

## ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТ С ТРИТИЕМ В ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. ДУХОВА»

*А. С. Хапов, В. Г. Киселёв*

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики  
им. Н. Л. Духова», г. Москва  
vniia4@vniia.ru

*Описан комплекс технологического, инженерно-защитного оборудования и системы радиационного контроля, обеспечивающего безопасность при производстве содержащих тритий нейтронных трубок в ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова» в условиях расположения промышленной площадки в селитебной зоне Москвы.*

### Введение

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова» является разработчиком и производителем генераторов нейтронов различного назначения и используемых в этих генераторах нейтронных трубок. Для генерирования нейтронов в подавляющем большинстве производимых во ВНИИА нейтронных трубках используется ядерная реакция [1]:



Таким образом, при производстве большинства типов нейтронных трубок во ВНИИА используется тритий. Ниже рассмотрены особенности работ с тритием при изготовлении нейтронных трубок. Эти особенности не характерны для других предприятий, осуществляющих обращение и переработку трития, однако они обязательны для обеспечения безопасности персонала, населения и окружающей среды при производстве нейтронных трубок.

ФГУП ВНИИА находится в Москве и расположен в селитебной зоне с плотной застройкой жилых домов, детских дошкольных и образовательных учреждений, прилегающих к периметру предприятия. Санитарно-защитная зона совпадает с периметром территории ВНИИА. Такое расположение промышленной площадки накладывает очень жесткие требования к обеспечению радиационной безопасности при проведении работ с тритием, в частности разрешенный Москомприроды годовой выброс равен 65 ГБк. Эти обстоятельства вынудили ВНИИА создать единый комплекс, в который интегрировано технологическое и инженерно-защитное оборудования, а также система радиационного контроля. Этот комплекс функционирует как единое целое и управляется системой радиационного контроля.

## Некоторые особенности организации технологического процесса изготовления нейтронных трубок

При изготовлении нейтронных трубок технологические операции, при выполнении которых происходит обращение трития, можно условно разделить на две группы. Во-первых, операции, на которых тритий присутствует в связанном состоянии. И, во-вторых, операции, при выполнении которых часть трития переходит из связанного в газообразное состояние либо полностью, либо частично. К этой же группе следует отнести единственную при производстве нейтронных трубок операцию, при выполнении которой тритий переводится из связанного состояния в газообразное, а затем – осаждается на деталях нейтронных трубок.

Традиционно работа с газообразным тритием и его соединениями проводится в вытяжных шкафах, боксах и камерах с смонтированными резиновыми перчатками [2]. Однако ряд финишных технологических операций с деталями, содержащими тритий в связанном состоянии, не мог быть выполнен в указанных условиях. Дело в том, что нейтронная трубка является электровакуумным прибором, и для ее изготовления необходимо создать условия, удовлетворяющие требованиям электровакуумной гигиены. До недавнего времени создать такие условия в перчаточных боксах (не говоря уже о вытяжных шкафах) не представлялось возможным. Сборка нейтронных трубок осуществляется в так называемых «чистых» комнатах (clean rooms) с очень малой концентрацией частиц пыли в воздухе (до 5 частиц на  $\text{дм}^3$ ) и очень маленькими размерами самих частиц (диаметром несколько мкм). Очистка воздуха достигается за счет многократного повторного прохождения воздушной массы через фильтры (рециркуляции), при этом воздух движется в направлении от потолка к полу. Такое движение обеспечивает наименьшее отделение частиц пыли с поверхности пола и стен, хотя и противоречит общепринятым канонам организации безопасных условий труда, требующим создание движения воздуха в направлении от оператора, работающего с вредным веществом, а не наоборот. Кроме того, рециркуляция воздуха без очистки от трития не разрешается санитарными правилами [3, 4]. Тем не менее, высокое качество нейтронной трубки может быть получено только в чистых помещениях и только при выше оговоренном направлении движения воздуха. Такой подход оправдывается тем, что поступление трития в организм персонала на этих операциях очень мал, и доза внутреннего облучения находится на нижней границе уровня регистрации. Это объясняется тем, что выделение трития из содержащих тритий деталей (в качестве сорбента трития в нейтронных трубках используется титан) не превышает 26 Бк/с на 1 Ки (37 ГБк) трития в связанном состоянии [5]. Технологический процесс предполагает работу с содержащими тритий деталями вне ограничивающих выброс трития объемов в течение не более двух часов. Так что годовой выброс трития чрезвычайно мал (меньше МЗА для трития, который равен 1 ГБк [6]).

