ключевые слова: очистка газовой среды, накопление трития, тритиевая вода.

INSTALLATION FOR GAS MEDIUM PURIFICATION FROM TRITIUM

Tivikova Olga Aleksandrovna (arkad@triton.vniief.ru), Yukhimchuk Arkadij Arkadevich, Maksimkin Igor Petrovich, Baluev Viktor Viktorovich, Buryak Evgenij Viktorovich, Musyaev Rafael Kamilevich, Kirdyashkin Aleksandr Aleksandrovich, Ryzhukhina Alena Vyacheslavovna, Pershina Valentina Mihajlovna

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

When carrying out work with tritium, one of the main issues is the issue of ensuring safety: there is a need to purify gas mixture (air or inert gas) from tritium and maintain the general radiation background within the regulated norm. RFNC-VNIIEF has developed a number of specialized installations based on the principle of accumulation of tritium and tritium-containing impurities (tritium water) on special sorbents.

The report presents the schematic diagram of the installation for gas purification from tritium and its design. The principles of operation of certain system units are described. The main technical characteristics obtained during the test of one of the installations, are given.

Keywords: gas medium purification, tritium accumulation, tritium water.

Введение

В настоящее время в области ядерных и термо-ядерных исследований всё большую актуальность приобретают экспериментальные работы, связанные с использованием трития. Однако его широкое применение ограничивается тем, что тритий является радиоактивным изотопом водорода и при проведении работ с ним требуется соблюдение норм радиацион-

ной безопасности: существует необходимость очистки рабочей газовой среды (воздух или инертный газ) от трития и поддержания общего радиационного фона в пределах регламентированной нормы [1].

В настоящей работе рассмотрены конструкция и принципиальная схема установки очистки газовой среды от трития, разработанной в РФЯЦ-ВНИИЭФ, описаны принципы работы отдельных узлов установки, а также приведены основные технические

Газовые коммуникации, соединяющие последовательно один конвертер и один адсорбер через теплообменник, образуют линию очистки. В состав установки входят две линии очистки, соединенные параллельно. Вторая линия (резервная) используется в том случае, когда эффективность первой линии недостаточна, или, когда первая линия выведена из эксплуатации для проведения ее технического обслуживания. В случае работы двух адсорберов параллельно, скорость очистки увеличивается, однако эффективность использования адсорберов снижается. Поэтому при работе с тритием рекомендуется использовать сначала одну линию, чтобы максимально насытить в адсорбере цеолит влагой с примесью НТО при более высокой ОА трития в потоке газа, а затем использовать вторую линию очистки с более «чистым» адсорбером, для того чтобы снизить ОА очищаемой газовой среды до требуемого уровня.

Основные технические характеристики и параметры установки приведены в таблице.

Состав установки очистки газовой среды от трития

Внешний вид установки очистки газовой среды от трития представлен на рис. 2. Установка включает в себя следующие основные составные части:

– два конвертера, заполненные гранулированным реагентом или катализатором;

– два адсорбера, заполненные гранулированным цеолитом (молекулярное сито);
 – основной теплообменник;
 – побудитель потока (воздуходувка);
 – выходной теплообменник;
 – автоматизированную систему контроля и управления (АСКУ).

Составные части установки и связывающие их коммуникации размещены на верхнем и нижнем уровнях каркасного металлического шкафа. На верхнем уровне шкафа установлены два конвертера, которые располагаются вертикально и симметрично относительно центра, а также теплообменники необходимые для охлаждения газовой среды после конвертера и побудителя потока. На нижнем уровне установлены по центру побудитель потока – воздуходувка, размещенная в герметичном кожухе, а по бокам два адсорбера.

Блок АСКУ установлен в отдельном металлическом корпусе (не показан на рис. 2): регистрирует и контролирует температуру нагревателей конвертеров, давление и влажность газовой среды вдоль линий очистки и состояние побудителя потока (воздуходувки). Настройка значений параметров АСКУ и дистанционное управление входящим в состав газоочистки оборудованием, как показано в работе [6], осуществляется оператором с помощью мнемосхемы на управляющем компьютере.

