

УДК 621.039.6

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ И ВЗРЫВА ГРЕМУЧЕЙ СМЕСИ ПОСЛЕ АВАРИИ С ИСТЕЧЕНИЕМ ВОДЫ И ПРОРЫВОМ ВОЗДУХА В ВАКУУМНУЮ КАМЕРУ ДЕМО-ТИН

*А.Ю. Пашков**НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

Авария с возможным образованием гремучей смеси (ГС) после истечения воды и прорыва воздуха в вакуумную камеру (ВК) демонстрационного термоядерного источника нейтронов (ДЕМО-ТИН) рассматривается как одна из наиболее тяжёлых. Образование водорода происходит при взаимодействии пара с бериллиевой облицовкой компонентов, обращённых к плазме. Рассмотрена последовательность событий при различных вариантах протекания аварии. Изложены основы протекающих при этом физико-химических процессов, описана методика расчётов. Сделана оценка количества образующегося при паробериллиевой реакции водорода. Выполнен расчёт параметров образующейся в ВК парогазовой смеси. Сделан вывод, что возможен взрыв ГС как в ВК, так и в реакторном зале. По результатам моделирования аварии даны рекомендации по минимизации её последствий и предотвращению взрыва ГС.

Ключевые слова: ДЕМО-ТИН, вакуумная камера, аварии с истечением воды и прорывом воздуха, паробериллиевая реакция, образование гремучей смеси, возможность взрыва.

ASSESSMENT OF OXYHYDROGEN GENERATION POSSIBILITY AND ITS EXPLOSION AFTER ACCIDENT WITH WATER EFFLUENCE AND THE AIR INGRESS INTO DEMO-FNS VACUUM VESSEL

*A.Yu. Pashkov**NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

The accident with oxyhydrogen generation possibility after the water effluence and the air ingress into the demonstration fusion neutron source (DEMO-FNS) vacuum vessel (VV) is considered as one of the most dangerous events. The generation of hydrogen is occurred at the steam interaction with the beryllium plasma facing components. Different variants of the accident events sequence were considered. The principles of physico chemical processes were developed. The computation - technique - is described. The assessment of the hydrogen amount generated by steam-beryllium reaction was done. The parameters of steam-gas mixture formed in the VV were calculated. The conditions of the oxyhydrogen explosion were reetermined. As a result of the accident simulation, recommendations on the consequences minimization and its mitigation measures were given.

Key words: DEMO-FNS, the accident with water effluence and the air ingress, calculation method, steam-beryllium reaction, oxyhydrogen generation, the explosion possibility.

DOI: 10.21517/0202-3822-2017-40-2-78-91

ВВЕДЕНИЕ

Аварии с возможным образованием гремучей смеси (ГС) после истечения воды и прорыва воздуха в вакуумную камеру (ВК) установок токамак (в частности, ИТЭР) неоднократно рассматривались в ходе работ по обеспечению её безопасности и определению максимальной проектной аварии. Экспериментальное моделирование подобной аварии выполнено, например, в [1]. Истечение воды в ВК происходит как при односторонней разгерметизации (разрыве) любой системы водяного охлаждения конструкций внутри неё, так и при её двусторонней разгерметизации (разрыве). В последнем случае, если один из разрывов системы охлаждения находится в воздухе, происходят прорыв воздуха в ВК и образование ГС.

В результате рассмотрения подобных аварий определены их возможные последствия и сформулированы ограничения по допустимому количеству в ВК водорода, воздуха и металлической пыли [2]. Авария с образованием ГС представляется одной из самых тяжёлых в ИТЭР. Взрыв ГС, возможно, будет являться максимальной проектной аварией.

Следует отметить, что в [1] проводилось моделирование аварии в установке с характеристиками, значительно отличающимися от характеристик установки ДЕМО-ТИН. Не были определены важные параметры в ВК, например, давление в ней после аварии. Не исследован случай с прорывом воздуха и образованием ГС в ВК.

Для успешного проектирования и по возможности предотвращения тяжёлых аварий уже на этой стадии необходимо исследование подобной аварии при параметрах, характерных для установки ДЕМО-ТИН [3]. В связи с тем, что конструкция ДЕМО-ТИН окончательно не определена, пришлось принимать допущения о параметрах его отдельных систем и условиях протекания аварии.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ

Основные параметры установки ДЕМО-ТИН приведены в [4], её общий вид показан на рис. 1. Отношение большой/малый радиус плазмы $R/a = 3,25/1$. Непосредственно с водяным паром и воздухом после аварии в ВК будут соприкасаться ПС и дивертор. Дальнейшие оценки сделаны в предположении, что они облицованы бериллием. За исходные данные для расчёта примем следующие значения:

Объём внутренней полости ВК, куда происходит истечение воды и прорыв воздуха после аварии $V_{ВК}$, м ³ . . .	140—400 ¹	
Площадь поверхности ПС, облицованной бериллием, $S_{ПС}$, м ² . . .	120 ²	
Средняя толщина бериллиевой облицовки ПС, м . . .	0,0045	
Объём бериллиевой облицовки ПС, м ³ . . .	0,54	
Масса бериллиевой облицовки ПС $M_{Ве ПС}$, кг (кг-моль) . . .	972 (108)	
Рабочая температура бериллиевой облицовки ПС, °С . . .	200—300	
Температура воды в системе охлаждения ПС и дивертора, °С . . .		100—150
Площадь поверхности дивертора, облицованной бериллием $S_{див}$, м ² . . .		100
Средняя толщина бериллиевой облицовки дивертора, м . . .		0,005
Объём бериллиевой облицовки дивертора, м ³ . . .		0,5
Рабочая температура бериллиевой облицовки дивертора, °С . . .		400—600
Масса бериллиевой облицовки дивертора $M_{Ве див}$, кг (кг-атом) . . .		900 (100)
Полная масса бериллия в облицовке $M_{Ве обл}$, кг (кг-атом) . . .		1872 (208)

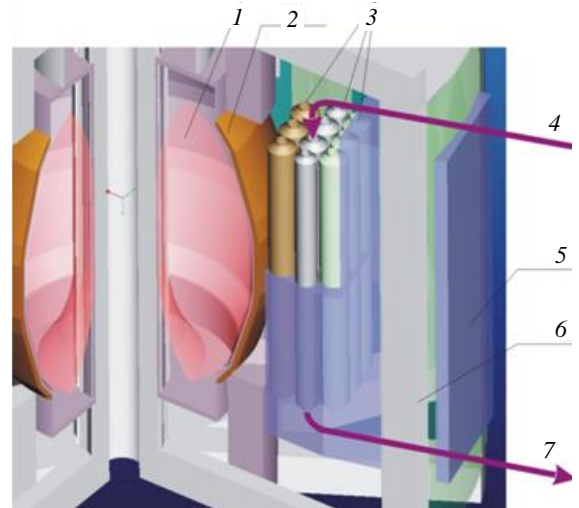


Рис. 1. Общий вид установки ТИН и её blanket: 1 — плазма в разрядной камере; 2 — первая стенка; 3 — модули blanket; 4 — подвод теплоносителя; 5 — наружный корпус blanket; 6 — катушка магнитной системы; 7 — отвод теплоносителя

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА ГРЕМУЧЕЙ СМЕСИ

ГС называется смесь газообразных водорода и кислорода или водорода и воздуха, возможно содержание в ней примесей других газов и паров (например, метана, аргона, водяного пара) [5].