Второй особенностью работ с тритием при производстве нейтронных трубок является сравнительно малое перерабатываемое его количество. Это обстоятельство осложняет его учет и контроль, как специальный неядерный материал.

Малые выбросы трития предопределяют сложности, как в его регистрации, так и в создании очистных устройств, поскольку эффективность каталитической очистки газов при низком содержании водорода практически не поддается теоретической оценке, а коэффициент очистки увеличивается с ростом концентрации трития в очищаемой газовой смеси [5].

### **Оценка выбросов трития при изготовлении нейтронных трубок во ВНИИА**

Технологические операции с переходом трития в газообразное состояние проводятся в герметичных объемах электрофизических установок, в которых создается по требованиям технологического процесса глубокий вакуум. Во время проведения операции тритий выделяется в герметичный объем рабочей камеры технологической установки и откачивается средствами создания вакуума (вакуумными насосами) установок. Часть работ с деталями, которые содержат тритий в связанном состоянии, в настоящее время проводится без защитного оборудования. Часть же таких операций, где технологическое оборудование допускает размещение в перчаточных боксах, проводится в перчаточных боксах с осушенной инертной газовой средой.

Наиболее опасной с точки зрения возможности реализации значительного по величине выброса трития в воздух рабочего помещения является операция отбора потребного количества трития из урановой ловушки и перепуск этого количества в рабочий объем установки осаждения трития на детали нейтронной трубки. После отбора требуемого количества из урановой ловушки тритий осаждается на находящиеся в рабочей камере установки заготовки деталей нейтронной трубки. Операция отбора трития из урановой ловушки и последующее его осаждение на детали является единственной при производстве нейтронных трубок операцией, при которой тритий специально переводится в газообразное состояние. К этой же группе операций следует отнести и те, при выполнении которых тритий переходит из связанного в деталях состояния (или при определенных условиях может перейти) в газообразное состояние, как правило, частично. Это операция заварки нейтронной трубки и операция ее вакуумно-термической обработки. На первой из перечисленных операций осуществляется сварка элементов конструкции нейтронной трубки с корпусом электронным лучом. При несоблюдении требований технологического процесса возможен разогрев содержащих тритий деталей и выброс его в объем рабочей камеры установки электронно-лучевой сварки. Величина выброса будет зависеть от степени и продолжительности разогрева деталей. При соблюдении технологического процесса выброс трития практически отсутствует. На второй из выше поименованных операций нейтронные трубки в течение нескольких часов находятся при повышенной температуре – отжиге. Этот отжиг происходит при постоянной откачке внутреннего объема нейтронных трубок. Из-за нагрева содержащих тритий деталей на этой операции происходит частичная (запланированная) потеря трития, который удаляется средствами создания вакуума из объемов нейтронных трубок и установки.

Выброс трития при работах по осаждению можно оценить следующим образом. После завершения осаждения трития на детали нейтронной трубки остаточный тритий из внутренних объемов установки осаждается на специальную урановую ловушку, входящую в состав установки для осаждения трития. Остальной же тритий, который не был поглощен ураном, эвакуируется средствами создания вакуума установки и определяет выброс ( $A_1$ )

$$A_1 = V(\text{OAT})_U d, \quad (2)$$

где  $V = 500 \text{ см}^3$  – внутренние объемы установки осаждения трития;  $(\text{OAT})_U = 0,13 \text{ МБк/см}^3$  – равновесное давление трития над тритидом урана при комнатной температуре [5];  $d$  – количество операций в году. Из (2) видно, что  $A_1 \sim 16 \text{ ГБк/год}$ . Кроме выброса  $A_1$ , который удаляется из установки осаждения средствами создания вакуума, после вскрытия рабочей камеры установки при извлечении готовых деталей произойдет выброс ( $A_2$ ) в окружающий установку воздух за счет десорбции трития с внутренних поверхностей рабочей камеры. Практика работы во ВНИИА показала, что величина выброса  $A_2$  изменяется в пределах от 10 до 100 МБк за вскрытие.