Технические характеристики и параметры установки очистки газовой среды от трития

Наименование характеристики и единица измерения	Значение
Газовая среда	Воздух, азот, аргон
Рабочий диапазон давлений газовой среды в коммуникациях (относительно внешней среды), Па (мбар)	от –100 до –5000 (от –1 до –50)
Уровень очистки (ОА) трития при установке новых адсорберов, Бк/м ³ , не более	5·10 ⁵
Масса катализатора в одном конвертере газоочистки, кг	не менее 12,5
Масса молекулярного сита (цеолита) в одном адсорбере газоочистки, кг	не менее 15
Количество конвертеров, шт.	2
Количество адсорберов, шт.	2
Диапазон рабочих температур конвертера, °С	250–400
Напряжение питания, В	220
Частота электрической сети, Гц	50
Суммарная мощность нагревателей 2-х конвертеров, кВт	10
Максимальная мощность воздуходувки, кВт	2,2
Максимальная скорость газового потока, м ³ /час	120
Габариты блока газоочистки (высота, ширина, глубина), мм	2155×1200×795
Масса блока газоочистки, кг	не более 1400

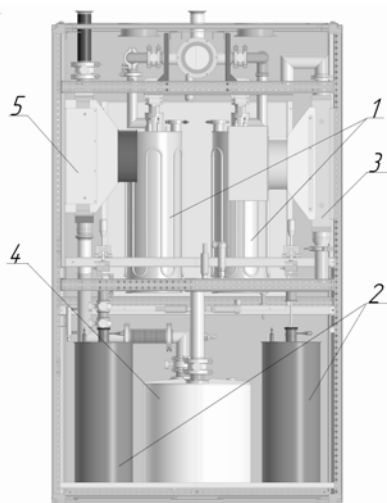


Рис. 2. Основные составные части установки очистки газовой среды от трития: 1 – конвертер; 2 – адсорбер; 3 – теплообменник; 4 – воздуходувка; 5 – выходной теплообменник

Устройства для измерения ОА трития газовой среды (радиометры трития на базе проточных ионизационных камер), не входящие в состав газоочистки, обычно подключаются на выходе установки через байпасные коммуникации. На основании измеренных показаний ОА трития в газовой среде, в совокупности с другими показаниями (влажность, давление, температура), интегрированная в исследовательский комплекс АСКУ посредством предупреждений, сообщений и блокировок может управлять (автоматически или через оператора) параметрами работы газоочистки.

Устройство и работа конвертера

Конвертер выполнен из нержавеющей стали и представляет собой герметичный цилиндрический корпус (рис. 3), заполненный гранулами реагента (например, CuO) или катализатора (например, палладиевый АПН (1 % -Pd) с размерами гранул от 3 до 5 мм).

Для создания равномерной по объему рабочей температуры в корпусе конвертера размещены два нагревателя типа ТЭН (мощностью по 2,5 кВт): внутренний нагреватель, имеющий вид спирали, и дополнительный внешний нагреватель, припаянный к наружной стенке корпуса конвертера. Для контроля и регулировки температуры разогрева в состав конвертера также входят две герметичные металлические трубки-капилляры с установленными в них термодатчиками (капиллярными термомпарами), одна из которых погружена в наполнитель (гранулы реагента/катализатора), а вторая установлена снаружи корпуса конвертера. В зависимости от типа наполнителя (реагент или катализатор) температура разогрева конвертера может изменяться от 250 до 280 °С (для реагента CuO) и от 350 до 400 °С (для палладиевого катализатора). Максимальная температура разогрева конвертера не может превышать 450 °С (срабатывает блокировка от АСКУ).

Вдоль оси конвертера коаксиально размещены его газовые коммуникации (выходные трубопроводы во входных), конструктивно выполненные таким образом, чтобы при наличии потоков газовой среды происходил эффективный теплообмен между стенками трубопроводов. Засыпка реагента/катализатора в виде гранул осуществляется через специальный фланец (типа ISO-KF DN25), размещенный сверху, который герметизируется заглушкой с алюминиевой прокладкой.