Существуют две принципиально различные формы взаимодействия водорода и кислорода в ГС — горение и взрыв. Горение (или дефлаграция) протекает с ограниченной скоростью, которая всегда меньше скорости звука в смеси. Горение ГС при определённых условиях переходит во взрыв. Скорость взрыва ГС больше скорости звука в ней. Различают детонационный и дефлаграционный взрывы. Любой взрыв сопровождается образованием ударных волн, которые могут привести к разрушительным последствиям.

При определённой концентрации кислорода или воздуха в смеси ГС не горит, становится пожаро- и взрывобезопасной. Различают нижний и верхний концентрационные пределы (КП) распространения

¹ Точное значение объёма внутренней полости ВК невозможно указать. Объём, ограниченный ПС и дивертором, известен. Но следует отметить, что к внутренней полости ВК примыкают системы подачи топлива, вакуумной откачки, нагрева и поддержания тока, диагностики и многие другие. Их вакуумные объёмы примыкают к внутреннему объёму ВК и составляют с ним одно целое. В случае возникновения аварии с истечением воды в ВК часть из этих объёмов будет отсечена задвижками и заслонками. Но время их закрытия составляет конечную величину, а часть из них может не сработать. Поэтому невозможно точно определить объём, который при аварии будет заполняться паром и продуктами его реакции с конструкционными материалами, а возможно дать только его оценочные значения.

² Площадь поверхности ПС, облицованной бериллием, меньше суммарной площади ПС (часть её поверхности будет занята различными проходками систем подачи топлива, диагностики, нагрева и поддержания тока и т.п.).

пламени. КП горения и детонации водорода (в объёмных процентах), необходимые для горения ГС при её температуре 20 °С, приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Концентрационные пределы горения и детонации водорода (в объёмных процентах) при температуре 20 °С

КП	Смесь воздуха с водородом, %	Смесь кислорода с водородом, %
Нижний КП горения	4	4
Стехиометрическая смесь	30	—
Верхний КП горения	75	96
Нижний КП детонации	18	15
Верхний КП детонации	74	94

Область с концентрацией водорода выше нижнего КП и ниже верхнего КП называется областью горючести.

Для того чтобы ГС загорелась, её нужно нагреть до определённой температуры. По способу возбуждения реакции горения различают самовоспламенение и зажигание. Минимальная температура T_v , необходимая для самовоспламенения, — это температура, при которой тепловыделение за счёт химических реакций в ГС превышает потери тепла в окружающую среду, она находится в узких пределах и для смеси водорода с воздухом составляет ~580—590 °С.

В большинстве случаев горение ГС инициируется не путём самовоспламенения, а с помощью зажигания раскалённым предметом, открытым огнём или электрической искрой. Повышение температуры смеси всегда приводит к расширению области горючести [6].

Поражающие факторы взрыва ГС (давление во взрывной волне и её импульс) зависят от энергии, выделяющейся при взрыве. Энергия взрыва, в свою очередь, зависит от тротилового эквивалента ГС. Тротильный эквивалент — масса взрывчатого вещества (тротила), при взрыве которой выделяется энергия, равная энергии рассматриваемого взрыва ГС. Различают тротильный эквивалент взрыва по давлению и импульсу. Тротильный эквивалент детонационного взрыва по давлению не является постоянной величиной и возрастает с удалением от источника взрыва.

При взрыве ГС, содержащей 1 кг водорода (при условии, что водород прореагирует весь), выделяется энергия $1,2 \cdot 10^8$ Дж. При взрыве 1 кг тротила выделяется энергия $4,2 \cdot 10^6$ Дж, т.е. в 28,5 раза меньше. Если считать тротильный эквивалент зависящим только от энергии взрыва, то по своей энергии взрыв ГС, содержащей 1 кг водорода, соответствует взрыву 28,5 кг тротила.

Существуют два основных способа подавления горения в ГС и перевода её в безопасное состояние.

Первым, наиболее эффективным способом подавления горения ГС является ввод в неё ингибиторов — химических веществ, подавляющих или замедляющих скорость элементарных реакций зарождения и продолжения цепной химической реакции (в случае гремучей смеси это элементарные реакции с участием радикалов О, ОН, Н, НО₂).

Вторым, менее эффективным способом является подача в ГС негорючего разбавителя (например, азота, углекислого газа, водяного пара). Для надёжного подавления горения и распространения пламени в ГС требуется концентрация разбавителя более 60% по объёму.

ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ПОСТУПЛЕНИЯ ВОДОРОДА И КИСЛОРОДА В ВАКУУМНУЮ КАМЕРУ

Возможными путями поступления водорода в ВК представляются следующие.

1. Химическое взаимодействие истекающей при аварии в ВК воды и образовавшегося из неё пара с бериллием и его пылью с генерацией водорода и образованием окиси бериллия ВеО.
2. Термическая диссоциация пара на водород и кислород при высокой температуре [7].
3. Отепление крионасосов и криопанелей в смежных системах и поступление в ВК всех намоороженных на них изотопов водорода.

Оценка количества водорода в крионасосах системы откачки и криопанелях системы нейтральной инъекции установки ДЕМО-ТИН сделана в [8]. Общее максимальное количество трития, осаждённого из топливной смеси, в крионасосах и криопанелях составит $M_T = 0,5 \text{ кг} = 83,3 \text{ моль}$. Так как топливная смесь состоит из равного количества атомов дейтерия и трития (с учётом того, что атом дейтерия

в 1,5 раза легче атома трития), то масса дейтерия составит $M_D = 0,333 \text{ кг} = 83,3 \text{ моль}$. Суммарное количество дейтерия и трития, т.е. водорода в крионасосах и криопанелях, составит $M_{\text{H крио}} = M_T + M_D = 0,833 \text{ кг}$.

Считаем, что при аварии с истечением воды в ВК крионасосы и криопанели отеплятся практически мгновенно и весь водород с них поступит в объём ВК, создав при этом парциальное давление, равное сумме парциальных давлений дейтерия и трития $P_{\text{H крио}} = P_T + P_D$.

4. Выделение изотопов водорода, адсорбированных в компонентах, обращённых к плазме.

5. Выделение из теплоносителя (воды) водорода, образовавшегося путём её радиолиза [9, 10].

6. Массовый выброс дейтерия и трития из системы подачи топлива, в которой имеется запас этих изотопов. Количественные оценки можно будет сделать после уточнения параметров системы подачи топлива.

