

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОБРАЩЕНИИ С БЕРИЛЛИЕМ И ЕГО ОТХОДАМИ НА ПЛОЩАДКЕ ТЕРМОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ**

*Б.Н. Колбасов, Д.К. Курбатов*

В работе представлены действующие в РФ принципы и нормативно-технические документы, предназначенные для обеспечения безопасности при обращении с бериллиевыми изделиями и отходами. Приводится информация относительно химических и физических свойств бериллия и его соединений. Кратко рассматриваются потенциальные опасности, связанные с использованием бериллия в термоядерной установке, особенно его взаимодействие с водой/паром и воздухом. Приводятся пределы безопасной концентрации бериллия и уровней загрязнений. Описываются рекомендации и требования для снижения бериллиевой опасности.

SAFETY ENSURING AT BERYLLIUM AND ITS WASTE HANDLING ON FUSION FACILITY SITE. B.N. KOLBASOV, D.K. KURBATOV. The paper presents principles and standard-technical documents aiming at the safety ensuring when handling beryllium and its waste on a fusion facility site that are currently in force in Russia. The information on chemical and physical properties of beryllium and its compounds is given. Potential hazardous effects concerned with the beryllium use in a fusion reactor, especially its interaction with water, steam and air considered concisely. The limits for safe beryllium concentration and its contamination levels are cited. The recommendations and requirements for beryllium danger mitigation are outlined.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Статья подготовлена на основе работ, проведенных для обеспечения безопасности реактора ИТЭР. Представлены результаты исследований, выполненных российской национальной бригадой в ходе технического проектирования реактора ИТЭР по теме «Обеспечение безопасности при обращении с бериллием, его соединениями и отходами на площадке ИТЭР». Материалы исследований могут рассматриваться как первый шаг в подготовке ГОСТа «Правила безопасности труда и производственной санитарии при обращении с бериллием и его соединениями на площадке термоядерной установки». При его разработке могут быть использованы нормативные документы [1, 2], которые, в свою очередь, готовились с привлечением 63 более частных нормативно-технических документов. ГОСТ должен установить нормы, правила и требования в целях обеспечения безопасности сооружения и эксплуатации термоядерных установок (ТЯУ), использующих бериллиевые компоненты, для жизни, здоровья и имущества персонала реактора, населения, живущего вблизи площадки ТЯУ, и экологической безопасности окружающей среды; качества продукции, работ и услуг в соответствии с уровнем развития науки, техники и технологии; единства измерений; безопасности хозяйственных объектов с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф и других чрезвычайных ситуаций.

Бериллий обладает рядом физических характеристик, делающих его привлекательным в качестве материала, защищающего первую стенку, и размножителя нейтронов в термоядерном реакторе: высокой температурой плавления, хорошей теп-

лопроводностью, низким атомным номером, низким удержанием водорода при высоких температурах (увеличение десорбции при повышении температуры).

Рассмотрены пути образования нерадиоактивных и радиоактивных отходов бериллия и методы обращения с ними. Более детальная информация по этому вопросу приводится в работе [3].

Бериллий является токсичным материалом. Его отходы, образующиеся на начальных этапах эксплуатации реактора (на стадии физических исследований с протием и дейтерием), будут представлять только токсическую опасность. В ходе эксплуатации термоядерного реактора с применением дейтерий-тритиевого топлива в бериллии будет накапливаться тритий за счет его соосаждения из плазмы и в меньшей степени за счет нейтронных реакций. Кроме того, в основном за счет примесей бериллий будет активироваться. При работе реактора и сразу после его остановки основная активность бериллия является  $\beta$ -активностью, которая определяется изотопами  $^{16}\text{N}$  и  $^6\text{He}$ , образующимися при взаимодействии нейтронов с кислородом, и  $^6\text{Be}$ . В дальнейшем ситуация по  $\gamma$ -дозе полностью определяется примесями. Бериллиевые пыль и аэрозоли опасны для здоровья человека, особенно при комбинированном воздействии вредных факторов.

Согласно техническому проекту ИТЭР первая стенка вместе с лимитером площадью  $680\text{ м}^2$  будет покрыта бериллием [4] с толщиной слоя 10 мм [5], т.е. объем бериллиевого покрытия  $6,8\text{ м}^3$ , а масса – около 13 т. Для защиты первой стенки (в реакторе ИТЭР) бериллий припаивается к медно-стальной конструкции. Вклад его в удельные радиоактивность и контактную дозу на два порядка величины меньше, чем у стали. В периоды времени, сопоставимые с временем работы реактора (~10–20 лет), остаточная радиационная доза бериллия довольно велика. Промышленный бериллий лишь после 50-летней выдержки допускает дистанционное обслуживание на рекомендуемом уровне контактной дозы в  $10\text{ мЗв/ч}$ . В то же время благодаря примесям «ручное» обслуживание с допустимым пределом в  $10\text{ мкЗв/ч}$  в обозримые периоды времени не представляется возможным.

С точки зрения активации российский бериллий ДШГ-200 и американский S-65 отличаются незначительно. Однако даже небольшие отличия в составе примесей могут оказать существенное влияние на возможность захоронения бериллиевых отходов вблизи земной поверхности. Они должны быть детритизированы перед размещением во временных хранилищах или перед захоронением. Есть два основных метода детритизации бериллия — термический (прокаливание в вакуумных печах) и химический (осуществляемый по гидрометаллургическим, т.е. радиохимическим технологиям). Оба подхода требуют экспериментального исследования. После детритизации радиоактивные элементы из бериллия в принципе могут быть захоронены на небольшой глубине как низкоактивные [6]. Однако чтобы избежать проблем на этом пути, необходимо выбрать соответствующий сорт бериллия, принимая во внимание требования к содержанию радиоактивных примесей в захораниваемых отходах. Существует большая неопределенность в оценке количества образующейся пыли и ее характеристик. Количество образующейся бериллиевой пыли на 9—10-м году экспериментов (3000 импульсов по 400 с каждый и 300 срывов плазмы в год [7]) оценивается следующим образом. С учетом того, что согласно техническому проекту нижнюю горловину дивертора ИТЭР предполагается из-

готовить из W, а не из Be [7], количество распыленного бериллия при нормальной работе составит около 27 кг/год. Ожидается, что до 95% эродировавшего материала будет переосаждено и только около 5% останется в виде пыли (агломератов атомов различного размера) [8], т.е. ожидается, что ежегодно при нормальной работе будет образовываться не более 1,4 кг Be-пыли [8, 9] или ~6 кг за первые 10 лет работы реактора (11 750 эквивалентных импульсов по 400 с при термоядерной мощности 500 МВт [4]).

Предполагается, что при 30% срывов плазмы энергетическая нагрузка приходится на первую стенку, при каждом срыве на всей покрытой бериллием поверхности первой стенки выделяется 1,22 ГДж и будет испаряться от 2,5 [8] до 5 кг [5, 9] бериллия за срыв (в зависимости от оптимистичности оценок влияния образующейся завесы из паров бериллия на эрозию бериллиевой поверхности [9]), т.е. 250—500 кг бериллия в год или 1000—2000 кг за первые 10 лет эксплуатации реактора. Предусматривается, что бериллиевая пыль будет удаляться электростатическими пылесосами (или другим способом), чтобы ее количество в реакторе не превышало 100 кг.

Концентрацию бериллия в воздухе и воде, а также загрязнение им поверхностей производственных помещений, оборудования и спецодежды требуется постоянно контролировать. В настоящее время на бериллиевых предприятиях имеются измерительная аппаратура и методики для стандартного (периодического) контроля бериллиевых загрязнений, отвечающие современным требованиям. В дополнение к этому необходима аппаратура для непрерывного контроля концентрации бериллия в воздухе и сточных водах, работающая в реальном масштабе времени.

Для определения концентрации бериллиевых аэрозолей в воздухе в России разработаны два вида мониторов: один с чувствительностью 1 мкг/м<sup>3</sup> и временем измерения 1 мин, другой с чувствительностью 0,01 мкг/м<sup>3</sup> и временем измерения 30 мин [10].

Пределы безопасной концентрации Be-пыли, которые должны предотвратить ее взрывы, требуют дополнительного исследования.

В случае химического взаимодействия бериллия с водой или водяным паром при аварийных ситуациях возможно образование взрывоопасных количеств водорода, а также выделение накопленного трития.

## ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Физические и химические свойства бериллия.** Бериллий — легкий, светло-серый, тугоплавкий и хрупкий металл, принадлежащий к группе редких металлов. Его основные физические характеристики: атомный вес 9,0122; плотность при 20 °С 1,8477 г/см<sup>3</sup>; температура плавления 1283 °С; температура кипения 2970 °С. В земной коре содержание бериллия составляет  $6 \cdot 10^{-4}\%$ . Он встречается в составе более 30 минералов, из которых практическое значение имеет берилл  $3\text{BeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ , фенакит  $2\text{BeO} \cdot \text{SiO}_2$  и бертрандит  $4\text{BeO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  [11]. Наибольшее значение имеет первый, в котором содержание бериллия составляет 3—5%. По своим химическим свойствам бериллий является аналогом алюминия и цинка, на воздухе при комнатной температуре довольно устойчив к окислению. В химических соедине-

ниях бериллий двухвалентный, при высоких температурах взаимодействует с многими элементами: кислородом, серой, азотом, углеродом, галогенами и др. В прохладной и горячей воде бериллий практически не растворим, коррозионное влияние на него воды сильно зависит от чистоты металла и воды. Бериллий растворяется в разбавленной серной и соляной кислотах, с азотной он реагирует при нагревании. В щелочах растворяется, образуя бериллаты.

В промышленных масштабах первичный металлический бериллий получают по магний-термической и электролитической технологиям. Компактный металлический бериллий получают методом горячего прессования бериллиевого порошка в вакууме. Он используется для изготовления полуфабрикатов: выдавленного металла, листов, фольги, проволоки и др. Физико-механические свойства промышленных сортов бериллия (термическое расширение, теплопроводность, теплоемкость, модуль упругости, электрическое сопротивление, коэффициент Пуассона и др.) определяются в значительной степени его химическим составом, крупностью порошка, плотностью, средним размером зерна, кристаллографией, а также уровнем прочностных и пластических свойств.

**Взаимодействие бериллия с воздухом, водяным паром, водородом и углеродом.** Большая серия исследований взаимодействия разных видов бериллия с водой, водяным паром, воздухом и углеродом была проведена под руководством Д.А. Давыдова в Институте неорганических материалов им. А.А. Бочвара, и в INEEL (США). Российские экспериментальные установки и методики описаны в работе [12].

**Взаимодействие компактного и пористого бериллия с воздухом.** В российских исследованиях применялись пять видов компактного бериллия: ТГП-56 и ТР-30, полученные горячим прессованием в вакууме, а также ТШГ-56, ТШГ-200 и ТШГ-400, изготовленные горячей штамповкой порошка. Кроме того, эксперименты проводились с пористым бериллием, плотность которого варьировалась от 1,61 до 1,84 г/см<sup>3</sup>, открытая пористость — от 0,3 до 9,3%, полная пористость  $P$  — от 0,5 до 13%, длительность испытаний  $t$  — от 1 до 70 ч. Реакция бериллия с воздухом является экзотермической:



Взаимодействие компактного бериллия с воздухом при температуре ниже 1100 К практически отсутствует. При более высоких температурах оно становится заметным и достигает максимума при ~1200 К. При более высоких температурах формируется защитная окисная пленка, которая снижает взаимодействие. С пористым бериллием оно протекает более интенсивно, чем с компактным. Термоциклирование бериллия приводит к появлению трещин в защитной BeO-оболочке и усилению химического взаимодействия.