Все фланцы, штуцеры и разъемы, включая электрические контакты нагревателей типа ТЭН и термомпар, выведены на верхний фланец корпуса конвертера, где производится их соединение и стыковка. Остальные стенки и низ корпуса имеют теплоизоляцию. Герметизация соединений выходного патрубка, имеющего высокую температуру стенок за счет конвективного переноса тепла в потоке газа, также осуществляется с использованием медной или алюминиевой прокладки.

Газовая смесь, поступающая через входной штуцер конвертера, попадает в центральный трубопровод и сначала проходит вниз, через «лабиринт» огибающую систему выходных трубок, играющих роль теплообменника, а затем по внешнему цилиндрическому объему центрального трубопровода выходит в верхнюю внутреннюю часть конвертера. Далее поток газа поступает вниз через насыпку гранул реагента/катализатора, фильтруется и проходит сквозь перфорированную перегородку в полость на дне корпуса конвертера. Из донной полости поток фильтрованного газа распределяется по системе выходных трубок и поступает в выходной патрубок конвертера.

При недостаточно эффективной конвертации трития в пары воды, что может быть вызвано малой концентрацией кислорода в газовом потоке при использовании катализатора или восстановлением меди при использовании реагента CuO , на вход конвертера можно подать (например, от баллона) дополнительный поток газа с необходимой примесью кислорода через вентили В1 или В2 (рис. 1). В случае применения реагента в качестве наполнителя, такой способ на стадии технического обслуживания позволит также регенерировать медь до исходной оксидной формы CuO .

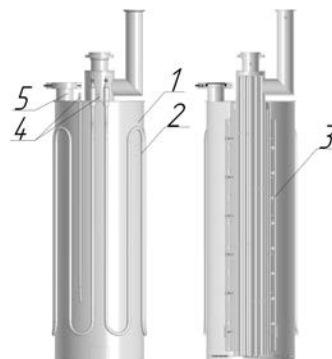


Рис. 3. Основные составные части конвертера: 1 – камера герметичная; 2 – внешний нагреватель типа ТЭН; 3 – внутренний спиральный нагреватель типа ТЭН; 4 – корпус термомпары; 5 – фланец для засыпки наполнителя

Устройство и работа адсорбера

Адсорбер выполнен из нержавеющей стали и представляет собой герметичный цилиндрический корпус (рис. 4), заполненный молекулярным ситом (используется цеолит типа NaX с размерами гранул до 5 мм). Входной трубопровод соединен на дне камеры со свободной полостью, которая отгорожена от молекулярного сита перфорированной перегородкой.

Адсорбер монтируется в составе газоочистки путем соединения входных и выходных патрубков с трубопроводами линии очистки и подвешивается за петлю на верхнем торце корпуса на рычаг с тензометрическим датчиком веса (ТДВ1 или ТДВ2). Датчик веса позволяет проводить периодические взвешивания устройства с целью определения количества адсорбированной влаги в молекулярном сите.

Газовая смесь, поступающая по входному трубопроводу, попадает в нижнюю полость камеры адсорбера, фильтруется через насыпку гранул цеолита (молекулярного сита) и поступает к выходному патрубку (вверх). В ходе фильтрации происходит поверхностная сорбция (адсорбция) паров воды, включая форму НТО, в пористых гранулах цеолита. Сорбционная емкость цеолита по влаге составляет, в зависимости от производителя и типа сорбента, от ~10 до ~20 % от исходной «сухой» массы молекулярного сита. Поэтому очевидно, что для эффективной очистки газовой среды от трития и тритий-содержащих примесей необходимо использовать предварительно осушенный цеолит (желательно на уровне не более 1 ppm по влажности).

Предварительная осушка молекулярного сита в устройстве адсорбера проводится отдельно на специализированных стендах и непосредственно перед монтажом адсорбера в установку газоочистки. В зависимости от условий эксплуатации и технической возможности для восстановления сорбционной емкости молекулярных сит используется несколько вариантов конструкций адсорберов, разработанных в РФЯЦ-ВНИИЭФ, которые отличаются вместимостью (объемом для наполнителя) и наличием внутреннего нагревателя. Так, например, для осушки цеолита в корпусе многоразового адсорбера, показанного на рис. 4, размещен нагреватель типа ТЭН, имеющий вид спирали. Контроль и регулирование мощности нагревателя в данном устройстве проводится по измерениям температуры на внешней стенке корпуса адсорбера.