Рассмотрение всех, какие представляются возможными, путей поступления в ВК водорода приводит к выводу, что основным источником водорода в ВК является процесс взаимодействия бериллия с паром. Значительное количество дейтерия и трития, которое необходимо учитывать, поступает в ВК при отоплении крионасосов и криопанелей. Остальные пути представляются малозначимыми и не приводят к поступлению в ВК значительного количества водорода.

Возможными путями поступления кислорода в ВК представляются следующие.

1. Авария с двусторонней разгерметизацией контура циркуляции любой системы водяного охлаждения (одновременный разрыв за пределами ВК, в воздушной атмосфере и внутри неё, в вакууме), что приведёт к попаданию в ВК воздуха. Возможна также двусторонняя разгерметизация любой системы, граничащей одновременно с атмосферой и ВК.

2. Термическая диссоциация пара.

3. Выделение кислорода из образовавшейся окиси бериллия.

4. Выделение из воды кислорода, образовавшегося путём её радиолиза.

Основным путём поступления кислорода в ВК представляется сообщение её с атмосферой и прорыв в неё воздуха. Вопросы термической диссоциации пара и радиолиза воды рассмотрены ранее — они не приводят к поступлению в ВК значительных количеств кислорода. Окись бериллия при ожидаемых в ВК температурах является стойкой и не разлагается с выделением кислорода.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ АВАРИИ С ИСТЕЧЕНИЕМ ВОДЫ В ВАКУУМНУЮ КАМЕРУ

Оценка количества воды, поступающей в ВК при односторонней разгерметизации системы охлаждения. Расход воды при истечении её из системы охлаждения будет зависеть от площади отверстия, через которое она истекает, от формы отверстия, давления воды, времени после начала аварии и других факторов и не может быть точно определён, а может быть лишь задан. Для оценки процессов при такой аварии рассмотрим несколько вариантов. В первом варианте расход воды $G_{\text{воды}}$ в ВК будет минимальным 0,1 кг/с, во втором средним 1 кг/с, в третьем максимальным 10 кг/с. В [11] сделана оценка тепловой мощности одной секции ПС для одного из вариантов ДЕМО-ТИН и требуемого расхода воды на её охлаждение. Для охлаждения одной секции ПС площадью 3—4 м² потребуется расход воды 7—10 кг/с. Это делает возможными принятые $G_{\text{воды}}$ в ВК при аварии. Масса воды в одной секции ПС ~18—24 кг, во всём контуре циркуляции значительно больше, что делает возможным длительное истечение воды в ВК. Суммарное количество воды, поступившей в ВК (в предположении постоянства расхода):

$$M_{\text{воды}} = G_{\text{воды}} t, \quad (1)$$

где t — время после начала аварии, с.

Физические основы образования водяного пара в вакууме. Вскипание и испарение воды в ВК будут происходить за счёт двух механизмов: кипения воды в вакууме и кипения воды на горячих поверхностях ПС и дивертора. При попадании воды с температурой более 100 °С в вакуум произойдёт её мгновенное вскипание за счёт внутренней тепловой энергии. При существующем соотношении температуры воды и начального давления в ВК она может существовать только в виде пара. Следовательно, количество пара в ВК $M_{\text{пара}}$ равно количеству поступившей в неё воды.

Оценка количества бериллиевой пыли в ВК и её характеристик. Оценка количества бериллиевой пыли в ВК ИТЭР сделана в [12], в ВК ДЕМО-ТИН — в [13]. Эти оценки показывают, что количество образующейся в процессе эксплуатации бериллиевой пыли $M_{\text{Ве пыл}}$ велико и может составить сотни килограммов и даже несколько тонн. Такое количество пыли неприемлемо по соображениям безопасности, и, следовательно, необходимо ещё на стадии проектирования ДЕМО-ТИН ограничить допустимое количество пыли в его ВК. Сделаем предположение, что максимальное количество бериллиевой пыли в ВК $M_{\text{Ве пыл}} = 20$ кг. Средняя плотность бериллиевой пыли по [14] $\rho_{\text{пыли}} \sim 800$ кг/м³, занимаемый ею объём $V_{\text{пыли}} = M_{\text{Ве пыл}}/\rho_{\text{пыли}} = 2,5 \cdot 10^{-2}$ м³. Предполагаемая площадь поверхности, покрытой пылью, $S_{\text{пыли}} \sim 25$ м². В таком случае толщина слоя пыли $\Delta_{\text{пыли}} = V_{\text{пыли}}/S_{\text{пыли}} = 10^{-3}$ м. Согласно [15] в этом случае процесс взаимодействия пыли с паром подобен процессу взаимодействия с паром твёрдого бериллия с высокой пористостью. Только в случае, когда $\Delta_{\text{пыли}}$ имеет толщину не более нескольких десятков мкм, реализуется модель взаимодействия пара с пылью, а не с твёрдой поверхностью. Суммарная масса бериллия в ВК составит $M_{\text{Ве ВК}} = M_{\text{Ве обл}} + M_{\text{Ве пыл}} = 1992$ кг.

Физико-химические основы взаимодействия бериллия с паром. Химическая реакция взаимодействия бериллия с паром является экзотермической и описывается формулой



где $Q_{\text{Ве}} = 370$ кДж/(моль Ве) или 41 МДж/(кг Ве) — теплота реакции бериллия с паром. Реакция (2) является самоподдерживающейся и в замкнутом объёме протекает до тех пор, пока не прореагирует весь бериллий или весь пар, находящийся в этом объёме.

Скорость этой реакции изменяется в широких пределах и зависит от множества факторов: вида образца бериллия (компактный, пористый или порошок), температуры образца, способа его получения, размера образца и его пористости, степени окисления, свойств образующегося оксидного слоя, температуры и давления пара, времени после начала реакции (2) [14]. Следует учитывать, что в процессе паробериллиевой реакции изменяются размеры образца и свойства его поверхности.

Температура поверхности ПС и дивертора не будет являться постоянной. Экспериментально показано [16], что при срыве плазмы поверхность металлических образцов нагревается до температуры плавления и даже кипения (наблюдается разбрызгивание капель металла, в том числе и наиболее тугоплавкого вольфрама). Следовательно, после срыва плазмы значительная часть бериллиевой облицовки (БО) ПС или дивертора будет нагрета как минимум до температуры плавления бериллия $T_{\text{Ве пл}} = 1280$ — 1290 °С [17]. Если аварии с истечением воды в ВК будет предшествовать авария типа LOFA, а термоядерная реакция не прекратится, то в этом случае ПС или дивертор за несколько секунд нагреется до температуры разрушения [3]. Последующий срыв плазмы приведёт к образованию ещё одного нагретого участка БО. Следовательно, в любом случае в начальный период протекания аварии будет иметься участок или участки БО, нагретые до $T_{\text{Ве пл}}$.