Увеличение массы компактного и пористого бериллия при взаимодействии с воздухом в интервале  $T = 973\text{—}1073 \text{ К}$

$$M_s = \exp [57 \pm 9 + (0,20 \pm 0,06) P] \exp (-Q/RT) t^{1,56 \pm 0,26} \text{ мг/см}^2,$$

где  $Q$  — энергия активации химического взаимодействия бериллия с воздухом ( $504 \pm 76 \text{ кДж/моль}$ );  $R$  — газовая постоянная, равная  $8,3143 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$  [12, 13].

В [5] для определения скорости реакции рекомендуется пользоваться формулами

$$RR = 5,37 \cdot 10^7 \exp(-26200/T) \text{ моль Ве}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \text{ при } T < 1073 \text{ К};$$

$$RR = 3,87 \cdot 10^3 \exp(-15900/T) \text{ моль Ве}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \text{ при } T > 1073 \text{ К}.$$

Для учета зависимости скорости реакции от давления предлагается использовать линейную зависимость  $RR \sim (P/P_1)$ .

**Взаимодействие бериллия, осажденного из паровой фазы, с воздухом.** Бериллий, осажденный из паровой фазы, в диапазоне температур от 1100 до 1200 К взаимодействует с воздухом так же, как и компактный бериллий. При 1300 К и выше такое взаимодействие существенно интенсивнее, чем взаимодействие твердого бериллия, резко повышающееся с ростом пористости [12, 13].

**Взаимодействие порошков бериллия с воздухом в диапазоне 773—1273 К.** В экспериментах Д.А. Давыдова средний размер частиц порошков варьировался от 14 до 31 мкм, удельная площадь поверхности  $Y$  — от 0,43 до 1,00 м<sup>2</sup>/г, «кажущаяся» плотность — от 0,57 до 0,68 г/см<sup>3</sup>. Содержание кислорода в образцах было от 0,6 до 1,01% масс. Время экспозиции — от 0,5 до 7 ч. От 1,2 до 1,8% бериллиевого порошка вступает в реакцию с воздухом при температурах немного ниже 770 К. Чем меньше средний размер частиц, тем выше доля порошка, вступившего в реакцию. При 1300 К доля прореагировавшего с воздухом порошка бериллия достигает 94—98% [13]. При 1100 К от 9 до 13% порошка взаимодействует с воздухом в течение первых 30 мин. В течение следующих 3—4 ч скорость взаимодействия замедляется; доля прореагировавшего порошка достигает 23—30%. После 5 ч контакта с воздухом наблюдается резкое повышение скорости взаимодействия, количество прореагировавшего порошка достигает 75—86%. Дистиллированные порошки взаимодействуют с воздухом более интенсивно [13]. На основе экспериментов получена зависимость для оценки увеличения веса порошков бериллия при взаимодействии с воздухом в диапазоне температур  $T$  от 773 до 1273 К:

$$M_g = M_N \{1 - \exp[-\exp(14,86 + 0,687Y) \exp(-Q/RT)t^{1,5}]\} \text{ г/г},$$

где  $M_N = 1,775$  г/г — теоретическое значение;  $Q = 152,2$  кДж/моль — энергия активации окисления бериллия;  $t$  — длительность взаимодействия, ч.

Скорость окисления

$$CO_g = [1,5 \cdot 1,775 E \exp(-E)] / t \text{ г}/(\text{г} \cdot \text{ч}),$$

где  $E = \exp(14,864 + 0,6867Y) \exp(-Q/RT)t^{1,5}$  [14].

Для коммерческих бериллиевых порошков ПТБ-30 (максимальный размер частиц 30 мкм, средний — 14—19 мкм, удельная площадь поверхности 0,9—1,0 м<sup>2</sup>/г, плотность 0,61—0,57 г/см<sup>3</sup>) усредненная скорость окисления в течение первых 300 мин в интервале  $T = 773—1273$  К при атмосферном давлении

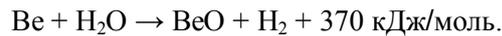
$$CO_s = (1,39 \cdot 10^5 \pm 3,79 \cdot 10^5) \exp[(-1,11 \pm 0,29)10^4/T] \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{мин}) [15].$$

При дальнейшей выдержке (свыше 5 ч при 1073 К) скорость окисления существенно снижается, во-первых, из-за уменьшения площади взаимодействия, так как пространство между Ве-частицами заполняется ВеО, и во-вторых, из-за уменьшения доли неокисленного бериллия. Более детальный анализ показал, что при 1073 К в первые 200 мин растет защитная пленка ВеО и скорость окисления снижается. Суммарное количество окисленного бериллия при этом увеличивается по параболической зависимости

$$G_1 = (1920 \cdot t)^{1/2} \text{ мг/м}^2,$$

где  $t$  — длительность взаимодействия, мин. В следующие 100 мин защитные свойства оксидной пленки, по-видимому, ухудшаются и суммарное количество окисленного бериллия увеличивается по линейной зависимости  $G_2 = 7,7 \cdot t \text{ мг/м}^2$  [15].

**Взаимодействие бериллия с водяным паром.** Химическая реакция бериллия с водой и паром является также экзотермической. При этом выделяются водород и тепловая энергия по реакции



Реакция начинается в диапазоне температур от 700 до 1300 К, и многое зависит от условий (порошковый или компактный бериллий, его пористость или плотность, наличие холодной поверхности для теплостока) [12]. Зависимости скорости образования водорода от температуры при взаимодействии компактного и порошкового бериллия с водяным паром можно получить из экспериментальных данных, приведенных на рис. 3 статьи [16]:

$$\begin{aligned} H_s &= \exp(8,296 - 1,488 \cdot 10^4/T) \text{ л/(м}^2 \cdot \text{с)} \text{ при } T = 673\text{—}873 \text{ К;} \\ H_s &= \exp(31,176 - 3,4855 \cdot 10^4/T) \text{ л/(м}^2 \cdot \text{с)} \text{ при } T = 873\text{—}1123 \text{ К;} \\ H_s &= \exp(10,299 - 1,178 \cdot 10^4/T) \text{ л/(м}^2 \cdot \text{с)} \text{ при } T = 1123\text{—}1473 \text{ К.} \end{aligned}$$

Здесь литры — стандартные, т.е. при нормальном давлении (101,3 кПа) и температуре 273 К. Для их пересчета в миллиграммы водорода служит коэффициент 89,94 мг/л. В работе [5] для оценки скорости образования водорода при взаимодействии компактного бериллия с водяным паром рекомендуются зависимости

$$\begin{aligned} H_s &= 4,8 \cdot 10^9 \exp(-25850/T) \text{ л/(м}^2 \cdot \text{с)} \text{ при } T < 1173 \text{ К;} \\ H_s &= 7,9 \cdot 10^4 \exp(-12830/T) \text{ л/(м}^2 \cdot \text{с)} \text{ при } T > 1173 \text{ К.} \end{aligned}$$

Другая зависимость для оценки образования водорода при взаимодействии водяного пара с компактным бериллием СРМ (consolidated powder metallurgy) за время  $t$  (с) при  $T = 723\text{—}873 \text{ К}$ , которая может быть получена из данных, представленных в [16],

$$H_t = \{\exp[2,303(1-5000/T)]t\}^{1/2} \text{ л/м}^2.$$

Для учета зависимости скорости реакции от давления рекомендуется использовать зависимость

$$H_t \sim (P/P_1)^m,$$

где  $m = 0,9$  при  $0 < P < 0,2 \text{ МПа}$ ,  $m = 0,6$  при  $0,2 \text{ МПа} < P < 0,4 \text{ МПа}$ ,  $m = 0,4$  при  $0,4 \text{ МПа} < P < 0,6 \text{ МПа}$ ,  $m = 0$  при  $P > 0,6 \text{ МПа}$ .

**Взаимодействие порошков бериллия с водяным паром на плоской поверхности и в щелях при 673—973 К.** Суммарное количество бериллия, окисленного при  $T = 673\text{—}873 \text{ К}$  и давлении 50—300 кПа, увеличивается по параболической зависимости

$$G = \{(0,499 \pm 0,309 \exp[-(1,073 \pm 0,055)10^4/T])t\}^{1/2} \text{ моль/м}^2,$$

где  $t$  — время, мин [14]. Другую зависимость для суммарного количества образовавшегося водорода можно получить из данных, приведенных в [16]:

$$H_t = [\exp(8,543 - 1,675 \cdot 10^4/T)t]^{1/2} \text{ л/м}^2 \text{ при } T = 673\text{—}873 \text{ К.}$$

Кинетика образования водорода может быть проиллюстрирована, например, такой эмпирической зависимостью для 903 К и 50 кПа, где  $t$  — время, мин [17]:

$$G_H = 0,0019 + 2 \cdot 10^{-4}t - 2 \cdot 10^{-7}t^2 \text{ моль.}$$

Зависимость скорости образования водорода при взаимодействии водяного пара с бериллиевым порошком крупностью 15—56 мкм на плоской поверхности при 90—300 кПа от температуры [18]:

$$V_p = (6,15 \pm 2,51)10^6 \exp[-(1,18 \pm 0,04) 10^4/T] \text{ см}^3/(\text{г} \cdot \text{мин}).$$

Аналогичная зависимость для взаимодействия в щелях (шириной 0,5—1 мм, глубиной 10 мм и длиной 40 мм):

$$V_s = 1,63 \cdot 10^4 \exp(-0,68 \cdot 10^4/T) \text{ см}^3/(\text{г} \cdot \text{мин}) [18].$$

**Взаимодействие бериллия с водородом.** Бериллий не взаимодействует с молекулярным водородом вплоть до 1300 К. Растворимость водорода в бериллии незначительна, его количество не превышает  $C_{H_2} = 2 \cdot 10^{-4}\%$ . Бериллий поглощает водород в 20—50 раз слабее, чем нержавеющая сталь. Понижение концентрации ВеО в бериллии до 0,32% сопровождается снижением поглощения водорода до  $C_{H_2} = 0,001 \text{ см}^3/\text{г}$  ( $P_{H_2} = 100 \text{ кПа}$ ,  $T = 1023 \text{ К}$ ).

**Взаимодействие порошков бериллия с углеродом.** Осаждение Ве-пыли, распыленной из защитного покрытия первой стенки ТЯУ, на горячих углеродных элементах дивертора может привести к образованию карбида бериллия  $Be_2C$  — пористого материала с низкой теплопроводностью, следствием чего может стать превышение проектных температурных пределов на поверхности соответствующих элементов. Поэтому были проведены экспериментальные исследования скорости роста слоя карбида бериллия при максимальной номинальной проектной температуре углеродных элементов дивертора реактора ИТЭР (1223 К). Эксперименты показали, что лимитирующим механизмом при взаимодействии бериллиевой пыли и углерода является диффузия атомов бериллия через карбидный слой. Толщина последнего

$$h = 1,12(D_{Be} \cdot t)^{1/2},$$

где  $D_{Be} = (24 \pm 6)10^{-6} \exp[102\,400 \pm 2500/RT] \text{ см}^2/\text{с}$  — коэффициент диффузии бериллия в  $Be_2C$ ,  $t$  — время, с [15].

**Химические соединения бериллия.** Оксид бериллия ВеО — обычно белый аморфный порошок, но может быть получен и в кристаллической форме. Растворимость в воде ~0,2 мг/л. ВеО, полученный при низкой температуре, гигроскопичен. Не реагирует с водой. ВеО, полученный при 400—440 °С, легко растворяется в кислотах. При выдержке на воздухе на Ве образуется твердая оксидная пленка, которая сохраняет свои защитные свойства и остается стабильной на сухом воздухе вплоть до 700 °С. Эта пленка предотвращает воздействие воздуха на Ве при нормальной температуре, а при более высокой подвергается воздействию кислорода и водорода. В парах воды при температуре более 2000 °С она испаряется. Сильно прокаленный ВеО (>1000 °С) не растворяется в холодной разбавленной соляной

кислоте. Он медленно растворяется в горячей концентрированной соляной кислоте, хорошо растворяется в  $\text{HF}$  и в горячей концентрированной серной кислоте.