При соблюдении требований технологии выброс трития на операции заварки нейтронной трубки определяется равновесным давлением трития над содержащей тритий деталью ( $A_3$ ) и скоростью его выделения из детали при комнатной температуре ( $A_4$ ). Из [7] известно, что равновесное давление водорода над гидридом титана при комнатной температуре находится в диапазоне  $(1,3 \cdot 10^{-9} \dots 1,3 \cdot 10^{-10}) \text{ Па}$ , что соответствует объемной активности трития  $(130 \dots 1300) \text{ Бк/м}^3$ . Выброс трития ( $A_3$ ) можно оценить по формуле

$$A_3 = V_{\text{УЭЛС}}(\text{OAT})_{\text{Тi}} n d, \quad (3)$$

где  $V_{\text{УЭЛС}} = 0,25 \text{ м}^3$  – объем рабочей камеры установки электронно-лучевой сварки;  $(\text{OAT})_{\text{Тi}} = 1300 \text{ Бк/м}^3$  – равновесное давление трития над тритидом титана при комнатной температуре;  $n$  – количество заварок нейтронных трубок в день;  $d$  количество рабочих дней в году. Указанный выброс очень мал и его порядок составляет  $\sim 0,8 \text{ МБк/год}$ .

Выброс трития в процессе откачки рабочей камеры установки электронно-лучевой сварки ( $A_4$ ) можно оценить по формуле

$$A_4 = q A_{\Sigma} t, \quad (4)$$

где  $q = 26 \text{ Бк/с}$  – скорость выделения трития из тритида титана на 37 ГБк (1 Ки) содержащегося в нем трития [5];  $A_{\Sigma}$  – суммарная активность трития в камере установки;  $t = 1,5 \text{ ч}$  – время обработки нейтронной трубки в установке электронно-лучевой сварки.  $A_4 \sim 0,21 \text{ ГБк/год}$ .

Величина выброса трития ( $A_5$ ) при вакуумно-термической обработке нейтронных трубок (в зависимости от типа нейтронной трубки) может рав-

няться (5...10) % от исходного количества трития. По оценкам ВНИИА  $A_5 \sim 5,6$  ТБк/год.

Таким образом, выбросы трития ( $A_\phi$ ) с форвакуумными выхлопами из технологических установок равны

$$A_\phi = A_1 + A_3 + A_4 + A_5. \quad (5)$$

Подставляя выше оцененные числовые значения, получаем, что  $A_\phi \sim 5,6$  ТБк/год.

Годовой выброс ( $A_{\text{Вск}}$ ) при вскрытии рабочей камеры установки осаждения равен

$$A_{\text{Вск}} = A_2 d \sim 2,5 \text{ Гбк/год}. \quad (6)$$

Отметим, что технически выбросы  $A_\phi$  и  $A_{\text{Вск}}$  (по крайней мере, их часть) можно собрать и подвергнуть очистке известными способами, что и реализовано во ВНИИА.

## Организация очистки выбросов трития во ВНИИА

В настоящее время во ВНИИА подвергаются очистке все форвакуумные выбросы из вакуумных установок, в которых происходит осаждение трития на детали нейтронных трубок, а также обработка содержащих тритий деталей с их нагревом (или возможным нагревом при нарушении технологического процесса). Кроме того, в целях обеспечения безопасности персонала установка осаждения трития на детали нейтронных трубок размещена в герметичном перчаточном боксе с осушенной инертной газовой средой. Для поддержания внутри бокса требуемой влажности и требуемой остаточной концентрации кислорода газовая среда находится в состоянии постоянной рециркуляции через блок осушки и очистки от кислорода. Это позволяет очищать газовую среду перчаточного бокса также и от трития, который выделяется при нагреве урановых ловушек и проведении процесса его осаждения на детали нейтронных трубок вследствие диффузии через конструкционные материалы, а также после вскрытия рабочей камеры установки осаждения для выгрузки готовой продукции или для загрузки заготовок.