В случае начала реакции (2) БО будет разогреваться как за счёт теплоты реакции $Q_{\text{Ве}}$, так и за счёт остаточного тепловыделения в ПС или диверторе. Следует учесть, что при температуре, близкой к $T_{\text{Ве пл}}$, начинается интенсивное испарение бериллия. Скорость испарения бериллия $U_{\text{Ве исп}}$ [17] в значительной степени зависит от его температуры и слабо зависит от давления окружающей среды. При температуре бериллия 1000 °С $U_{\text{Ве исп}} \sim 5 \cdot 10^{-6}$ кг/(м²·с), при $T_{\text{Ве пл}}$ $U_{\text{Ве исп}} \sim 10^{-3}$ кг/(м²·с) — при такой скорости весь бериллий может испариться с поверхности ПС и дивертора за 2—3 ч. Этот процесс следует учесть при детальном рассмотрении аварии в ВК. Смешение паров бериллия с водяным паром несомненно ускорит протекание реакции (2).

Протекание реакции (2) приводит к образованию на БО слоя ВеО, который должен тормозить протекание реакции (2). Это вещество является термически стойким и обладает высокой температурой плавления 2530 °С [18]. Но в присутствии паров воды ВеО превращается в гидроксид бериллия $\text{Ве}(\text{ОН})_2$, который интенсивно испаряется и разлагается при высокой (более 1000 °С) температуре. Следовательно, образование на БО защитной плёнки из ВеО маловероятно. Все эти особенности указывают на большую сложность для моделирования процесса взаимодействия пара с бериллием.

Оценка скорости образования водорода при взаимодействии бериллия с паром и определение количества водорода в ВК. Методика расчёта скорости образования водорода при протекании реакции

(2) рекомендована в [15]. Обозначим её как методику № 1. В этой методике использованы внесистемные единицы (атм., сут). Скорость генерации водорода получается в моль/сут. Затем все полученные значения пересчитываем в СИ.

Согласно методике № 1 скорость образования водорода при взаимодействии пара с твёрдой БО описывается дифференциальным уравнением

$$dM_{H(Be)}/dt = KC_{\text{пара}}S, \quad (3)$$

где $M_{H(Be)}$ — масса образовавшегося по реакции (2) водорода, моль; t — текущий момент времени, сут; K — константа скорости реакции, м/сут; $C_{\text{пара}}$ — концентрация водяного пара, моль/м³; S — площадь поверхности БО, на которой протекает реакция, м².

В нашем случае $S = S_{\text{ПС}} + S_{\text{див}} + S_{\text{пыли}}$, а

$$C_{\text{пара}} = M_{\text{пара}}/V_{\text{ВК}}, \quad (4)$$

где $M_{\text{пара}}$ — масса пара, поступившего в ВК, моль.

Используя уравнение Менделеева—Клапейрона, получаем

$$P_{\text{пара}} = C_{\text{пара}}RT, \quad (5)$$

где $P_{\text{пара}}$ — парциальное давление пара в ВК, атм.; R — универсальная газовая постоянная, $8,21 \cdot 10^{-5}$ (атм.·м³)/(моль·К); T — температура пара в ВК (считаем её равной температуре ПС), К.

Обработка экспериментальных данных приводит к выводу, что

$$K = K_0 \exp(-Dt), \quad (6)$$

где K_0 — значение константы скорости реакции в начале реакции (2), м/сут; D — темп затухания процесса окисления, 1/сут.

Совместное решение уравнений (3)—(6) даёт

$$M_{H(Be)} = (K_0 P_{\text{пара}} S) / (RTD) (1 - \exp(-Dt)). \quad (7)$$

Для определения K_0 используется полученное опытным путём уравнение

$$\ln K_0 = -9917,9/T + 15,873. \quad (8)$$

Определяем вспомогательный параметр

$$n = 115 \exp(-8P_{\text{пара}}) - 0,0431 \quad (9)$$

и по уравнению

$$\ln K_0 = 1,265D + n \quad (10)$$

определяем D .

Методика № 1 применима при $P_{\text{пара}} \geq 0,5$ атм. (0,05 МПа), так как при меньших значениях $P_{\text{пара}}$ получаются отрицательные значения D , что лишает расчёт физического смысла.

Из уравнения реакции (2) и молекулярных весов участвующих в ней химических элементов следует, что для образования 1 кг водорода необходимо, чтобы в реакцию вступило 4,5 кг бериллия и 9 кг пара. Соответственно требуемое (израсходованное на протекание реакции) количество бериллия составит

$$M_{\text{Ве треб (H)}} = 4,5M_{H(Be)}, \text{ кг}. \quad (11)$$

Если с паром прореагирует не весь бериллий, то оставшаяся масса бериллия, не вступившего в реакцию (2), определится как

$$M_{\text{Ве ост}} = M_{\text{Ве сум}} - M_{\text{Ве треб (H)}}, \text{ кг}. \quad (12)$$

В процессе расчёта $M_{H(Be)}$ необходимо постоянно определять по (12) $M_{\text{Ве ост}}$ — её значение должно быть положительным, иначе расчёт не имеет физического смысла.

Требуемое (израсходованное) количество пара составит

$$M_{\text{пара треб}} = 9M_{H(Be)}, \text{ кг}. \quad (13)$$

Оставшаяся масса пара, не вступившего в реакцию (2), определится как

$$M_{\text{пара ост}} = M_{\text{пара}} - M_{\text{пара треб}}, \text{ кг}. \quad (14)$$

В процессе расчёта необходимо постоянно определять по (14) $M_{\text{пара ост}}$ — её значение должно быть положительным, в противном случае необходимо использовать другую методику расчёта.

Полная масса водорода в ВК

$$M_{\text{Н полн}} = M_{\text{Н (Ве)}} + M_{\text{T}} + M_{\text{D}}, \text{ кг.} \quad (15)$$

Парциальное давление пара или газа в ВК определяется по (5).

Полное давление в ВК определится как

$$P_{\text{полн}} = P_{\text{пара ост}} + P_{\text{T}} + P_{\text{D}} + P_{\text{Н (Ве)}}, \text{ Па.} \quad (16)$$

Расчёт массы водорода, поступившего в ВК при его образовании по реакции (2) к моменту t , производится следующим образом. Для каждого варианта расчёта известны $G_{\text{пара}}$, T и $V_{\text{ВК}}$. Задаём момент времени t . По (1) определяем массу пара в ВК, по (4) — концентрацию пара, по (5) — парциальное давление пара $P_{\text{пара}}$, по (8) — K_0 , по (9) — n , по (10) — D . Затем по (7) определяем $M_{\text{Н (Ве)}}$, по (4) — концентрацию в ВК водорода $C_{\text{Н (Ве)}}$, образовавшегося по реакции (2), по (5) — парциальное давление $P_{\text{Н (Ве)}}$, создаваемое водородом, образовавшимся по реакции (2). Аналогично по (5) определяем P_{T} и P_{D} . Затем определяем $M_{\text{Ве треб (Н)}}$ по (11) и $M_{\text{Ве ост}}$ по (12). По (13) и (14) определяем $M_{\text{пара треб}}$ и $M_{\text{пара ост}}$, по (16) — $P_{\text{полн}}$. Если значение $P_{\text{полн}}$ меньше 0,25 МПа, то задаём новое значение t и повторяем расчёт до тех пор, пока $P_{\text{полн}}$ не попадёт в диапазон 0,25—0,3 МПа (предполагаем, что при таком давлении произойдёт разрушение ВК).