Показанное на рис. 4 устройство адсорбера с максимальной массой цеолита до 15 кг может поглотить до 36 Ки адсорбированного трития при уровне ОА газовой среды $\sim 4,5 \cdot 10^5$ Бк/м³ и влажности ~1 ppm или до 800 Ки адсорбированного трития при уровне ОА газовой среды $\sim 4,5 \cdot 10^7$ Бк/м³ и влажности до ~10 ppm.

Адсорберы, полностью насыщенные тритированной влагой (НТО/ДТО) до допустимого контрольного уровня по объемной активности (ОА) трития в насыщенных парах, должны быть герметично

закрыты, отсоединены от коммуникаций газоочистки и переданы для восстановления (осушки) на специализированных стендах в организациях, имеющих лицензии на работы с тритированной водой (в жидкой фазе), или для захоронения в качестве твердых радиоактивных отходов.

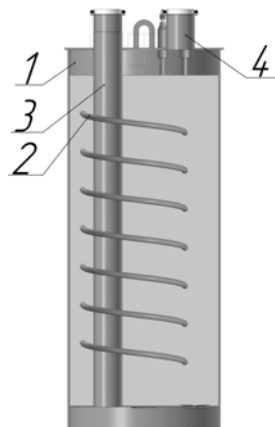


Рис. 4. Основные составные части многоразового адсорбера: 1 – камера герметичная; 2 – нагреватель типа ТЭН; 3 – входной трубопровод; 4 – выходной патрубок

Устройство побудителя потока

Побудитель потока (воздуходувка) установлен вертикально в герметичном кожухе (см. рис. 5), который предотвращает выход циркулирующего газа в окружающую среду и, одновременно, обеспечивает обдув корпуса воздуходувки при ее работе входным потоком газовой среды, которая поступает через входной фланец крышки кожуха. Выходной патрубок воздуходувки напрямую через трубопровод соединен с выходным фланцем крышки кожуха. Между входным и выходным фланцами кожуха воздуходувки установлен дифференциальный датчик давления, позволяющий по разности давления между входом и выходом определять скорость потока, побуждаемого воздуходувкой.

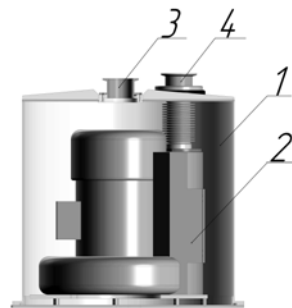


Рис. 5. Основные составные части побудителя потока (воздуходувки): 1 – кожух герметичный; 2 – воздуходувка; 3 – входной фланец; 4 – выходной фланец

Управление работой воздуходувки (скоростью потока) осуществляется путем изменения частоты

(от 10 до 50 Гц) частотного преобразователя в АСКУ через мнемосхему газоочистки на управляющем компьютере. При необходимости для фиксированных частот можно получить калибровочную кривую зависимости скорости потока от давления разрежения на дифференциальном датчике давления.

Запуск установки газоочистки, после открытия всех необходимых вентилей на линии очистки, начинается с включения воздуходувки на малой начальной мощности (~20 % при 10 Гц на частотном преобразователе) и постепенного увеличения производительности до необходимого уровня, который определяется допустимым давлением разрежения во входных коммуникациях установки (например, при подключении перчаточного бокса к газоочистке давление разрежения в боксе, обычно, не должно превышать 1,5 кПа).

Имеющий место обдув корпуса воздуходувки внутри герметичного корпуса приводит к тому, что выходной поток имеет повышенную температуру газа, поэтому после выходной коммуникации из побудителя потока устанавливается дополнительный теплообменник, охлаждающий поток газовой среды до приемлемого уровня.