Во ВНИИА для очистки выбросов применен способ каталитического окисления трития с последующим поглощением его оксида при помощи молекулярных сит (цеолитов). Установка очистки форвакуумных выбросов (УОГ-1), схема которой приведена на рис. 1, построена по традиционной схеме [5] и имеет два идентичных контура – грубой и тонкой очистки. Накопление загрязненной тритием газовой смеси происходит в ресивере первого контура, который является приемником для всех форвакуумных выхлопов участка производства нейтронных трубок. После снижения концентрации трития до  $0,1 \text{ Гбк/м}^3$  газовая смесь перекачивается в ресивер второго контура и очи-

щается до объемной активности (концентрации)  $0,44 \text{ МБк/м}^3$ . Такая газовая смесь выбрасывается в окружающую среду.

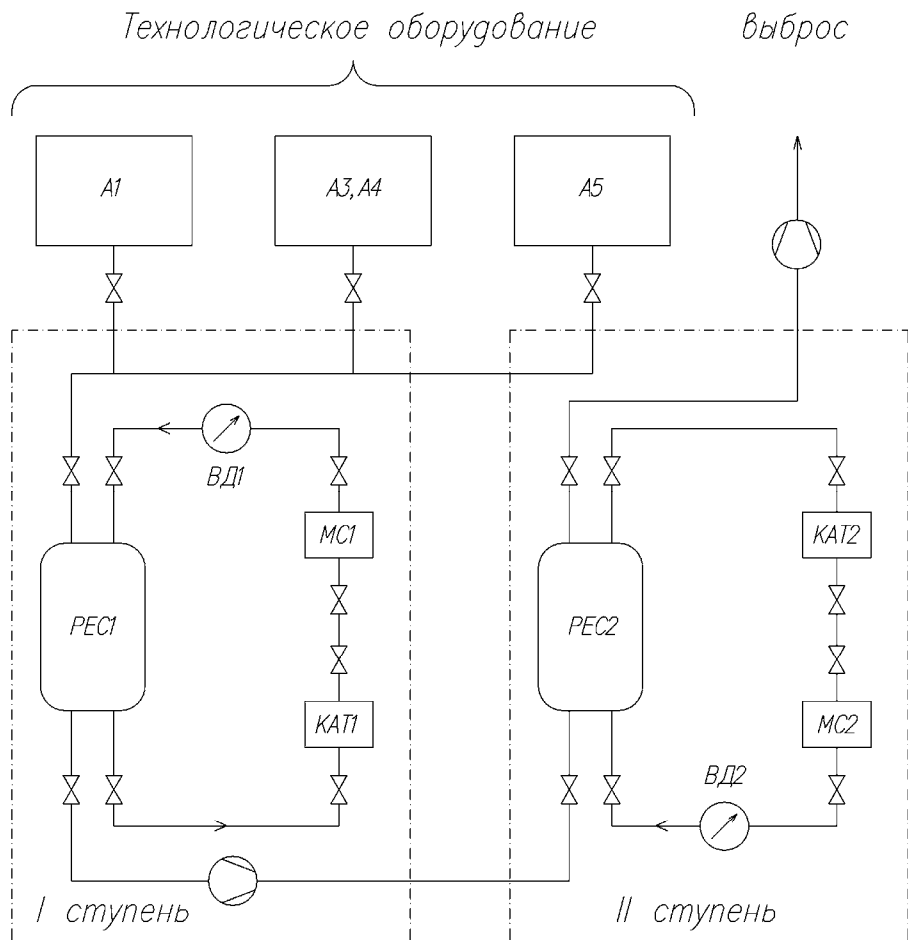


Рис. 1. Схема установки очистки форвакуумных выбросов (УОГ-1):  
 PEC1, PEC2 – ресиверы; KAT1, KAT2 – катализаторы;  
 MC1, MC2 – молекулярные сита; ВД1, ВД2 – воздуходувки