Следует отметить, что методика № 1 верна в том случае, если $P_{\text{пара}}$ зависит только от $M_{\text{пара}}$ (т.е. от скорости истечения воды в ВК). В действительности $P_{\text{пара}}$ зависит от скорости реакции пара и бериллия и соотношения их масс. Для протекания реакции (2) с теоретически рассчитанной по изложенной методике скоростью необходимо постоянно определять по (14) $M_{\text{пара ост}}$. Её значение в каждый момент должно быть близким к значению $M_{\text{пара}}$, определяемой по (1). Если значение $M_{\text{пара ост}}$ существенно (более чем на 5%) отличается от $M_{\text{пара}}$, то это означает, что значительная часть пара в ВК расходуется на протекание реакции (2). В этом случае $P_{\text{пара}}$ зависит не только от $M_{\text{пара}}$, но и от $M_{\text{пара треб}}$, и это нужно учитывать при расчёте.

В таком случае необходимо использовать для расчёта методику № 2. Ведём расчёт по методике № 1. Задаём $P_{\text{пара}} \sim 0,6$ атм. Определяем $C_{\text{пара}}$, затем $M_{\text{пара}}$, t_0 — момент, когда $P_{\text{пара}}$ достигнет заданного значения, затем $M_{\text{Н (Ве)}}$, $M_{\text{пара треб}}$, $M_{\text{пара ост}}$ и $P_{\text{полн}}$. Задаём малый (порядка несколько секунд) интервал Δt и для момента $t_0 + \Delta t$ повторяем расчёт, считая $P_{\text{пара ост}}$ исходным значением $P_{\text{пара}}$. Затем на каждом шаге определяем новое значение $M_{\text{пара ост}}$, $P_{\text{пара ост}}$ и используем его как исходное значение для следующего шага.

Возможно, что расчёт по методике № 1 покажет, что значение $M_{\text{пара ост}}$ отрицательно. Это означает, что весь поступивший в ВК пар израсходован на протекание реакции (2) и пара в ней нет — только водород. Тогда необходимо использовать методику расчёта № 3.

В этом случае в любой момент

$$M_{\text{Н (Ве)}} = M_{\text{пара}}/9. \quad (17)$$

По заданному $P_{\text{Н (Ве)}} = 0,25$ МПа получаем по (5) $C_{\text{Н (Ве)}}$, затем по (4) получаем $M_{\text{Н (Ве)}}$, по (17) — $M_{\text{пара}}$, по (16) — $P_{\text{полн}}$, по (1) — t .

Существуют варианты протекания аварии, при которых $P_{\text{пара}}$ всегда меньше 0,05 МПа. Экспериментально установлено, что скорость протекания реакции (2) снижается с уменьшением $P_{\text{пара}}$. Сделаем предположение, что и при $P_{\text{пара}} \leq 0,05$ МПа $M_{\text{Н (Ве)}}$ можно рассчитывать по (7). Значение D по-прежнему определяется при $P_{\text{пара}}$, близком к 0,05 МПа. Остальное — как в методике № 1. Эту методику обозначим № 4.

Теоретические основы течения воздуха или парогазовой смеси через трубопровод. Процесс поступления воздуха в ВК (или парогазовой смеси из неё в атмосферу) через повреждённый трубопровод (диффузор) с двусторонним разрывом зависит от перепада давления на входе в него $P_{\text{вх}}$ и на выходе из него $P_{\text{вых}}$. При критическом отношении давлений $\beta_{\text{кр}} = P_{\text{вых кр}}/P_{\text{вх}}$ расход воздуха или смеси через трубопровод $G_{\text{воз}}$ максимален и остаётся постоянным, если $P_{\text{вых}} \leq P_{\text{вых кр}}$. Значение $\beta_{\text{кр}}$ зависит только от показателя адиабаты k (для двухатомных газов и их смеси $k = 1,4$ и $\beta_{\text{кр}} \sim 0,53$). Методика расчёта $G_{\text{воз}}$ изложена в [19, 20].

В случае, когда воздух поступает из атмосферы в ВК, $P_{\text{вх}} = P_{\text{атм}} = 0,1$ МПа. Если $P_{\text{вых}}$ меньше критического давления $P_{\text{вых кр}} = P_{\text{вх}}\beta_{\text{кр}} = 0,053$ МПа, то течение воздуха будет критическим и его расход будет максимальным:

$$G_{\text{воз}} = S_{\text{отв}}(P_{\text{вх}}\rho_{\text{вх}})^{0,5} Y_{\mu}, \text{ кг/с,} \quad (18)$$

где $S_{\text{отв}}$ — площадь поперечного сечения трубопровода, м^2 ; $\rho_{\text{вх}}$ — плотность воздуха на входе в трубопровод, $\text{кг}/\text{м}^3$; Y — коэффициент, зависящий только от k (в нашем случае $Y = 0,68$); μ — коэффициент расхода, учитывающий, что трубопровод имеет конечную длину и гидравлическое сопротивление [20]. В нашем случае $\mu \sim 0,5$, так как трубопровод сильно отличается от идеального сопла.

Если $P_{\text{вых}}$ больше $P_{\text{кр}}$, но меньше атмосферного, то течение воздуха будет докритическим и его расход можно оценить по формуле

$$G_{\text{воз}} = \mu S_{\text{отв}} [2k/(k-1) P_{\text{вх}} \rho_{\text{вх}} [(P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}})^{2/k} - (P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}})^{(k+1)/k}]^{0,5}. \quad (19)$$

Масса воздуха в ВК

$$M_{\text{воз}} = \sum G_{\text{воз ср}} \Delta t, \text{ кг}, \quad (20)$$

где $G_{\text{воз ср}}$ — среднее значение $G_{\text{воз}}$ за период времени Δt .