Устройство теплообменника

В состав установки очистки газовой среды от трития, показанной на рис. 1, входят два теплообменника: основной теплообменник охлаждает поток газовой среды непосредственно после конвертеров, а дополнительный выходной теплообменник снижает температуру газа на выходе побудителя потока. В зависимости от требований условий эксплуатации установки газоочистки в помещениях на радиационно-опасных участках существуют ограничения по использованию водяных систем охлаждения, более эффективных в отношении теплообмена. Поэтому авторами настоящей работы были разработаны варианты систем охлаждения газового потока с теплообменниками как газо-водяного типа, так и газо-воздушного типа.

Использование газо-водяного теплообменника, несмотря на эффективный теплообмен, требует дополнительного подвода к установке газоочистки контуров водоснабжения, а, при необходимости, и замкнутых водяных контуров, как показано в работе [2], с отдельными подсистемами регулирования потоков воды, водяными насосами и теплообменниками. Использование газо-воздушного теплообменника приводит к упрощению конструкции системы охлаждения, но накладывает дополнительное требование к помещению, где размещается установка газоочистки, которое заключается в необходимости наличия системы вентиляции, интенсивность которой достаточна для вывода выделяющегося от установки тепла.

Для примера рассмотрим газо-воздушный теплообменник, устанавливаемый на выходе воздуходувки, принцип работы которого заключается в сле-

дующем: газовая среда, поступающая через входной фланец теплообменника, проходит по внутренним каналам корпуса, который снаружи обдувается потоком воздуха, создаваемого вентилятором, закрепленным на кожухе. Таким образом происходит теплообмен между воздухом и газовой средой и рассеивание тепла. Основные составные части теплообменника представлены на рис. 6.

Для регулирования интенсивности обдува вентилятором через АСКУ, при необходимости, на выходе теплообменника внутри коммуникации устанавливается температурный датчик, показывающий температуру потока газовой среды.

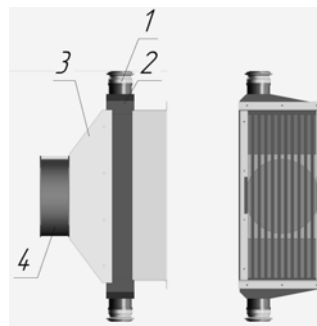


Рис. 6. Основные составные части теплообменника: 1 – входной фланец; 2 – корпус; 3 – кожух; 4 – вентилятор

Автоматизированная система контроля и управления

Автоматизированная система контроля и управления (АСКУ) предназначена для регистрации состояния и управления функциональными элементами газоочистки в ручном (по командам оператора) и автоматическом режиме.

АСКУ газоочистки [6] представляет собой распределенную сеть, состоящую из управляющего компьютера, находящегося на удаленном расстоянии от установки, набора модулей: аналогового и цифрового ввода/вывода серии I-7000, а также устройств измерения физических параметров установки.

В качестве основного программного средства для создания АСКУ установки используется официально зарегистрированный пакет CRW-DAQ [7], разработанный и применяемый в РФЯЦ-ВНИИЭФ. Пакет обеспечивает работу с модулями аналогового и цифрового ввода/вывода серии I-7000, позволяет обрабатывать и отображать измеряемые данные в текстовой и графической форме в режиме реального времени, а также строить и использовать пользовательский интерфейс для управления программой в удобной для оператора форме в виде мнемосхем.

Программное обеспечение (ПО) АСКУ обеспечивает:

– непрерывный дистанционный мониторинг основных физических параметров установки (давления, температуры, влажности, состояния нагревателей и т. д.);

– отображение результатов измерений на экране монитора управляющего компьютера в виде мнемосхемы и графиков;

– управление узлами (нагреватели, воздухоудка и т. п.) газоочистки по командам оператора;

– оповещение персонала об изменениях, происходящих в работе газоочистки (например, срабатывание блокировок), путем подачи звуковых сигналов и речевых сообщений;

– непрерывное сохранение данных измерений в файлах на жестком диске управляющего компьютера.

Для отображения состояний основных параметров газоочистки используется графический интерфейс, основанный на активной графической мнемосхеме и окнах настройки. [6]. Графический интерфейс обеспечивает пользователю удобство управления газоочисткой. Измеряемые величины (температуры, давления и др.), а также состояния контролируемых элементов, отображаются на мнемосхеме. Управление элементами газоочистки производится нажатием курсора на активные области (сенсоры) мнемосхемы.