Карбид бериллия  $\text{Be}_2\text{C}$  — красноватое твердое вещество, разлагающееся при температуре выше  $2000\text{ }^\circ\text{C}$ , образуется при нагревании металлического бериллия с порошком углерода при  $1360\text{ }^\circ\text{C}$ . Может образоваться в термоядерном реакторе, когда  $\text{Be}$ -пыль осаждается на углеродных элементах, нагретых до высокой температуры. Под действием водяного пара или воздуха медленно разлагается, выделяя метан. У  $\text{Be}_2\text{C}$  твердость выше, чем у карбида кремния. Он устойчив к окислению на воздухе.

Гидроксид бериллия  $\text{Be}(\text{OH})_2$  — белое вещество, одно из самых низкорастворимых неорганических веществ, обладающее аллергенными свойствами. Может быть получен при реакциях растворов солей бериллия с щелочами, аммиаком и органическими основаниями. Аморфный бериллиевый гидроксид выглядит как желатиноподобный осадок. Он может содержать различное количество воды:  $\text{Be}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . При температуре выше  $140\text{ }^\circ\text{C}$  теряет воду. Может переходить в метастабильную кристаллическую  $\alpha$ -форму, которая самопроизвольно переходит в кристаллическую  $\beta$ -форму. Кристаллический гидроксид бериллия разлагается при температуре от  $240$  до  $300\text{ }^\circ\text{C}$  [11].

Сульфат бериллия  $\text{BeSO}_4$  является кристаллическим, бесцветным, очень гигроскопичным веществом. Он может быть получен, например, при нагревании тетрагидрата сульфата бериллия  $\text{BeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  с концентрированной серной кислотой или его дегидратацией при нагревании до  $300\text{—}400\text{ }^\circ\text{C}$ .  $\text{BeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  получают, например, при растворении карбоната или гидроксида бериллия в разбавленной серной кислоте с последующим выпариванием и охлаждением. Он теряет  $\text{H}_2\text{O}$  при  $100\text{ }^\circ\text{C}$  и  $4\text{H}_2\text{O}$  при  $250\text{—}400\text{ }^\circ\text{C}$ .  $\text{BeSO}_4$  разлагается при температуре выше  $550\text{ }^\circ\text{C}$ .

Нитрид бериллия  $\text{Be}_3\text{N}_2$  образуется при сгорании бериллия в воздухе или его реакции с азотом при температуре выше  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ . Это бесцветное, очень твердое вещество с температурой плавления  $2200 \pm 40\text{ }^\circ\text{C}$ . Нитрид бериллия инертен относительно воздуха, активно реагирует с разбавленными горячими кислотами, в концентрированных щелочах быстро разлагается.

Нитрат бериллия  $\text{Be}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  состоит из белых кристаллов, очень гигроскопичен, летуч на воздухе, хорошо растворяется в воде. Быстро разлагается при нагревании до  $200\text{ }^\circ\text{C}$ , образуя  $\text{BeO}$  и азотную кислоту.

Безводный хлорид бериллия  $\text{BeCl}_2$  — белое, кристаллизованное в игольчатую структуру, плавкое, летучее вещество, хорошо растворяющееся в воде при сильном нагревании. Энергично отбирает влагу из воздуха, подвергаясь гидролизу. При нагревании на воздухе распадается с выделением хлора. Производит плавкие смеси с хлоридами  $\text{Mg}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Ba}$ ,  $\text{K}$ ,  $\text{Na}$  и  $\text{Cd}$ .

Карбонат бериллия  $\text{BeCO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  получается при длительном насыщении  $(\text{BeO})_5\text{CO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (основного карбоната  $\text{Be}$ ) в воде с двуокисью углерода. Разлагается при температуре выше  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . Основной карбонат бериллия является твердым раствором нормального карбоната  $\text{Be}$  и двуокиси бериллия.

Фторид бериллия  $\text{BeF}_2$  — бесцветное, гигроскопичное вещество, стекловидное после плавления. Он и его комплексные соли являются очень важными состав-

ляющими в аналитической химии и бериллиевой технологии.  $\text{BeF}_2$  растворим в воде, летуч при высоких температурах.

Аммоний фторида бериллия  $(\text{NH}_4)_2\text{BeF}_4$  играет важную роль в технологии бериллия. Он имеет устойчивый состав при комнатной температуре, но при нагревании до  $900^\circ\text{C}$  разлагается на фторид бериллия и фтористый аммоний. Его растворимость в воде составляет 21,1 г на 100 г раствора.

**Воздействие бериллия на организм человека.** По воздействию на организм человека бериллий относится к чрезвычайно опасным веществам (первый класс опасности согласно ГОСТу 12.1.007—76). Необходимы не только специальные меры защиты при работе с ним, но и постоянное медицинское наблюдение за персоналом, работающим с этим материалом. Существуют три основные разновидности заболеваний, связанных с бериллием (бериллиоза): поражения легких, дерматиты и конъюнктивиты. Они могут иметь острую и хроническую форму.

Прекрасный краткий обзор результатов медицинских наблюдений за персоналом бериллиевого производства на Ульбинском металлургическом заводе (УМЗ) сделан А.Г. Ковязиным, А.А. Урихом и Л.А. Ковязиной [19]. Материалы данного раздела взяты в основном из этого обзора. За 50 лет (с 1951 по 2000 г.) функционирования этого производства зарегистрировано 1830 случаев профессиональных заболеваний. Их структура приведена в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Количество профессиональных заболеваний по видам и форме [19]

Заболевание	Острое	Хроническое	Всего
Заболевание легких	252	478	730
Дерматит	602	43	645
Конъюнктивит	432	23	455
Всего	1286	544	1830

Бериллий обладает высокой биологической активностью. Степень воздействия аэрозолей бериллия на организм человека определяется путем их поступления. Наибольшую опасность в этом отношении представляет ингаляционный путь. Частицы бериллия проникают в альвеолы, где происходит их осаждение, а также контакт со стенками. Определенную опасность в гигиеническом плане имеет контакт с поверхностью кожи. Проникновение бериллия в организм через желудочно-кишечный тракт не ведет к развитию общих поражений.

Уровень профессиональной заболеваемости прямо зависит от технологического уровня производства и степени защищенности персонала. Наибольшее количество профессиональных заболеваний (45,4%) наблюдалось в первые 15 лет функционирования производства. В этот период основную долю профессиональных заболеваний составлял острый бериллиоз, что было связано с отсутствием надежных средств индивидуальной защиты, а также с плохим технологическим, аппаратурным и организационным обеспечением производственных процессов. Кроме того, хронические формы заболеваний имеют инкубационный период 5–15 лет и в начальный период освоения производства не могут фиксироваться. Первые случаи хронических форм были отмечены в 1956 г. В 60—70-е годы заболеваемость токсическими бронхитами превалировала над заболеваемостью гранулематозами за счет воздействия кислот, щелочей, фтора и растворимых соединений бериллия.

С целью снижения заболеваемости бериллиозом на УМЗ были приняты следующие меры:

- производственные участки разделены на зоны по уровню запыленности, разработаны и внедрены в практику нормы и правила работы в этих зонах;
- создана лаборатория для постоянного контроля за содержанием бериллия в воздухе производственных участков, территории завода и за ее пределами;
- весь работающий с бериллием персонал обеспечен чистой спецодеждой с обязательной заменой при каждом выходе из производственной зоны и входе в нее;
- введено обязательное использование индивидуальных средств защиты во всех производственных зонах, даже там, где содержание бериллия в атмосфере ниже предельной нормы;
- организовано специальное бесплатное лечебно-профилактическое питание, сокращена до 36 ч рабочая неделя, увеличен до 30—56 рабочих дней ежегодный отпуск;
- осуществляется обязательный ежегодный и предварительный (при приеме на работу) медицинский осмотр [19].

Усовершенствование технологии производства, улучшение условий труда и применение средств защиты снизили уровень заболеваемости и изменили структуру профессиональной патологии в сторону преобладания хронических заболеваний. Острые профессиональные заболевания легких не были зарегистрированы с 1982 г., острые дерматиты и конъюнктивиты — с 1988 г.

Однако хронические формы профессионального бериллиоза (гранулематоза легких) в настоящее время, по-видимому, неизбежны, что свидетельствует об аллергической природе этого заболевания. В основном оно связано с наличием в воздухе парофазных, аэрозольных и пылевых нерастворимых соединений Ве (металлургическое производство Ве, производство порошков Ве и ВеО, механическая обработка металлического Ве, ремонт оборудования). В первую очередь здоровьем рискует технологический и ремонтный персонал. На аппаратчиков приходится 48,6% профессиональных больных, на слесарей-ремонтников — 13,6%, на инженерный и административный персонал — 11,6%.

Риск заболевания бериллиозом возрастает пропорционально стажу работы с бериллием и возрасту, что свидетельствует об ослаблении защитных функций организма по отношению к воздействию бериллия при длительной работе и с возрастом. Больные, трудовая деятельность которых началась после 1980 г. (в последние 20 лет), составляют только 4,7%. Большинство (95%) профессиональных больных имеет возраст 41 год и больше. Мужчины составляют 79,5% заболевших. Средняя продолжительность заболевания от выявления до смерти составляет 8 лет. У ряда лиц она была от года до 3 лет.

Хронический легочный бериллиоз — наиболее тяжелая по последствиям и практически неизлечимая болезнь. В результате ее прогрессирует легочно-сердечная недостаточность, являющаяся основной причиной смерти. Анализ причин смерти 238 профессиональных больных показал, что в 49,6% случаев она наступила вследствие профессионального заболевания (развития легочно-сердечной недостаточности), в остальных случаях первопричиной являлось сопутствующее осложнение, в частности, 17,2% случаев связаны с онкологическими заболеваниями-

ми, преимущественно раком легкого. Однако только в трех случаях из 19 было признано, что он профессионального происхождения. Поэтому имеющиеся данные не дают однозначных оснований к отнесению Вe к канцерогенным веществам. В 13% случаев смерть наступила от ишемической болезни сердца.

Категория больных, страдающих легочным бериллиозом, — самая тяжелая. Постоянная гипоксия из-за альвеолярно-капиллярного блока делает их жизнь невыносимой и иногда приводит к самоубийствам. На УМЗ не было случаев обратного развития гранулематоза легких. Четко прослеживаются две категории больных — с медленным и быстрым прогрессированием заболевания. Возможно, это связано с иммунологическим статусом организма.

Применявшиеся ранее комплексоны для выведения бериллия из организма оказались неэффективными. Кортикостероидные гормоны и иммуномодуляторы замедляют течение болезни, но их применение ограничено из-за осложнений. Первостепенную роль в предупреждении гранулематоза имеют диагностика и профилактика, однако обе эти проблемы далеки от разрешения. К сожалению, в общей медицинской практике они не являются первоочередными из-за социальной малозначимости (небольшой контингент больных, значительные затраты на исследования). В настоящее время наиболее действенный способ уменьшения заболеваемости бериллиозом — снижение уровня прямого воздействия бериллия на организм человека [19].