Определение характеристик парогазовой смеси в ВК. Масса смеси

$$M_{\text{см}} = M_{\text{пара}} + M_{\text{H (Be)}} + M_{\text{T}} + M_{\text{D}} + M_{\text{воз}}, \text{ кг}. \quad (21)$$

Согласно [21] массовая доля:

пара в смеси	$g_{\text{пара}} = M_{\text{пара}}/M_{\text{см}};$	(22)
водорода (протия) в смеси	$g_{\text{вод}} = M_{\text{H (Be)}}/M_{\text{см}};$	
дейтерия в смеси	$g_{\text{D}} = M_{\text{D}}/M_{\text{см}};$	
третия в смеси	$g_{\text{T}} = M_{\text{T}}/M_{\text{см}};$	
воздуха в смеси	$g_{\text{воз}} = M_{\text{воз}}/M_{\text{см}}.$	

Для рассматриваемой смеси важно определить объёмную долю каждого компонента r . Определим вспомогательный параметр

$$N = g_{\text{пара}}/\mu_{\text{пара}} + g_{\text{вод}}/\mu_{\text{вод}} + g_{\text{D}}/\mu_{\text{D}} + g_{\text{T}}/\mu_{\text{T}} + g_{\text{воз}}/\mu_{\text{воз}}, \quad (23)$$

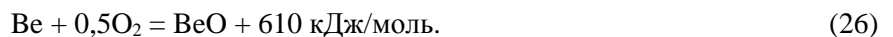
где μ — молярная масса компонента смеси, $\text{кг}/\text{кмоль}$. Тогда объёмная доля пара

$$r_{\text{пара}} = (g_{\text{пара}}/\mu_{\text{пара}})/N. \quad (24)$$

Объёмные доли остальных компонентов смеси определяются аналогично. Суммарная объёмная доля всех изотопов водорода

$$r_{\text{вод сум}} = r_{\text{H}} + r_{\text{D}} + r_{\text{T}}. \quad (25)$$

Физико-химические основы взаимодействия бериллия с воздухом и оценка скорости взаимодействия. При протекании аварии с прорывом воздуха в ВК, строго говоря, будет иметь место взаимодействие бериллия со смесью пара и воздуха с образованием тройственной смеси. Экспериментальных данных о протекании такой реакции нет. При взаимодействии бериллия только с воздухом наблюдается образование на поверхности бериллия слоя BeO , который замедляет скорость протекания реакции. Образование водорода при этом не происходит. Примем допущение, что процесс генерации водорода при взаимодействии бериллия со смесью пара и воздуха протекает так же, как с чистым паром, и скорость образования водорода будет такой же. Реакция бериллия с воздухом носит экзотермический характер и описывается уравнением



Увеличение массы образца бериллия путём превращения его части в BeO в течение реакции (26) в общем случае подчиняется закону

$$(M_{\text{o (Be) уд}})^n = K_{\text{воз}} t, \quad (27)$$

где n — параметр, который может находиться в широком диапазоне значений (от менее 1 до более 2) в зависимости от температуры и характеристик бериллия; $M_{\text{o (Be) уд}}$ — увеличение массы образца бериллия, выраженное в мг на 1 м^2 эффективной площади поверхности образца бериллия (твёрдого или порошка), фактически это масса кислорода воздуха, связанная при протекании реакции (26); $K_{\text{воз}}$ — константа скорости реакции бериллия с воздухом; t — время после начала реакции (26).

Заметное взаимодействие бериллия с воздухом начинается при температуре выше $700 \text{ }^\circ\text{C}$, когда теряются защитные свойства оксидной плёнки. В присутствии паров воды скорость окисления бериллия воздухом значительно возрастает.

Экспериментальное исследование процессов взаимодействия бериллия с воздухом [22] показало, что при всех условиях значительное увеличение массы бериллия путём превращения его части в ВеО происходит при длительности реакции (26) порядка нескольких часов. Как будет показано, длительность процесса заполнения ВК воздухом при её сообщении с атмосферой не превысит 220 с. За это время масса кислорода воздуха, связанная при протекании реакции (26), будет незначительна, и её можно не учитывать.

ОСНОВНЫЕ ВАРИАНТЫ ПРОТЕКАНИЯ АВАРИИ С ИСТЕЧЕНИЕМ ВОДЫ И ПРОРЫВОМ ВОЗДУХА В ВК

Описание системы локализации аварий в ВК. Сделаем предположение, что система локализации аварий в ДЕМО-ТИН выполнена аналогично этой системе в ИТЭР [2]. ВК соединена двумя трубопроводами сечением ~0,1 м² со сбросной ёмкостью (СЕ) объёмом ~1200 м³. На трубопроводах установлены предохранительные клапаны. При аварии с истечением в ВК воды без прорыва воздуха и повышении давления в ВК до ~94 кПа (абс.) предохранительные клапаны открываются и образовавшаяся пароводородная смесь поступает в СЕ. Конструкция СЕ должна обеспечивать приём всего количества пароводородной смеси, которая может образоваться в ВК, конденсацию пара и недопущение образования и взрыва ГС в ней.

ВК оборудована также двумя разрывными мембранами площадью около 1 м² каждая. Если предохранительные клапаны не срабатывают, то при достижении в ВК давления ~150 кПа (абс.) разрываются мембраны и пароводородная смесь поступает в СЕ.

В случае, если разрывные мембраны не сработают или СЕ окажется неспособной принять пароводородную смесь, рост давления в ВК продолжится. Максимальное внутреннее давление, на которое рассчитана ВК, пока не определено. По аналогии с ИТЭР считаем, что при достижении в ней абсолютного давления ~0,25—0,3 МПа она будет разрушена. При этом вся образовавшаяся в ВК пароводородная смесь поступит в реакторный зал с вероятностью взрыва там ГС.

В случае, если авария сопровождается прорывом воздуха в ВК, т.е. ВК сообщается с атмосферой реакторного зала, при несрабатывании предохранительных клапанов и росте давления в ВК до атмосферного и выше начинается истечение из неё парогазовой смеси в реакторный зал. В этом случае давление в ВК не может значительно превысить атмосферное и срабатывание мембран исключено. Поступление парогазовой смеси в СЕ не происходит, и смесь частично остаётся в ВК, частично поступает в реакторный зал с вероятностью взрыва там ГС.

Возможные варианты протекания аварии. Разрыв контура циркуляции воды может быть, как односторонним, так и двусторонним. В случае одностороннего разрыва не происходит соединения объёма ВК с атмосферой. Поступления воздуха в ВК не будет, и образование и взрыв ГС в ней невозможны.

В случае двустороннего разрыва контура циркуляции воды один разрыв произойдёт в ВК, второй за её пределами, в воздушной атмосфере. После того, как вода вытечет из участка трубопровода между разрывами, начнётся поступление воздуха в ВК, где происходит образование пароводородной смеси, и там образуется тройственная смесь (пар, воздух, водород) с вероятностью её взрыва.

Несколько возможных вариантов развития аварии представлены на дереве событий (рис. 2).

Вариант 1. Разрыв контура циркуляции теплоносителя будет двусторонним. Начнётся поступление воздуха в ВК и рост давления в ней.

После срабатывания предохранительных клапанов начнётся сброс парогазовой смеси в СЕ. Истечение смеси в реакторный зал невозможно, но возможен взрыв ГС в ВК.