Очистка выбросов трития из установки осаждения проводится по более сложной схеме, представленной на рис. 2. Как отмечалось ранее, сама установка размещена внутри перчаточного бокса. Форвакуумный выброс из нее направляется в приемный ресивер установки очистки УОГ-1. Газовая среда внутри бокса подвергается очистке установкой УОГ-2, которая похожа на УОГ-1, но имеет свои особенности. Например, она имеет большее число молекулярных сит, имеет ресивер, предназначенный для сбора потенциально загрязненного газа в процессе регулирования давления внутри перчаточного бокса, и некоторые другие особенности. Отметим, что в процессе работы внутри перчаточного бокса периодически создается повышенное давление рабочей среды (азота), например, в моменты, когда оператор вкладывает руки в перчатки бокса

или когда осуществляется нагрев урановой ловушки или рабочей камеры. Этот потенциально загрязненный тритием избыточный азот системой регулирования давления бокса перепускается в ресивер установки очистки УОГ-2 (на рис. 2 не показан), а оттуда – в ресивер РЕС1 установки УОГ-1 (рис. 1). Таким образом, при насыщении деталей тритием среда перчаточного бокса очищается установкой очистки УОГ-2 в рециркуляционном режиме без выброса в вентиляционную систему. Форвакуумный выброс из установки насыщения, а также периодически накапливаемый в ресивере УОГ-2 азот в результате регулирования давления в перчаточном боксе направляются в установку очистки УОГ-1, где проходят очистку с форвакуумными выбросами других установок. Непосредственный выброс из установки очистки в вентиляционную систему отсутствует.

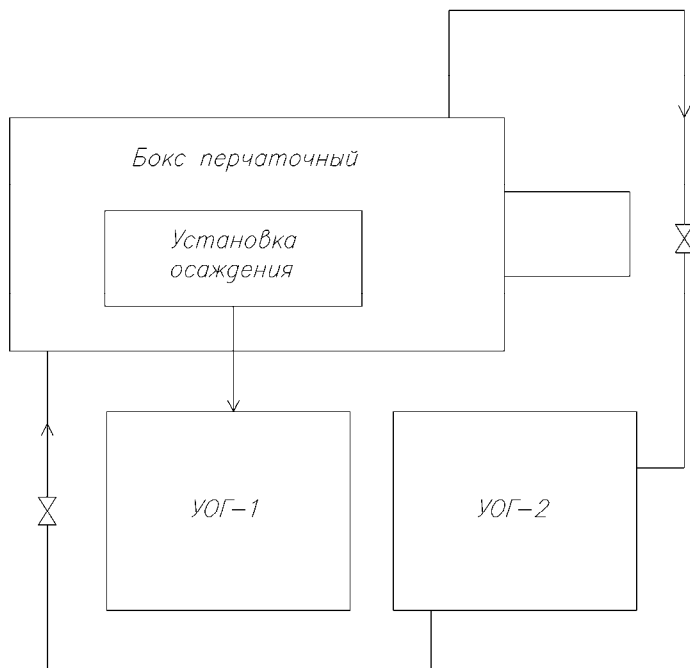


Рис. 2. Схема очистки выбросов трития из установки осаждения

## Радиационный и дозиметрический контроль

Радиационный и дозиметрический контроль традиционно [8] подразделен на две основные части: во-первых, контроль за радиационной обстановкой в помещениях и на территории предприятия и, во-вторых, индивидуальный дозиметрический контроль за внешним и внутренним облучением персонала.

Во всех помещениях, в которых ведутся работы с тритием, установлены радиометры трития, которые непрерывно измеряют объемную активность трития в воздухе этих помещений. Также непрерывно производится отбор проб и измеряется объемная активность воздуха во всех воздуховодах вентиляционных систем, обслуживающих участок по производству нейтронных трубок. По плану службы радиационного контроля проводится контроль загрязнения поверхностей помещений и оборудования методом влажных мазков, которые в дальнейшем анализируются на жидкосцинтилляционном анализаторе  $\alpha$ ,  $\beta$ -излучений. Также по плану службы радиационного контроля проводится контроль поступления трития в организм лиц из числа персонала взятием путем отбора конденсата воды из выдыхаемого воздуха и анализа его на жидкосцинтилляционном анализаторе  $\alpha$ ,  $\beta$ -излучений. Контроль накопления трития в объектах внешней среды проводится по плану, согласованному с органами, осуществляющими государственный санитарно-эпидемиологический надзор. С ними согласованы точки отбора проб внешней среды и периодичность их отбора. После приготовления счетных проб они анализируются на жидкосцинтилляционном анализаторе  $\alpha$ ,  $\beta$ -излучений.