## **ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДЕЛЬНЫМ УРОВНЯМ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ, ПЛАНИРОВКЕ ПОМЕЩЕНИЙ И ОРГАНИЗАЦИИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА**

**Основные положения.** Проблемы безопасности для предприятий и учреждений, использующих бериллий в России, регулируются стандартами, правилами и другими нормативными документами, которые разработаны специализированными научными организациями и одобрены авторитетными государственными деятелями в области защиты здоровья и производственной санитарии [20, 21]. Санитарными правилами для проектирования и технического обслуживания предприятий, использующих бериллий, устанавливаются правила техники безопасности, определяются требования к генеральному плану, порядку размещения зданий и сооружений, к планировке производственных помещений, технологическим процессам и оборудованию, вентиляции и газовой очистке от пыли, организации ремонта, санитарным услугам, индивидуальной защите рабочих, организации контроля рабочих режимов, экологической безопасности, организации санитарного контроля. Нормативные документы предъявляют требования к защите атмосферного воздуха, грунта, растительности, поверхностных и подземных вод. Они также предъявляют требования по безопасности к сточным водам, системам вентиляции, сетям канализации, в том числе специальной канализации, жидким и твердым отходам, средствам промежуточного хранения, перевозки и утилизации отходов, санитарно-защитной зоне, средствам мониторинга и контроля окружающей среды.

**Пределные уровни и концентрации при нормальной работе.** С целью предотвращения вредного воздействия бериллия на организм человека в России приняты предельно допустимые уровни и концентрации Вe-загрязнений [20—26], представленные в табл. 2. Те же пределы приняты во всех странах СНГ. В боль-

шинстве других стран предельно допустимая концентрация (ПДК) бериллия в воздухе производственных помещений (рабочей зоне) составляет 2 мкг/м<sup>3</sup>, в Финляндии — 6 мкг/м<sup>3</sup>. Однако в Дании так же, как и в странах СНГ, этот предел равен 1 мкг/м<sup>3</sup>. В Германии и Австрии ПДК бериллия в воздухе производственных помещений в инструкциях не определен [27].

Т а б л и ц а 2. Предельно допустимые уровни и концентрации бериллия, принятые в России

Объект контроля	Величина	Ссылка
Воздух производственных помещений (рабочая зона)	1 мкг/м <sup>3</sup>	[20]
Воздух на площадке и в санитарной зоне	0,1 мкг/м <sup>3</sup>	
Воздух для жилых кварталов	0,01 мкг/м <sup>3</sup>	[21]
Вода водоемов санитарно-бытового назначения	0,2 мкг/л	[22]
Остаточное загрязнение кожных покровов после мытья:		
при работе с растворимыми соединениями	0,01 мг/м <sup>2</sup>	[23]
при работе с нерастворимыми соединениями	0,1 мг/м <sup>2</sup>	[23]
Гладкие стены и поверхности промышленных помещений (металл, керамика, полихлорвинил, масляная краска и т.п.)	2,0 мг/м <sup>2</sup>	[24]
Пористые поверхности промышленных помещений (бетон, кирпич и т.д.)	5,0 мг/м <sup>2</sup>	[24]
Стены и поверхности административно-бытовых помещений	0,5 мг/м <sup>2</sup>	[24]
Рабочая одежда:		
из синтетических материалов	1,0 мг/м <sup>2</sup>	[25]
хлопчатобумажная	2,5 мг/м <sup>2</sup>	[25]
Внутренние поверхности пленочных средств индивидуальной защиты (СИЗ)	2,5 мг/м <sup>2</sup>	[25]
СИЗ дополнительные пленочные (после обработки в санитарных шлюзах)	1,0 мг/м <sup>2</sup>	[25]
Нательное белье	0,5 мг/м <sup>2</sup>	[25]
Специальная обувь	2,0 мг/м <sup>2</sup>	[25]
Шланги для подачи воздуха в дополнительные СИЗ:		
внешняя поверхность	2,0 мг/м <sup>2</sup>	[25]
внутренняя поверхность	Не допускается	[25]
Металлолом, сдаваемый на предприятия Вторчермета (ГОСТ 2787-63)		
измельченный	5,0 мг/м <sup>2</sup>	[26]
неизмельченный	0,3 мг/м <sup>2</sup>	[26]
Грунт в санитарно-защитной зоне	2,0 мг/кг	
Снег в жилых областях	0,2 мг/м <sup>2</sup>	
Древесная зола	0,2 мг/кг	

В США ПДК бериллия в воздухе жилых кварталов принята на уровне 0,01 мкг/м<sup>3</sup>, как и в странах СНГ. Комиссией по атомной энергии США на основе работ различных фирм США были установлены допустимые ПДК [27, 28]: средняя концентрация бериллия в воздухе производственных помещений при 8-часовом рабочем дне 2 мкг/м<sup>3</sup>; при превышении этого показателя до 5 мкг/м<sup>3</sup> необходимо применять респираторы и принимать меры по снижению концентрации; ПДК бериллия в зоне непрерывной работы для периодов, не превышающих 30 мин, принимается равной 25 мкг/м<sup>3</sup>.

Геохимические фоновые концентрации бериллия в России (данные Института биофизики, Министерство здравоохранения) составляют: почва — 0,3—3,6 мкг/кг; снег — 2—300 нг/м<sup>2</sup>; древесная зола — 120—270 мкг/кг.

В ходе эксплуатации реактора с применением дейтерий-тритиевого топлива в бериллии будет накапливаться тритий. При аварийных ситуациях в термоядерном

реакторе он может выделиться из бериллия. Кроме того, бериллий будет активироваться (в основном за счет примесей). Для согласования проекта ТЯУ с органами лицензирования (саннадзора) необходимо установить новую ПДК бериллия, содержащего тритий. Возможно, потребуется снизить ПДК бериллия в 10 раз для учета комбинированного воздействия на организм человека обоих этих веществ.

Одним из важных факторов, влияющих на безопасность термоядерного реактора, является количество эрозионной пыли, накапливающейся в вакуумной камере. Пыль образуется при нормальной работе реактора в результате физического распыления первой стенки ионами дейтерия и трития. Пыль образуется также из-за испарения и разбрызгивания расплавленного материала покрытия первой стенки при срывах плазмы. При аварийных ситуациях может произойти значительное выделение водорода, воспламенение пыли, ее взрыв и поступление в рабочие помещения или окружающую среду. Для предотвращения этих опасных явлений в реакторе ИТЭР поставлено требование, чтобы количество Ве-пыли внутри вакуумного корпуса не превышало 100 кг, а на элементах дивертора — 6 кг.

**Требования к планировке и безопасности рабочих зон. Зонная планировка рабочих помещений.** Все производственные помещения реакторного здания ИТЭР и другие здания, в которых будут проводиться работы с бериллием, должны иметь трехзонную планировку [1, 2]. Сокращение зональности допускается по согласованию с органами Госсаннадзора только в исключительных случаях.

**Респираторная защитная зона.** Устанавливается там, где есть вероятность, что концентрация бериллия в воздухе может превысить  $0,2 \text{ мкг/м}^3$  ( $0,2 \text{ ПДК}$ , которая равна  $1 \text{ мкг/м}^3$ ). Предполагается, что в результате проектной аварии могут быть нарушены локализирующая и защитная системы зоны и загрязнения бериллием (формируемые вне данной зоны) превысят допустимые пределы. Эта зона предназначена для размещения технологического оборудования, включая трубопроводы и транспортеры, являющиеся источником загрязнения производственных помещений бериллием. К ней относится сам токамак; часть оборудования, обеспечивающего вход в открытый токамак; вентиляционная система до системы фильтрации; зоны горячих камер, содержащие оборудование, загрязненное бериллием выше пределов для контролируемой зоны. Особое внимание следует уделять локализации образующихся аэрозолей и избытков тепла. В связи с этим оборудование периодического действия, а также оборудование, при работе которого образуется избыток тепла, должно размещаться в отдельных помещениях респираторной защитной зоны типа каньонов, боксов, камер и т.п. Постоянное пребывание персонала в этой зоне запрещается.

**Контролируемая (ремонтно-транспортная) зона.** Предназначена для транспортировки изделий, загрязненных бериллием, а также ремонта и временного хранения оборудования, извлеченного из первой зоны. Она включает соединительные камеры токамака, шлюзы, комнаты для переодевания персонала, душевые, вентиляционную систему после системы фильтров; ячейки для обслуживания внутрикамерных компонентов, пути для средств транспортировки заменяемого оборудования вплоть до горячих камер, помещения для вакуумного оборудования, сборочные залы и т.д.

В неконтролируемой зоне размещаются административные, операторские, диспетчерские, пультовые, щитовые и все другие помещения, загрязненность которых бериллием крайне маловероятна.

Сообщение между респираторной защитной и контролируемой зонами должно осуществляться через шлюзы. Архитектурно-планировочное решение каждой зоны определяется характером технологического процесса и особенностями оборудования. Требования для трехзонной планировки производственных помещений представлены в табл. 3 [4, 7]. Все производственные помещения термоядерной установки должны быть отнесены к одной из зон, описанных в этой таблице.

Т а б л и ц а 3. Критерии, определяющие трехзонную планировку производственных помещений

Зона	Концентрация Ве в воздухе $K$ , мкг/м <sup>3</sup>	Ве-загрязнение поверхности, $S$ , мкг/м <sup>2</sup>	Доступ персонала и контроль условий работы
Неконтролируемая	$< 0,01$	$< 10$	Неограниченное время нахождения без защитных или контролирующих средств
Контролируемая	$0,01 < K < 0,2$	$10 < S < 50$	Время нахождения ограничено и определяется программой работ (операциями с загрязненным Ве-оборудованием) и загрязненностью воздуха. Для работы необходимы СИЗ: легкие респираторы, спецодежда, перчатки, ботинки и т.д. Контроль осуществляется в течение всех периодов работы. Помещения зоны идентифицируются соответствующими объявлениями на входе
Респираторная	$> 0,2$	$> 50$	Загрязненность бериллием в этой зоне соответствует нормальным рабочим условиям. Время доступа в зону разрешается и ограничивается специальными инструкциями. При проведении работ необходимо использовать защитные средства, изолирующие персонал от воздействия Ве и его аэрозолей.

**Защита воздуха в рабочих помещениях и окружающей среде от загрязнений аэрозолями бериллия.** Жесткие требования к допустимой концентрации аэрозолей бериллия в воздухе ставят проблему предотвращения его загрязнения и очистки, довольно сложную и требующую высоких затрат. Распространение аэрозолей бериллия из мест их образования определяется схемой вентиляции, формирующей аэродинамику воздушных потоков в помещениях, и аэродинамическими связями между помещениями. Причинами утечек аэрозолей в воздух рабочих помещений из боксов и воздухоизолированных помещений могут быть вибрации, а также колебания температуры и давления. Кроме того, аэрозоли бериллия могут попадать в воздух с загрязненных поверхностей.

Эффективная защита персонала требует комплекса санитарных мер — от индивидуальных средств защиты дыхания до широких мер по предотвращению загрязнения воздуха. В целом для защиты персонала от загрязнения воздушной среды внутри рабочих помещений в зависимости от функции помещений рекомендуется следующее:

— использование СИЗ (одноразового или многократного использования, с принудительной подачей воздуха или без нее, фильтрующих или изолирующих, шланговых или автономных);

— укрытие, изоляция или герметизация источников вероятного выделения загрязнений, применение стационарных или автономных средств местной вентиляции, обеспечивающей местный отсос и улавливание выделяющихся аэрозолей бериллия;

— зонирование помещений, использование эффективных схем общеобменной вентиляции (ламинирование и создание направленных потоков воздуха), повторное использование воздуха.

Предотвращение загрязнения окружающей воздушной среды предусматривает:

— недопущение неорганизованного выхода воздуха из помещений с повышенным загрязнением;

— максимально возможное сокращение объема воздуха, выбрасываемого в окружающую среду, за счет его повторного использования и создания замкнутых систем вентиляции в помещениях;

— очистку промышленных и вентиляционных выбросов;

— создание функционально различных, независимых систем общеобменной и местной вентиляции.