Вариант 2. Разрыв контура циркуляции теплоносителя будет двусторонним. Рост давления в

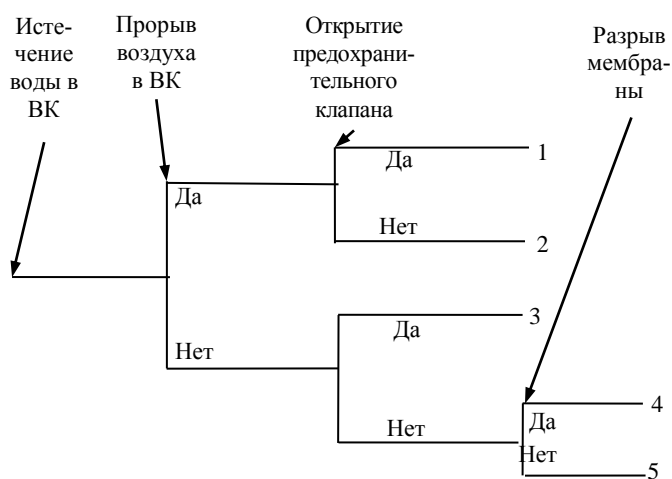


Рис. 2. Дерево событий при аварии с истечением воды и прорывом воздуха в ВК. Цифрами обозначены варианты

ВК и отказ предохранительных клапанов приведут к тому, что давление в ВК превысит атмосферное (за счёт образования пара и генерации водорода). Начнётся истечение парогазовой смеси в реакторный зал с возможностью её взрыва там (если не произойдет взрыва в ВК).

Вариант 3. Прорыва воздуха в ВК не будет, а срабатывание предохранительных клапанов приведёт к тому, что пароводородная смесь будет поступать в СЕ. Авария будет локализована в ВК и СЕ. Образование и взрыв ГС исключены.

Вариант 4. Прорыва воздуха в ВК не будет. После истечения воды в ВК и образования пароводородной смеси предохранительные клапаны откажут, но сработают разрывные мембраны. Авария будет локализована в ВК и СЕ. Образование и взрыв ГС исключены.

Вариант 5. После истечения воды в ВК и образования пароводородной смеси откажут и предохранительные клапаны, и разрывные мембраны. Авария будет локализована в ВК. Рост давления в ВК до значений более 0,25 МПа приведёт к её разрушению (и разрушению всей установки) и истечению пароводородной смеси в реакторный зал с возможностью объёмного взрыва ГС там. Момент разрушения ВК обозначим τ^* .

Наиболее тяжёлыми по своим последствиям представляются варианты 2 и 5, которые будут рассмотрены далее.

РАСЧЁТ ВОЗМОЖНЫХ ВАРИАНТОВ ПРОТЕКАНИЯ АВАРИИ С ИСТЕЧЕНИЕМ В ВК ТОЛЬКО ВОДЫ

На рис. 2 рассматривается вариант 5. Для определения параметров в ВК применим следующий подход: сделаем оценку количества образовавшегося водорода в ВК при минимально ожидаемой $T = 400$ °С, средней ожидаемой $T = 700$ °С и максимально ожидаемой $T = 1000$ °С и при минимальном, среднем и максимальном значении $G_{\text{воды}}$, а также при минимальном значении $V_{\text{ВК}} = 140$ м³ и максимальном значении 400 м³. Всего получается 18 вариантов. Предполагается, что эти варианты охватывают все возможные значения температуры в ВК, возможные значения её объёма и расхода воды в неё.

Исходные данные для всех рассматриваемых вариантов приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Исходные данные для расчёта параметров в ВК

Вариант	Температура пара в ВК, К	Расход воды в ВК, кг/с	Объём ВК, м ³
1—1—1	673	0,1	140
1—1—2	673	0,1	400
2—1—1	673	1	140
2—1—2	673	1	400
3—1—1	673	10	140
3—1—2	673	10	400
1—2—1	973	0,1	140
1—2—2	973	0,1	400
2—2—1	973	1	140
2—2—2	973	1	400
3—2—1	973	10	140
3—2—2	973	10	400
1—3—1	1273	0,1	140
1—3—2	1273	0,1	400
2—3—1	1273	1	140
2—3—2	1273	1	400
3—3—1	1273	10	140
3—3—2	1273	10	400

В табл. 3 показаны конечные параметры в ВК для всех рассматриваемых вариантов протекания аварии.

Т а б л и ц а 3. Параметры в ВК к моменту её разрушения τ^*

Вариант ¹	τ^* , с	$P_{\text{полн}}$, МПа	$M_{\text{H (Be)}}$, кг	$M_{\text{H полн}}$, кг	$M_{\text{Be ост}}$, кг	$M_{\text{пара}}$, кг	$M_{\text{пара ост}}$, кг
1—1—1	900	0,27	0,54	1,37	1989,5	90	85,1
1—1—2	2400	0,26	1,42	2,25	1985,6	240	227,2
2—1—1	90	0,26	0,055	0,89	1991,8	90	89,5
2—1—2	240	0,25	0,144	0,98	1991,4	240	238,7
3—1—1	9	0,26	0,0055	0,84	1991,9	90	89,9
3—1—2	24	0,25	0,014	0,85	1991,9	240	239,9
1—2—1	620	0,26	6,89	7,72	1961	62	0
1—2—2	1690	0,25	18,78	19,61	1907,5	169	0
2—2—1	57	0,26	1,72	2,55	1984,3	57	46,7
2—2—2	160	0,26	4,7	5,53	1970,9	160	117,7
3—2—1	6	0,26	0,23	1,06	1991	60	58
3—2—2	16	0,25	0,6	1,43	1989,3	160	154,6
1—3—1	470	0,27	5,26	6,1	1968,3	47	0
1—3—2	1290	0,26	14,35	15,2	1927,4	129	0
2—3—1	47	0,27	5,26	6,1	1968,3	47	0
2—3—2	129	0,26	14,35	15,2	1927,4	129	0
3—3—1	4	0,26	0,95	1,78	1987,7	40	31,4
3—3—2	12	0,26	3	3,83	1978,5	120	97

¹Варианты 1—1—1, 1—1—2, 2—1—1, 2—1—2, 3—1—1, 3—1—2, 3—2—1, 3—2—2 рассчитывались по методике № 1, варианты 1—2—1, 1—2—2, 1—3—1, 1—3—2 — по методике № 3, варианты 2—2—1, 2—2—2, 3—3—1 и 3—3—2 — по методике № 2, варианты 2—3—1 и 2—3—2 — по методике № 4, так как $P_{\text{пара ост}}$ получается меньше 0,05 МПа.

Оценка максимального количества водорода, который может образоваться в ДЕМО-ТИН.

Анализ рассмотренных вариантов протекания аварии показывает, что количество водорода в ВК составит 0,84—19,61 кг. После разрушения ВК этот водород смешивается с воздухом в реакторном зале и может взорваться.

Оценка характеристик возможного взрыва будет сделана после уточнения параметров помещений ДЕМО-ТИН.