Результаты испытаний

Работоспособность, описанной выше установки очистки газовой среды от трития была подтверждена в ходе специальных испытаний. Испытания проводились в процессе очистки смеси азота с тритием, накопленного в ресивере вместимостью 1 м³, которые показали уменьшение ОА газовой среды с 5·10⁸ Бк/м³ до 1·10⁶ Бк/м³ за один час работы. Последующая продолжительная работа газоочистки в течение 2-х часов снижает ОА рабочей газовой смеси до уровня менее 4·10⁵ Бк/м³.

На рис. 7 приведен один из результатов измерений ОА потока газа одновременно двумя различными приборами: УДГБ (отечественный радиометр), TUNE (канадский радиометр). Из рис.7 видно, как уменьшается объемная активность газовой среды в течение одного часа.

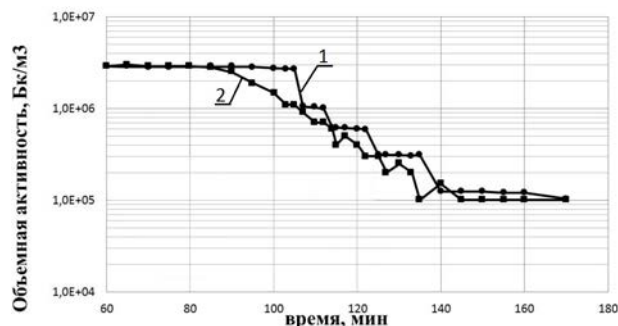


Рис. 7. Объемная активность, измеренная радиометрами: 1 – УДГБ, 2 – TUNE

Разработанная в РФЯЦ-ВНИИЭФ установка газоочистки предназначена для эффективной очистки от трития и тритий - содержащих примесей газовой среды перчаточных боксов, ресиверов и газовых коммуникаций различных экспериментальных установок и их инфраструктуры. Технические характеристики газоочистки позволяют при организации замкнутого контура коммуникаций осуществлять интенсивную циклическую очистку рабочей газовой среды от влаги (до 10 ppm) и трития (снижение объемной активности до уровня менее 5·10⁵ Бк/м³) при высоких потоках путем конвертации трития до водной формы НТО на гранулах реагента/катализатора и последующей адсорбции влаги на молекулярном сито на основе цеолита.

Созданная для экспериментального комплекса установка очистки газовой среды от трития показала свою работоспособность, при этом технические характеристики установки, полученные после испытаний, показали соответствие установленным требованиям.

Список литературы

1. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности. ОСПОРБ 99/2010.
2. Мусяев Р. К. и др. Тритиевая инфраструктура для установки лазерного термоядерного синтеза. // Сборник докладов 7-й международной конференции и 14-й международной школы молодых ученых и специалистов имени А. А. Курдюмова IHISM'21 Junior. Гатчина, 2021. С.207.
3. Беловодский Л. Ф., Гаевой В. К., Гришмановский В. И. Тритий. М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. Юхимчук А. А. и др. Комплекс газового обеспечения экспериментов по мюонному катализу ядерных реакций синтеза // ПТЭ. 1999. № 6. С. 17–23.
5. Виноградов Ю. И. и др. Автоматизированная система контроля и управления комплексом подготовки газовой смеси для экспериментального исследования мюонного катализа ядерных реакций синтеза // ПТЭ. 2004. № 3. С. 29–41.
6. Гурин Н. Е., Тумкин А. Д., Вихлянцев О. П., Фильчагин С. В., Курякин А. В., Мусяев Р. К., Буряк Е. В. Автоматизация установки очистки газовой среды перчаточных боксов и газовых коммуникаций от тритийсодержащих примесей // Сборник докладов 13-й международной школы молодых ученых и специалистов имени А. А. Курдюмова IHISM'19 Junior. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2019. С. 213.
7. Курякин А. В., Виноградов Ю. И. Программное обеспечение автоматизированных измерительных систем в области тритиевых технологий // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2008. Вып. 2. С. 80–90.