**Локализация распространения аэрозольных загрязнений.** Технологическое оборудование и аппаратура, являющиеся источниками загрязнения воздуха бериллием, должны быть расположены в отдельном помещении (каньоне, боксе, укрытии), являющемся барьером безопасности и изолированном от других помещений. Вход в незагрязненную зону должен осуществляться через санитарные шлюзы, оборудованные душевыми и хранилищами средств индивидуальной защиты. Технологическое оборудование, которое является потенциальным источником опасных паров, газов, а также аэрозолей бериллия, должно быть обеспечено укрытиями с откачной вентиляцией. Демонтированное оборудование больших размеров должно быть очищено от Be-загрязнений непосредственно на рабочем месте или в зоне транспортировки и ремонта. Технологические блок-схемы и вентиляционные схемы должны обеспечить непрерывную технологическую цепочку обращения с бериллием на площадке термоядерного реактора, кратчайшие пути транспортировки между последовательными технологическими стадиями, воздухопроницаемость оборудования, автоматизацию и сокращение ручных операций, утилизацию твердых и жидких отходов с применением экстракции бериллия и получением, если возможно, биологически безопасных продуктов. Технологические изделия должны перемещаться между производственными помещениями по воздухопроницаемым транспортным линиям, находящимся под небольшим разряжением. Загрязнение внешней среды технологическими растворами предотвращают с помощью откачного оборудования.

**Вентиляция, газо- и пылеочистка.** Все производственные помещения ТЯУ оборудуются вентиляционными системами, которые в сочетании с технологическими мероприятиями должны обеспечить при нормальном и ремонтном режимах работы, а также при аварийных ситуациях соблюдение санитарных норм чистоты и качества воздуха. Предусматривается создание общеобменной и местной вентиляции. При необходимости создается технологическая ремонтная вентиляция, а также в отдельных случаях аварийная. Ремонтную вентиляцию следует рассматривать

как часть местной, локализирующей возможные вредные последствия, связанные с загрязнением воздуха в зоне ремонтных работ.

Система вентиляции производственных помещений и участков ТЯУ должна отвечать следующим требованиям [29]:

- общеобменная вентиляция, как приточная, так и вытяжная, должна осуществляться раздельными системами;

- приточный воздух необходимо подавать в чистую зону и на участки, оборудование которых не является источником загрязнения;

- вытяжку требуется осуществлять из загрязненных помещений и участков;

- концентрация бериллия в подаваемом в рабочую зону воздухе не должна превышать 0,1 ПДК для производственных помещений;

- вытяжные центры бериллиевых предприятий следует, как правило, размещать в отдельно стоящих зданиях;

- в производственных помещениях грязной зоны нужно поддерживать разрежение по отношению к чистой зоне; величина разрежения должна составлять 10—20 Па, а в герметичных боксах и камерах с помощью самостоятельной вытяжной вентиляции — не менее 200 Па;

- в производственных помещениях, в которых при повреждении коммуникаций или аппаратов возможно внезапное поступление в воздух больших количеств аэрозолей бериллия или других опасных веществ, следует предусмотреть резервные вентиляторы и газоочистную аппаратуру, позволяющие снизить запыленность воздуха до санитарных норм в течение часа;

- для предупреждения разноса Ве-аэрозолей при переходе из загрязненной зоны в более чистую и для частичного удаления загрязнений со спецодежды в санитарных шлюзах необходимо предусматривать вакуумные отсасывающие устройства; удаляемый воздух должен сбрасываться в общую систему непосредственно перед фильтрами или иметь свою систему очистки.

Все вентиляционные выбросы и сбросные газы, загрязненные аэрозолями бериллия и его соединений, подлежат очистке. В систему газопылеочистки бериллий поступает в виде пыли различной крупности как самого металла, так и его соединений и аэрозолей. Пыль может содержать композиции Cu—Ве, Fe—Ве, Ве-абразив, соединения бериллия с кислородом, азотом, углеродом, водородом, тритием. В процессе очистки образуются отходы в виде сухих порошков, водных суспензий металлического порошка и сопутствующих материалов, водных растворов соединений бериллия, вод от промывки оборудования и коммуникаций, фильтров, фильтропалочек и других материалов.

Очистка газов и вентиляционных выбросов ТЯУ будет включать набор операций и проводиться соответствующей аппаратурой. Вероятней всего, потребуется деионизация очищаемых газов, применение орошаемых скрубберов, аппаратов с различного рода насадками, например, шариковыми, рукавными и иными фильтрами, включая электрические. При этом необходимо учитывать наличие радиоактивной пыли, что может вызвать необходимость проектирования отдельной цепочки пыле- и газоочистки со своей системой сбора, удаления, переработки, хранения и утилизации отходов.

В качестве очистных устройств в зависимости от свойств и концентрации аэрозолей могут применяться: для сухих газов, не содержащих капельной влаги, — рукавные фильтры различных конструкций с автоматической регенерацией рукавов; при малом содержании твердой дисперсной фазы — электрофильтрационные аппараты и фильтры из ткани ФПП (фильтрующее полотно Петрянова); для влажных аэрозолей, содержащих токсичные газовые составляющие и пары, — пенные аппараты, скрубберы с шаровой насадкой, инерционные каплеотделители; для влажных газов, содержащих небольшие количества твердых растворимых частиц, — самоочищающиеся фильтры с набивкой из органических волокон (лавсан, полипропилен и др.) или фильтры из этих же материалов.

Выбросы в атмосферу вентиляционного воздуха, загрязненного бериллием, без очистки запрещаются. Предварительная, или грубая, очистка вентиляционных выбросов должна проводиться непосредственно у места выделения пыли и аэрозолей, а затем выбрасываемый воздух должен направляться на централизованную тонкую очистку.

Газо- и пылеочистные сооружения должны располагаться, как правило, в отдельно стоящем здании и удовлетворять следующим требованиям: обеспечивать очистку газовентиляционных выбросов до уровней, гарантирующих соблюдение предельно допустимых выбросов (ПДВ), величины которых зависят от места сооружения ТЯУ; иметь устойчивый КПД; быть надежными в эксплуатации; гарантировать минимальный контакт обслуживающего персонала с вредными веществами при ремонте и отсутствии контакта при обслуживании оборудования; накопление Ве-пыли на фильтрах должно быть ограничено, исходя из условий обеспечения безопасности в случае разрушения фильтров.

Фильтрующие системы должны иметь аппаратуру для контроля за загрязнением, целостностью и величиной сопротивления. При размещении очистного оборудования в отдельных помещениях к ним предъявляются те же требования, что и к помещениям грязной (респираторной защитной) зоны.

**Очистка поверхности от загрязнения бериллием.** Простая вентиляция недостаточна для очистки поверхности оборудования от загрязнения бериллием. Необходимо использовать дополнительные методы, исключаящие прямой контакт человека с отходами, загрязненными бериллием. К таким методам относятся: кислотнo-щелочная очистка; очищающее мытье; электрополирование или электро травление; обдувка замороженными таблетками CO<sub>2</sub>; очистка фреоном; обмывка водой под высоким давлением; механическая абразивная очистка; мокрая и сухая обдувка борированным карбидом или нитридом кремния.

Среди известных методов очистки поверхности наиболее рациональной представляется влажная абразивная очистка, использующая борированный карбид или нитрид кремния. Однако это требует дополнительной проверки. Водные пульпы после очистки подвергаются отстою или фильтрации. Отложения обрабатываются и утилизируются (в зависимости от содержания бериллия) так же, как и другие твердые отходы. Растворы очищаются вместе с другими жидкими отходами.

## МОНИТОРИНГ

**Общие положения.** Проект ТЯУ должен включать службу контроля за здоровьем персонала, задача которой — систематически следить за уровнем загрязнения производственных помещений, площадки ТЯУ, обеспечивать ее экологическую безопасность, а также разрабатывать предложения по мерам для улучшения условий труда и осуществлять контроль за их выполнением.

Вместе с тем служба здоровья должна систематически контролировать: загрязнение Ве-аэрозолями воздуха во всех производственных помещениях; эффективность очистки воздуха; загрязнение бериллием стен в рабочих помещениях и поверхностей оборудования, а также эффективность их очистки; концентрацию пожаро- и взрывоопасных веществ, пыли, газов, когда работа проводится в замкнутом пространстве, сосудах, укрытиях, стенах и других подобных конструкциях; эффективность очистки рабочей одежды и нижнего белья; загрязнение металлолома и степень его очистки от загрязнений перед отправкой на переработку, хранение или захоронение; загрязнение и степень очистки транспортных средств, используемых для обращения с бериллием; санитарные условия во всех производственных помещениях и на площадке ТЯУ; уровень чистоты воздуха, подводимого к рабочим местам, индивидуальным костюмам с наддувом, противогазам и к костюмам со шлангами; загрязнение бериллием атмосферного воздуха, грунта, растительности и воды в открытых водоемах на площадке ТЯУ, в санитарно-защитной зоне, жилых районах и окружающей среде; количество вредных веществ, выпускаемых в атмосферный воздух и в открытые водоемы.

Для атмосферы рабочих помещений, в которых существует опасность загрязнения бериллием, предусматривается два вида контроля: непрерывный и периодический. В настоящее время непрерывный контроль проводится в соответствии с п. 14 ГОСТа 12.1.007—76 «Вредные вещества. Классификация и общие требования». Непрерывный контроль должен обеспечиваться широким внедрением во всех помещениях ТЯУ средств автоматического контроля (например, фотоэлектронного спектрометра ФЭС-5) с выводом информации на центральный контрольный пункт. Периодический (инспекционный) контроль служит для определения условий труда на конкретном рабочем месте, для оценки влияния технических мероприятий (изменение вентиляции, ремонт, модернизация или замена технологического оборудования и т.п.) на загрязнение производственной атмосферы, а также для определения динамики аэрозольных загрязнений в ходе технологического процесса.

**Экологический мониторинг.** Под экологическим мониторингом по обеспечению экологической безопасности ТЯУ следует понимать систему регламентированных наблюдений с запрограммированным временным, пространственным и компонентным разрешением, оценки и прогнозирование состояния природной среды и ресурсов. Целью экологического мониторинга является информационное обеспечение управления природоохранной деятельностью и экологической безопасностью.

Основными объектами экологического мониторинга являются: природные среды (атмосферный воздух, поверхностные воды суши, морские воды, почва и земной покров, геологическая среда), источники антропогенного воздействия — по-

ступления в окружающую природную среду токсичных и экологически вредных загрязняющих веществ (сточных вод, газоаэрозольных выбросов, твердых отходов), природные ресурсы (воздух, водные, земельные ресурсы, ресурсы растительного и животного мира), воздействие на среду обитания (биологическое, шумовое, тепловое загрязнения), электромагнитные поля, ионизирующие излучения, нарушение ландшафта, состояние экосистем, а также здоровье населения.

Работы по обеспечению экологической безопасности ТЯУ можно разделить на следующие этапы.

1. Согласование санитарно-гигиенических нормативов и стандартов качества объектов окружающей природной среды в России (или другой стране размещения ТЯУ). Определение контрольных параметров для оценки влияния ТЯУ.

2. Определение параметров источников выделения и выбросов загрязняющих веществ во всех технологических системах в процессе разработки и эксплуатации ТЯУ.

3. Выяснение физико-химических и дисперсно-динамических характеристик выбрасываемых примесей.