За три года производства нейтронных трубок во ВНИИА содержание трития в объектах внешней среды не превысило исходные фоновые значения. Уровни облучения персонала не превышают нижней границы уровня регистрации.

### **Взаимодействие системы радиационного контроля, технологического и инженерно-защитного оборудования**

Ранее отмечалось, что технологическое, инженерно-защитное оборудование и система радиационного контроля функционируют как единый комплекс, который управляется исходя из приоритетов обеспечения безопасных условий труда и безопасности населения и окружающей среды.

Инженерно-защитное оборудование включает в себя установки очистки газов от трития (УОГ-1 и УОГ-2) и линию перчаточных боксов с контролируемой инертной газовой средой и контролируемым содержанием трития внутри боксов. Следует подчеркнуть, что все инженерно-защитное оборудование может работать как в полуавтоматическом, так и в автоматическом режимах. При этом логика работы инженерно-защитного оборудования такова, что в случае его неисправности, включение связанного с ним технологического оборудования невозможно до устранения неисправности. Также невозможно открытие шлюзов перчаточных боксов, если уровень объемной активности трития в них выше установленного порогового значения. Если в приемном ресивере УОГ-1 недостаточно места для приема газа из технологического оборудования, установка очистки подаст команду, запрещающую включение технологического оборудования.



Аналогичным образом происходит блокировка включения оборудования при неисправной системе радиационного контроля или при обнаружении в системе рециркуляции воздуха в чистых помещениях объемной активности трития выше порогового значения.

### Выводы

В ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова» освоено производство нейтронных трубок для генераторов нейтронов с энергией 14,1 МэВ, использующих ядерную реакцию  ${}^3\text{i}(d, n){}^4\text{He}$ . Для создания безопасных условий труда и обеспечения безопасности населения и окружающей среды во ВНИИА построен комплекс инженерно-защитного и технологического оборудования, который управляется системой радиационного контроля. Накопление трития в объектах внешней среды (в пробах почвы, дождевой воды, талого снега и объектах растительного мира – траве, листьях растений) за три года производства нейтронных трубок не превысило первоначально измеренных фоновых значений, благодаря правильным техническим решениям системы радиационной безопасности. Годовые выбросы трития через вентиляционные системы не превысили установленного разрешенного значения. Внедрение указанного комплекса позволило не только обеспечить безопасное ведение работ, но в отдельных случаях повысить качество продукции за счет использования перчаточных боксов с контролируемой по составу газовой средой внутри них.

### Список литературы

1. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. акад. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. С. 1008.
2. Гусев Г. Г., Капустин Ю. М. Тритий в органической химии. М.: Атомиздат, 1966.
3. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99): 2.6.1. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность СП 2.6.1. 799-99. М.: Минздрав России, 2000. С. 98. (Гос. сан. эпид. нормирование Рос. Фед. Гос. сан. эпид. правила и нормативы).
4. Радиационная безопасность при работе с тритием и его соединениями (СП РБ – РТС – 04). Санитарные правила СП 2.6.1.05 – 04.
5. Беловодский Л. Ф., Гаевой В. К., Гришмановский В. И. Тритий. М.: Энергоатомиздат, 1985. С. 248.
6. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. С. 100.
7. Ижванов Л. А., Фадеев В. Н. Известия АН СССР. Металлы. 1986, № 1. С. 66.
8. Дозиметрический и радиометрический контроль при работе с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений: (Методическое руководство). В 2-х томах / Под общей ред. В. И. Гришмановского. Т. 1. Организация и методы контроля. М.: Энергоиздат, 1980. С. 272.