4. Определение объема и оптимальной дискретности контроля в помещениях ТЯУ. Спецификация технических средств контроля, систем передачи, обработки и отображения информации. Программное обеспечение подсистемы контроля эмиссий (испускание, выделение, выброс).

5. То же по подсистеме контроля технологического микроклимата и системы экологического контроля на площадке ТЯУ.

6. Определение объемов и дискретности контроля эмиссий (загрязнение приземного слоя воздуха), количества стационарных постов контроля и их оптимального расположения на основе анализа орографических и гидрометеорологических особенностей района расположения объекта. Определение требований к техническим средствам подсистемы контроля эмиссий. Спецификация технических средств контроля, передачи и отображения информации.

7. Выбор методического и программного обеспечения расчетов переноса загрязнений.

8. Разработка экспертной системы комплексной диагностики состояния окружающей природной среды в зоне влияния ТЯУ, подготовка принятия оптимальных проектных и управленческих решений по стабилизации и снижению антропогенных нагрузок и обеспечению экологической безопасности.

**Аппаратура.** Методология и оснащение измерительной аппаратурой для стандартного (рутинного) контроля загрязнения бериллием воздуха, поверхностей, воды, почвы, спецодежды и т.д., доступные в настоящее время, отвечают почти всем предъявляемым требованиям. Однако пока нет экспрессной аппаратуры, работающей в реальном масштабе времени, для периодического контроля концентрации аэрозолей бериллия в воздухе производственных помещений и вентиляционных выбросах.

В СССР в 70-х годах были разработаны и испытаны три опытных образца экспрессного монитора аэрозолей бериллия на базе фотоэмиссионного спектрометра. Полученные положительные результаты позволили в 1980 г. выпустить первую промышленную серию из 10 приборов (заводское наименование изделия «Комплекс спектрометра ФЭС-5»), которые прошли испытания на различных предприятиях, связанных с производством и использованием бериллия в различных целях.

В соответствии с действующими в России требованиями в области экологии предлагаются следующие важнейшие положения концепции аэрозольного мониторинга воздуха производственных помещений и вентиляционных систем ТЯУ. Контроль аэрозолей должен осуществляться двумя путями. Первый — отбор разовых, сменных, суточных и других проб в заданных точках усредненного контроля на аналитические фильтры с последующим анализом фильтров известными рутинными или новыми, более быстрыми и дешевыми методами. Второй путь — анализ аэрозолей в заданных точках экспрессного контроля, обеспечивающий непрерывную выдачу информации об аэрозольной ситуации на центральный пост системы экологического мониторинга. В настоящее время для этих целей в России разрабатываются два экспрессных монитора концентрации аэрозолей бериллия.

**МАБЕР.** При создании монитора МАБЕР использован опыт разработки прибора ФЭС-5. МАБЕР основан на использовании фотоэлектронного спектрометра для Ве-аэрозолей с возбуждением спектра атомов бериллия униполярной дугой переменного тока непосредственно в непрерывно текущем через дуговую камеру потоке анализируемого воздуха [10].

Основные параметры опытного образца монитора: нижний предел контрольного диапазона концентраций не превышает  $2 \text{ мкг/м}^3$ ; длительность одного замера (пробы или фона) не более 1 мин; длительность паузы между замерами устанавливается автоматически, причем уменьшается с ростом концентрации аэрозолей и наоборот; минимальная и максимальная продолжительность паузы в компьютерной программе устанавливаются оператором; количество замеров без замены (зачистки) электродов источника возбуждения спектра — не менее 200; источник возбуждения спектра — униполярный дуговой разряд (или другой, более совершенный); длина волны регистрируемой линии 313 нм; режим работы — круглосуточный; электропитание — однофазная сеть переменного тока напряжением 220 В; расход воздуха через дуговую камеру 0,5 л/с; экспериментальный монитор установлен в двух передвижных стойках, легко перемещаемых одним оператором внутри рабочих помещений.

Результаты измерений, выраженные в предельных концентрациях, представляются в графическом виде на экране ЭВМ в масштабе реального времени и в виде аналогового токового сигнала на выходном интерфейсе.

**УБАС.** Этот прибор основан на возбуждении ядер бериллия пучком  $\alpha$ -частиц от внешнего Pu-источника и регистрации радиационного излучения возбужденных ядер, предназначается для контроля концентрации аэрозолей бериллия в воздухе рабочих зон и контроля загрязнения поверхности рабочих помещений и оборудования.

Основные характеристики монитора: нижний предел обнаружения бериллия на фильтре 5—10 мкг; интервал между замерами 1—1,5 ч; длительность измерения 0,25 ч; габариты модуля для облучения образца и его обработки 300×350×900 мм; масса 30 кг; габариты модуля автоматического контроля 490×130×350 мм; масса 9 кг; габариты измерительного блока 490×130×350 мм; масса 5 кг; длина ленточного фильтра AFS-2-50 5 м; число замеров без замены ленты 650; продолжительность работы  $\alpha$ -источника до замены 2 года; продолжительность работы оборудования УБАС 10 лет.

## ОБРАЩЕНИЕ С ОТХОДАМИ БЕРИЛЛИЯ

**Предварительная классификация отходов.** При определении возможных источников образования бериллиевых отходов были приняты следующие допущения: изделия, поступающие на промплощадку ТЯУ, имеют высокую степень готовности и практически не требуют дополнительной обработки; отходы, содержащие бериллий, обязательно сортируются по его концентрации и проходят на промплощадке ТЯУ только первичную (предварительную) обработку либо готовятся к захоронению. Окончательная обработка (или захоронение) проводится на специализированных предприятиях, выделение трития из бериллия должно предшествовать переработке отходов и осуществляться на отдельном технологическом участке, жидкие отходы проходят очистку на промплощадке ТЯУ.

Бериллийсодержащие отходы с целью унификации технологии их утилизации могут быть собраны в несколько укрупненных классов и групп по виду отходов, содержанию бериллия и другим признакам. Отходы могут быть первичными (пыль и аэрозоли, демонтируемые и заменяемые элементы конструкции и т.д.), вторичными (фильтры, спецодежда, СИЗ и т.д.), твердыми, жидкими, газообразными, горючими и негорючими, содержащими и не содержащими тритий, неактивированными, слабоактивированными, сильноактивированными.

В табл. 4 представлена принципиальная схема образования бериллиевых отходов [3]. Компактный бериллий и изделия, изготовленные из него, при нормальных условиях и без источника аэрозолей не требуют никаких специальных защитных мер во время хранения. Обычно достаточно использования общей вентиляции, спецодежды и перчаток.

Т а б л и ц а 4. Пути образования бериллиевых отходов

Характер работы	Отходы
Транспортировка изделий на площадку и их хранение	Упаковочные средства, тара, СИЗ, отходы вентиляционных систем, промывочные воды
Подготовка изделий к монтажу и монтаж систем	Пыль, обрезки, стружки, СИЗ, вентиляционные выбросы, промывочные воды, спецодежда, фильтры, инструменты
Рабочие и аварийные режимы при эксплуатации ТЯУ	Пыль, капли металла, фильтры, вентиляционные выбросы, растворы от газоочистки, промывочные воды и растворы, СИЗ, спецодежда, масло, шланги, инструменты
Профилактические работы, восстановительный ремонт	Демонтируемые части дивертора и первой стенки, пыль, промывочные воды, вентиляционные выбросы, шланги, фильтры, СИЗ
Обеззараживание инструментов и оборудования, санитарная обработка	Промывочные воды, шланги, взвеси, фильтры, спецодежда, ливневые и охлаждающие воды
Работа в горячих камерах по обслуживанию и детритизации заменяемых элементов, содержащих бериллий	Пыль, промывные воды, крупные фрагменты реактора, инструмент, спецодежда
Работа вакуумной, вентиляционной и охлаждающей систем	Пыль, фильтры, Ве-содержащий осадок, сточные воды
Очистка поверхностей оборудования	Отходы, зависящие от метода очистки (абразив, сопутствующие воды, спецодежда, СИЗ и т.д.)

**Твердые отходы, активированные и неактивированные.** В эту группу входят отходы с участка механической обработки, систем пыле- и газоочистки, демонтируемые и заменяемые элементы конструкции и т.д. Содержание бериллия в этих отходах может достигать 90—95% мас. На первой стадии переработки следует выделять наиболее богатые по бериллию отходы (покрытие первой стенки, крупную фракцию пыли, стружку), компактировать их и помещать в транспортные контейнеры для отправки на специализированные предприятия. Для исключения пыления сбор и сортировку отходов желательно производить в виде суспензий, но не водных, поскольку мелкодисперсный бериллий активно взаимодействует с водой. Сильноактивированные отходы, непригодные для переработки, следует захоронить или складировать с целью выдержки.

**Жидкие отходы.** Это растворы из систем пылегазоочистки, отмывки помещений и оборудования, санитарно-гигиенической обработки, охлаждающие воды. Их состав и содержание в них бериллия могут сильно различаться. Объемы вод могут быть весьма значительными, поэтому представляется целесообразным создание на промплощадке ТЯУ замкнутого водооборота. Очистка жидких сбросов от бериллия является многоступенчатым процессом. Как правило, на первой стадии проводится реагентная или электрохимическая очистка, при которой основная масса бериллия выделяется в осадок, перерабатываемый затем как твердые отходы. На второй стадии происходит доочистка растворов до санитарных норм с использованием процессов ионного обмена, ионной флотации, осмоса и др.

**Горючие отходы.** В эту группу входят упаковочные материалы, СИЗ, спецодежда, обтирочные материалы, масла, шланги, фильтры и т.п. Возможным способом их утилизации является измельчение и сжигание в специальных печах с переводом бериллия в зольный остаток, который затем перерабатывается как твердые отходы.

**Отходы, образующиеся при перевозке, получении и хранении бериллиевых изделий.** Упаковка бериллиевых изделий, типы транспортных контейнеров и путь транспортировки определяются во время проектирования реактора в соответствии с требованиями страны, где строится установка. После прибытия бериллиевых изделий на площадку они извлекаются из транспортного средства, контейнера и упаковки, которые проверяются на загрязнение бериллием. Если упаковки загрязнены, они собираются и могут быть подвергнуты первичной обработке (мойка, компактирование, сжигание). Промывные воды очищаются от бериллия. Общее решение относительно обращения с этим типом отходов принимается на стадии проектирования после анализа типов изделий из бериллия, экспериментальной проверки технологии компактирования и технологии очистки промывных вод. Оно должно отвечать требованию организации замкнутого водяного цикла на площадке ТЯУ.

**Отходы, образующиеся при подготовке изделий к сборке.** Если подготовка изделий из бериллия к сборке необходима, проводится ряд специальных работ. Отходы и типы загрязнений при этом: пыль бериллия и других бериллийсодержащих материалов, обрезки бериллия и Ве-стружка, отходы процессов сварки и пайки, промывные воды и охлаждающие жидкости. Когда используются электрохимические процессы, дополнительно могут появиться бериллийсодержащие осадки и

растворы электролита. Когда используются высокотемпературные процессы (сварка, пайка, напыление и т.д.), могут появиться источники аэрозолей бериллия, BeO и других материалов, содержащих бериллий.

Вторичными источниками бериллиевых отходов являются инструмент и оборудование, обтирочные материалы, средства индивидуальной защиты, рабочая одежда, фильтры и отходы системы газовой очистки. Все отходы необходимо сортировать по степени загрязнения бериллием, чтобы применить различные методы обработки и утилизации. Очистка инструмента и оборудования, рабочей одежды и обмывочных вод должна проводиться на площадке ТЯУ в режиме замкнутого водного цикла. Данные относительно состава, количества пыли и отходов, а также технологии их переработки будут определяться при рассмотрении проблем подготовки бериллийсодержащих изделий к сборке.

**Отходы, образующиеся при сборке.** К этой категории относятся опилки, пыль и стружка. Их удаление из вакуумной камеры возможно при ее очистке перед пуском реактора и вентиляции во время сборки. Если при сборке используются высокотемпературные процессы, опасность поражения значительно выше, так как могут появиться высокотоксичные бериллиевые аэрозоли. Рабочая одежда, обувь, индивидуальные средства защиты, инструмент, обтирочные средства, обмывочные воды, фильтры являются дополнительными отходами при сборке компонентов реактора.

**Отходы, образующиеся при обслуживании и ремонте.** Во время работы реактора некоторые его компоненты и элементы требуют планового профилактического обслуживания и замены. В этом случае могут быть сформированы два типа отходов: пыль и другие продукты, удаляемые из вакуумной камеры во время работы реактора и собирающиеся в вакуумной системе; отходы, оставшиеся в вакуумной камере и удаляющиеся перед началом работ по обслуживанию.

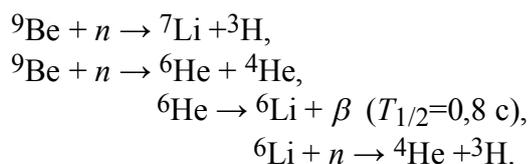
Оба типа бериллиевых отходов могут быть тритированными и активированными. Поэтому, необходимо разработать технологию замены бериллийсодержащих компонентов первой стенки и дивертора, а также сбора и обработки активированной и тритированной бериллиевой пыли. Перед выводом из эксплуатации может быть проведена мокрая очистка поверхности вакуумной камеры абразивом карбида или нитрида бора и ее отмыв. Однако эта технология требует дополнительного испытания. Водная пульпа после очистки поверхности отводится для отстоя и фильтрации. Отложения (в зависимости от содержания бериллия) подвергаются переработке и утилизации подобно твердым отходам. Растворы очищаются вместе с другими жидкими отходами. Накопление трития в бериллии и необходимость его удаления потребуют разработки специальных высокотемпературных методов удаления трития из бериллия, особенно для массивных элементов конструкции, таких, как первая стенка и покрытие дивертора. Разработка процесса детритизации бериллиевой пыли потребует изучения взаимодействия тритированного бериллия с водой и растворами электролитов. Это исследование может внести вклад в развитие технологии очистки инструмента, оборудования, рабочей одежды и средств индивидуальной защиты.

**Отходы от системы газоочистки.** Основная нагрузка при защите персонала станции и окружающей среды от воздействия бериллия ложится на систему газовой очистки воздуха от бериллиевой пыли и аэрозолей. Ожидается, что основная

масса бериллиевых отходов будет накапливаться в этой системе. Такие параметры, как прогнозируемое количество пыли бериллия, которая будет наработана в ТЯУ, размеры частиц пыли, безопасная концентрация пыли, при которой исключаются условия ее взрыва при различных условиях влажности в вакуумной камере, являются весьма ненадежными. Ожидается, что в течение жизни дивертора (3 замены в течение первых 10 лет эксплуатации реактора ИТЭР и 5 замен в течение вторых 10 лет [30]) в вакуумной камере может быть наработано от 250 до 500 кг пыли бериллия. Она попадает в систему газовой очистки в виде частиц различного размера. Пыль может включать композиции типа Cu—Be, Fe—Be, Be-абразив, соединения бериллия с кислородом, азотом, графитом и водородом и, в частности, с тритием. В процессе газовой очистки отходы бериллия нарабатываются в виде порошков, водных суспензий металлического порошка бериллия и его соединений, водных растворов соединений бериллия, промывных вод после очистки оборудования и служебных линий, фильтров, фильтрующих полотен, т.е. как твердые и жидкие отходы.

Очистка газов и вентиляционных выбросов ТЯУ будет включать различные технологические процессы и потребует разработки различного оборудования. Возможно, потребуется система деионизации очищаемых газов вместе с распыленными частями фильтрующей аппаратуры различного типа (оконечных фильтров, электрических фильтров). При этом необходимо принять во внимание радиоактивность бериллиевой пыли и аэрозолей, что может потребовать проектирования отдельной технологической цепочки для газоочистки с собственной системой сбора отходов, удаления, переработки, хранения и утилизации. Во время проектирования ТЯУ потребуется изучение характеристик бериллиевой пыли, которая будет нарабатываться в ТЯУ, и пределов безопасной концентрации бериллия (для различных условий влажности), предотвращающей условия взрыва.

**Бериллий, содержащий тритий.** Бериллиевое защитное покрытие первой стенки ТЯУ будет содержать тритий. Его накопление определяется соосаждением, распылением, имплантацией, диффузией, захватом в ловушках и образованием в результате ядерных реакций



Первая из этих реакций имеет энергетический порог около 12 МэВ и является доминирующей в условиях термоядерного реактора. Вторая имеет энергетический порог 600 кэВ и сильный резонанс при 3 МэВ.

В результате ядерных реакций при флюенсе 0,5 МВт·год/м<sup>2</sup> (20 лет работы) образуется 115 г трития. В компактном бериллии при рабочей температуре этот тритий удерживается в бериллии, если газовое распухание бериллия (свеллинг) не будет очень сильным. За 20 лет работы реактора 37% трития распадется. Соответственно после 12 000 импульсов по 440 с (0,1 МВт·год/м<sup>2</sup>) образуется 23 г трития [29].

В результате имплантации, диффузии и захвата в ловушках без учета распада за 12 000 импульсов накопится 29 г трития [31]. Скорость соосаждения трития в реакторе ИТЭР < 0,5 г/имп. [29].

Согласно проекту реактора ИТЭР, когда суммарное количество трития в обращенных к плазме компонентах достигнет 330 г, необходимо его удаление. Правда, ожидается, что большая часть этого количества будет приходиться на покрытие из углеродно-волоконистого композита [29].

Существенное количество трития в бериллии и технологическая трудность десорбции трития из бериллия (наиболее вероятно, при высоких температурах) диктуют необходимость в специальном участке для детритизации защитного покрытия первой стенки и бериллиевых отходов. Например, демонтированное бериллиевое защитное покрытие или элементы первой стенки могут быть помещены в воздухо-непроницаемые контейнеры и транспортироваться к участку детритизации. Участок детритизации должен иметь печь для десорбции трития при температуре 800—900 °С и помещения для временного хранения бериллийсодержащих элементов, для их обмыва в контейнерах и последующей перезагрузки в другие контейнеры с заваренными крышками для длительного хранения. Что касается пыли, по-видимому, необходимо изучить взаимодействие тритированного бериллия с водой и с растворами электролита, чтобы разработать процесс детритизации. Это может оказаться полезным для создания технологии дезактивации инструмента, оборудования, рабочей одежды и СИЗ.

**Радиоактивный бериллий.** Бериллиевые отходы на площадке ТЯУ будут как нерадиоактивными (наработанными до облучения в реакторе), так и радиоактивными. При работе реактора на D—D- и D—T-плазме бериллий в первой стенке активируется. Его собственная  $\gamma$ -активность невелика уже в первые сутки после прекращения облучения. Во время работы реактора и сразу после его остановки  $\gamma$ -активность примесей бериллия (кроме кислорода) также относительно мала. Она почти на два порядка величины меньше  $\beta$ -активности изотопов  ${}^6\text{He}$  и  ${}^{16}\text{N}$ , наработанных на бериллии, например, в результате ядерной реакции  ${}^9\text{Be}(n, \alpha){}^6\text{He} \rightarrow {}^6\text{Li}$ , и частично сопутствующем ему кислороду [3]. Энергия  $\beta$ -распада  ${}^{10}\text{Be}$  достаточно высока, например, по отношению к тритию. Поэтому в случае попадания в организм человека радиоактивной бериллиевой пыли кроме токсической опасности дополнительно возникает радиационная.

Вскоре после прекращения облучения  $\beta$ -активность определяется изотопами  ${}^{24}\text{Na}$  и  ${}^{48}\text{Sc}$ . Однако уже через месяц и в дальнейший период, сопоставимый с временем эксплуатации ТЯУ (10—20 лет), основным изотопом, формирующим радиационную дозу, является  ${}^{60}\text{Co}$  и отчасти  ${}^{58}\text{Co}$ ,  ${}^{48}\text{Sc}$ ,  ${}^{54}\text{Mn}$ ,  ${}^{55}\text{Fe}$ . Остаточная радиационная доза от этих изотопов довольно велика. При выдержке после остановки более 50 лет  $\gamma$ -активность бериллия полностью определяет  ${}^{60}\text{Co}$ , а после 100-летней выдержки — изотопы  ${}^{94}\text{Nb}$  и  ${}^{108\text{m}}\text{Ag}$ . Измерения удельной активности и мощности контактной дозы бериллия, используемого как материал отражателя в реакторах деления, подтверждают расчетные результаты.

Максимальная мощность контактной дозы, допустимая для полудистанционного обслуживания облученных бериллиевых компонентов ТЯУ, согласно [32], составляет 10 мЗв/ч. Для достижения такой контактной дозы требуется приблизительно 50-летняя выдержка реактора. Максимально допустимая доза для персонала (20 мЗв/год = 10 мкЗв/ч [4]), при которой возможны ручные операции с радиоактивными материалами, практически недостижима. Примесными элементами, по-

рождающими  $\gamma$ -активность бериллия в период до 20 лет по порядку убывания вклада в  $\gamma$ -дозу, являются Co, Ni, Cu, Ag, Nb, Fe, Sm, Na. Переработка бериллия с целью его повторного использования в течение примерно 30 лет после облучения требует, чтобы концентрация этих элементов была уменьшена примерно на порядок величины, а серебра — в 5 раз. В этом случае контактная доза от облученного бериллия уменьшится на порядок величины. Уровень мощности контактной дозы после 20-летней выдержки составит 50 мЗв/ч и после 50-летней — 1 мЗв/ч. Радиоактивные отходы бериллия требуют детритизации перед помещением в промежуточное хранилище или захоронением.

Удельная активность и мощность контактной дозы российского реакторного бериллия ТШГ-56 и коммерческого бериллия США S-65 отличаются незначительно. Сравнение их активационных характеристик показало, что в период до 10 лет после отключения реактора  $\gamma$ -доза ТШГ-56 выше на 18%, чем таковая для S-65. Это связано с разницей в концентрации кобальта и некоторых других элементов. Однако для более продолжительных периодов выдержки  $\gamma$ -доза, определяющая возможность захоронения, приблизительно в 6 раз меньше для ТШГ-56 из-за пониженной концентрации в нем ниобия и серебра.

**Захоронение бериллиевых отходов.** Подготовка к захоронению бериллиевых отходов, не подлежащих утилизации, должна проводиться на промплощадке ТЯУ. Активированное, загрязненное тритием и бериллием малогабаритное оборудование захоранивается в каньоны с биологической защитой, закрываемые люками. Они должны иметь принудительную вентиляцию для снятия тепла и конструкцию, исключающую выход трития в помещение хранилища. Оборудование следует помещать в каньоны в герметичных контейнерах с приваренными крышками. Крупногабаритное — в специальные отсеки с принудительной вентиляцией. Каньоны и отсеки должны быть облицованы коррозионно-стойкой сталью и иметь плотные люки и двери. Необходим постоянный дозиметрический контроль атмосферы отсеков и каньонов. Здание хранилища требует периодического обслуживания без постоянного пребывания в нем обслуживающего персонала. Отходы, содержащие бериллий, включая вторичные отходы из системы газоочистки, должны транспортироваться для переработки (за площадкой ТЯУ) и извлечения бериллия в твердой или жидкой форме. На площадке ТЯУ отходы предварительно сортируются в зависимости от содержания в них бериллия: богатые бериллием направляются на предприятия, производящие бериллий, бедные — подвергаются предварительной обработке и компактированию, а затем направляются на специализированные бериллиевые предприятия. Содержащие бериллий отходы, которые не могут быть использованы, подготавливаются на площадке ТЯУ для захоронения. Согласно предварительному анализу, радиоактивные отходы бериллия, по-видимому, можно захоранивать вблизи поверхности земли как низкоактивные [6] после их детритизации. Горючие твердые отходы сжигаются в специальных печах на площадке ТЯУ. Газовые выбросы печей поступают в общие системы газоочистки. Жидкие отходы подвергаются очистке на площадке ТЯУ по схеме закрытого водяного цикла. Очищенные воды направляются в замкнутую водяную систему ТЯУ. Отходы, оставшиеся после очистки, перерабатываются и утилизируются (в зависимости от содержания в них бериллия) по схеме переработки твердых отходов.

## ВЫВОДЫ

Бериллий относится к чрезвычайно опасным веществам. Он токсичен. Под облучением в термоядерном реакторе бериллий становится радиоактивным в основном за счет примесей. В случае аварийных ситуаций взаимодействие бериллия с водой вызывает значительный выход водорода с возможными тяжелыми последствиями.

Наибольшую опасность для персонала и окружающей среды представляет образование, утечка и распространение токсичной и радиоактивной бериллиевой пыли.

Максимально допустимая концентрация бериллия в воздухе производственных помещений (рабочих зон) практически во всех странах принята на уровне 1—2 мкг/м<sup>3</sup>. Допустимый предел концентрации бериллия для воздуха жилых зон 0,01 мкг/м<sup>3</sup>.

Для гарантии безопасности персонала, работающего с бериллием, сформулированы и утверждены правила, регулирующие проектирование и эксплуатацию соответствующих предприятий, а также определен порядок работы с бериллием и его соединениями. Это, в частности, требования к зонированию помещений, к системам их вентиляции и газоочистки, к мерам, ограничивающим распространение пыли и аэрозолей бериллия в пределах зданий и промплощадки предприятий.

Концентрация бериллия в воздухе и воде так же, как загрязнение им поверхностей, должна находиться под постоянным контролем. Методика и приборы для контроля загрязнений бериллием в настоящее время доступны и отвечают предъявляемым требованиям. Единственным исключением является отсутствие современной аппаратуры для измерений концентрации бериллия в реальном масштабе времени в воздухе и вентиляционных выбросах в течение приблизительно 1 мин.

Отходы бериллия, образующиеся на начальной стадии обращения с ним (транспортировка, хранение, сборка), будут нерадиоактивны. Бериллий в термоядерном реакторе, проработавшем на D—D- и D—T-топливе, а также пыль и аэрозоли, образующиеся на этой стадии работы, будут радиоактивными и тритированными. Полное содержание трития в бериллии первой стенки ИТЭР оценивается в пределах 20—250 г.

Радиоактивные отходы бериллия перед размещением в промежуточном хранилище или захоронением необходимо детритизировать. Существуют два основных подхода к технологии детритизации: нагревание бериллия в вакуумных печах и химическая детритизация в растворах щелочей или кислот. Оба подхода требуют экспериментальных исследований.

В периоды времени после отключения реактора, сопоставимые с продолжительностью его работы (10—20 лет), мощность радиационной контактной дозы бериллия относительно высока. Максимальное ее значение, допустимое для полудистанционной работы с облученными компонентами бериллия (10 мЗв/ч [32]), достигается после выдержки бериллия в течение приблизительно 50 лет. Дозы, допустимые для ручной работы с облученными бериллиевыми компонентами реактора (ниже 20 мЗв/год = 10 мкЗв/ч [4]), из-за примесей в бериллии, вероятно, не могут быть достигнуты в обозримом будущем вообще.

Российские и американские марки бериллия очень похожи с точки зрения содержания в них примесей. Однако небольшие их различия могут оказаться решающими для возможности захоранивать облученный бериллий вблизи поверхности земли. При выборе марки бериллия необходимо принимать во внимание требования к содержанию в нем примесей.

Для предотвращения аварийных ситуаций с взрывом пыли, которая будет образовываться в ТЯУ, требуется знать характеристики этой пыли и пределы безопасности (для различных условий по влажности).

Авторы выражают свою искреннюю благодарность Д.А. Давыдову за ценные замечания. Работа была выполнена при финансовой поддержке Минатома.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Санитарные** правила проектирования и эксплуатации предприятий по получению бериллия и его соединений. 2-я редакция. — М.: Изд-во Минсредмаша, 1976.
2. **Правила** техники безопасности и производственной санитарии в производстве бериллия и его соединений. — М.: Изд-во Минсредмаша, 1976.
3. **Kurbatov D.K., Kolbasov B.N., Mikhajlov Yu.M., Khripunov V.I.** Initial Beryllium Waste Management Criteria and Assessment. Report of RRC Kurchatov Institute, ITER-RF-94-RRCKI-NFI-92/163. — М., 1996.
4. **Technical** Basis for the ITER Final Design Report. G A0 FDR 1 01-03-05 W0.2. — ITER Garching Joint Work Site, 2001.
5. **Safety** Analysis Data List (SADL-3). Ed. by H.-W. Bartels, L. Topilski and T. Honda. G 81 RI 5 00-02-29. — ITER Garching Joint Work Site, 2000.
6. **Санитарные** правила обращения с радиоактивными отходами (СПОРО-85).— М., 1986.
7. **ITER** Design Description Document. G A0 FDR 1 00-11-16 W0.1 ITER Garching Joint Work Site, 2000.
8. **Topilski L.N.** Erosion rate and dust production in ITER. —In: Proc. of the ITER Dust Coordination Meeting, San Diego, June 13, 1996.
9. **Biryukov A.Yu., Brikov V.A., Bytsky V.D. et al.** Dust Assessment, ITER Final Report, Efremov Institute, August 1999.
10. **Kurbatov D.K., Kolbasov B.N., Sergeev E.B. et al.** Provision for Safety at Handling Beryllium and its Compounds as Protective Coating upon ITER Plasma Facing Components. Report of RRC Kurchatov Institute, ITER-RF-93-RRCKI-Saf.1. — М., 1994.
11. **Бериллий** — токсикология, гигиена, профилактика и лечение бериллиевых поражений. Справочник. Под ред. А.И. Бурназяна. — М.: Атомиздат, 1980.
12. **Давыдов Д.А., Горохов В.А., Капышев В.К., Сорокин С.И.** Изучение химического взаимодействия компактного и пористого бериллия с воздухом и паром с точки зрения безопасности ИТЭР. — ВАНТ. Сер. Материаловедение и новые материалы, 1995, вып. 1(52), с. 74—81.
13. **Kolbasov B.N.** Fusion safety studies in Russia in 1996. — J. Fus. Energy, 1997, vol. 16, p. 285—290.
14. **Davydov D.A., Kononov Yu.V. et al.** Construction of a Mathematical Model for Chemical Interaction of Beryllium Powders with Air in Temperature Range 50–1000 °C. ITER-RF-97-BIIM-Saf-1. Report of A.A. Bochvar Institute of Inorganic Materials.— М., 1997.
15. **Kolbasov B.N., Biryukov A.Yu., Davydov D.A. et al.** Fusion safety studies in Russia from 1995 to 2000. — Fus. Eng-ing and Design, 2001, vol. 54, p. 451—464.
16. **Anderl R.A., Pawelko R.J., Smolik G.R., Scaffidi-Argentina F., Davydov D.** Steam chemical reactivity of pebbles and Be powder. — Fus. Technology, 2000, vol. 38, p. 283—289.
17. **Davydov D.A., Chekhatov G.M., Levin V.B., Sorokin S.I.** Beryllium-Steam Chemical Interaction Study from the Viewpoint of ITER Safety. ITER Final Report. G 81 TT 06 FR (T503). Part II. RF Home Team. A.A. Bochvar VNIINM, July 2001.

18. **Davydov D.A., Biryukov A.Yu., Chekhlatov G.M.** Dust in Cavity Reactivity Measurements. ITER Final Report. G 81 TT 09 FR (T535) SSC RF-VNIINM. May 2001.
19. **Ковязин А.Г., Урих А.А., Ковязина Л.А.** Некоторые медицинские аспекты производства бериллия на Ульбинском металлургическом заводе. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2002, вып. 3—4, с. 165—169.
20. **ГОСТ 12.1 005–76.** Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования.— М.: 1976.
21. **Предельно** допустимые концентрации бериллия в атмосферном воздухе. № 437/3–76. — М.: Изд-во Минсредмаша, 1976.
22. **Правила** охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами. Министерство мелиорации и водного хозяйства. Министерство рыбного хозяйства и главный государственный санитарный врач. М., 16.05.74.
23. **Временные** нормативы на загрязнение кожных покровов соединениями бериллия. № 442/3—76.
24. **Нормы** на предельно допустимые уровни загрязнения производственных поверхностей бериллием. № 282/3L–74. — М.: Изд-во Минсредмаша, 1974.
25. **Нормы** на загрязнения спецодежды бериллием и его соединениями. № 159/3–72. — М.: Изд-во Минсредмаша, 1972.
26. **Допустимые** уровни предельных загрязнений бериллием для измельченного и неизмельченного металлолома. — М.: Изд-во Минсредмаша, 1972.
27. **Битколов Н.З., Ковыгин Г.Ф., Крупкин А.Б., Вдовин Е.Ю.** Безопасность при работах с бериллием и его соединениями. Отчет НИИ промышленной и морской медицины. С.-Пб. 1996.
28. **Code of Practice for the Safe Use of Beryllium on JET.** 1989.
29. **Generic Site Safety Report (GSSR).** Vol. III. Radiological and Energy Source Terms. G 84 RI 3 00-12-14. 14 January 2001.
30. **Generic Site Safety Report (GSSR).** Vol. V. Radioactive Materials, Decommissioning and Waste. 25 January 2001.
31. **Мартыненко Ю.В., Московкин П.Г., Колбасов Б.Н.** Накопление и проникновение трития в первой стенке токамака ИТЭР в режиме со срывами. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2001, вып. 3, с. 65—73.
32. **Harries D.R. et al.** Summary. — In: Proc. of the IAEA Workshop on Low Activation Materials. Culham. UK (April 1991), vol. 1, p. 8—12.

Статья поступила в редакцию 16 августа 2003 г.  
Вопросы атомной науки и техники.  
Сер. Термоядерный синтез, 2003, вып. 3, с. 32—60.

УДК 541.128.+621.039.6

## УСКОРЕННАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ $\text{CH}_3$ -РАДИКАЛОВ НА НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

*А.Е. Городецкий, Р.Х. Залавутдинов, А.П. Захаров, С.П. Внуков,  
И.Г. Варшавская, А.Н. Маханьков, И.В. Мазуль*

С использованием струевой техники обнаружено, что при 380—480 К  $\text{CH}_3$ -радикалы полностью выводятся из откачиваемой смеси ( $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_2/\text{H}_2/\text{H}/\text{CH}_3$ ) за несколько сотен соударений с поверхностью стенки из нержавеющей стали. Газ становится химически инертным, и осаждения углеводородов при 300 К не происходит. Появляющиеся в реакциях рекомбинации на нержавеющей стали тяжелые ненасыщенные углеводороды при ~150 К и парциальных давлениях 0,01—0,1 Па конденсируются и создают жидкие пленки, которые под влиянием радикалов или возбужденных молекул полимеризуются с образованием осадка, устойчивого при 300 К. Отделить ненасыщенные углеводороды от отработанной D/T/He-смеси можно с помощью холодной ловушки перед крионасосами.