Возможен такой вариант протекания аварии, когда после разрушения ВК произойдёт выход водорода в здание токамака, а взрыв ГС не произойдёт. БО и пыль могут продолжать своё взаимодействие с паром. Максимальное количество водорода $M_{\text{H (Be) макс}}$ образуется, если весь бериллий прореагирует с паром. По уравнению (11) получаем $M_{\text{H (Be) макс}} = M_{\text{Be ВК}}/4,5 = 443$ кг. Появление такого количества водорода в здании токамака неприемлемо и должно быть полностью исключено ещё на стадии проектирования.

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ В ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ ПОСЛЕ АВАРИИ С ИСТЕЧЕНИЕМ В НЕЁ ВОДЫ И ПРОРЫВОМ ВОЗДУХА

Рассматривается вариант 2 на рис. 2. Процессы, связанные с образованием пара и его взаимодействием с бериллием, рассчитываются по изложенной методике. При ожидаемой длине трубопровода между разрывами ~5 м и его поперечном сечении $S_{\text{отв}} = 5 \cdot 10^{-3}$ м² его внутренний объём составит ~2,5·10⁻² м³. Масса воды в этом трубопроводе ~24 кг. Предполагаем, что общая масса воды, которая попадёт в ВК при подобной аварии, составит $M_{\text{воды 0}} = 25—50$ кг. За время ~1 с (начальный период или период неустойчивости) она испарится и создаст исходное давление пара в ВК $P_{\text{пара 0}}$. В дальнейшем поступления воды в ВК не будет из-за того, что трубопровод разорван или сработают отсечные клапаны. Такая оценка $M_{\text{воды 0}}$ сделана потому, что $M_{\text{воды 0}} \leq 25$ кг трудно ожидать при разрыве крупного трубопровода, а истечение более 50 кг создаст в ВК $P_{\text{полн}} \geq 0,1$ МПа, что исключает прорыв в неё воздуха и образование ГС.

После завершения периода неустойчивости начнётся генерация водорода и образование ВеО вследствие протекания реакции (2), а также накопление водорода в ВК. В это же время начнётся реакция (26) со связыванием кислорода и образованием ВеО.

В период неустойчивости произойдет также отепление крионасосов и криопанелей и весь водород с них (смесь дейтерия и трития) поступит в ВК. В расчёте необходимо учитывать уменьшение $M_{\text{пара } 0}$, так как часть пара будет израсходована при протекании реакции (2).

После завершения периода неустойчивости в ВК будет давление $P_{\text{полн}}$, определяемое по уравнению (16). Если $P_{\text{полн}} \leq P_{\text{атм}}$ то будет происходить поступление воздуха через трубопровод в ВК. Воздух в ВК создаст парциальное давление $P_{\text{возд}}$, и в ней образуется парогазовая смесь. Суммарное давление в ВК по мере увеличения количества воздуха в ней

$$P_{\text{сум}} = P_{\text{полн}} + P_{\text{возд}} \quad (28)$$

будет расти и достигнет атмосферного. Обозначим τ^{**} момент, когда $P_{\text{сум}}$ в ВК достигнет атмосферного. В этот момент поступление воздуха в ВК прекратится. В дальнейшем, если будет продолжаться реакция (2), начнётся истечение парогазовой смеси в реакторный зал, так как $P_{\text{сум}}$ будет превышать $P_{\text{атм}}$.

Если после завершения периода неустойчивости $P_{\text{полн}}$ больше $P_{\text{атм}}$, то поступления воздуха в ВК не будет, а будет истечение образовавшейся пароводородной смеси через оборванный трубопровод в реакторный зал.

В ВК и реакторном зале возможен взрыв ГС. Оценка условий, при которых это возможно, и численные расчёты процессов при аварии будут выполнены далее.

РАСЧЁТ ВОЗМОЖНЫХ ВАРИАНТОВ ПРОТЕКАНИЯ АВАРИИ С ИСТЕЧЕНИЕМ В ВК ВОДЫ И ПРОРЫВОМ ВОЗДУХА

Для определения параметров в ВК применим следующий подход: сделаем оценку количества всех возможных значений температуры в ВК, её объёма и массы попавшей в ВК воды $M_{\text{воды } 0}$. В табл. 4 приведены исходные данные для всех рассматриваемых вариантов образовавшегося в ней водорода и проникшего в неё воздуха при минимально ожидаемой $T = 400$ °С, средней ожидаемой $T = 700$ °С, максимально ожидаемой $T = 1000$ °С и при минимальном значении $V_{\text{ВК}} = 140$ м³, максимальном значении 400 м³, а также при $M_{\text{воды } 0} = 25$ кг и $M_{\text{воды } 0} = 50$ кг. Всего получается 12 вариантов. Предполагается, что эти варианты охватывают все возможные значения температуры в ВК, объёма ВК и массы воды в ней.

Т а б л и ц а 4. Исходные данные для расчёта параметров в ВК

Вариант	Температура пара в ВК, К	Объём $V_{\text{ВК}}$, м ³	Масса воды в ВК $M_{\text{воды } 0}$, кг	Давление $P_{\text{Нкрио}}$, МПа	Давление $P_{\text{пара } 0}$, МПа
4—1—1	673	140	25	0,008	0,07
4—1—2	673	140	50	0,008	0,14
4—2—1	673	400	25	0,003	0,026
4—2—2	673	400	50	0,030	0,051
5—1—1	973	140	25	0,012	0,1
5—1—2	973	140	50	0,012	0,2
5—2—1	973	400	25	0,004	0,037
5—2—2	973	400	50	0,004	0,073
6—1—1	1273	140	25	0,016	0,13
6—1—2	1273	140	50	0,016	0,26
6—2—1	1273	400	25	0,006	0,048
6—2—2	1273	400	50	0,006	0,096

В табл. 5 приведены конечные параметры в ВК для всех рассчитанных вариантов протекания аварии.

ВЫВОДЫ

При принятых параметрах ДЕМО-ТИН взрыв ГС при аварии с истечением в ВК воды и прорывом воздуха возможен.

Для более точной оценки последствий рассматриваемой аварии необходимо уточнение как конструктивных характеристик ДЕМО-ТИН, так и уточнение характеристик процесса взаимодействия пара с бериллием во всём возможном диапазоне температуры и давления пара в ВК, а также исследование взаимодействия с бериллием паровоздушной смеси.

Значительное количество изотопов водорода заморожено на крионасосах и криопанелях. Необходимо следить, чтобы это количество было минимальным.

Т а б л и ц а 5. Параметры в ВК к моменту τ^{**}

Параметр	Вариант ¹					
	4—1—1	4—2—1	4—2—2	5—2—1	5—2—2	6—2—1
τ^{**} , с	30	220	150	120	60	80
M_H (Ве), кг	0,005	0,15	0,06	0,94	0,66	1,93
M_H полн, кг	0,838	0,98	0,89	1,78	1,49	2,76
$M_{\text{Ве ост}}$, кг	1991,95	1991,3	1991,7	1987,8	1989	1983,3
$M_{\text{пара ост}}$, кг	24,98	23,6	49,5	16,5	44	7,6
$M_{\text{воз}}$, кг	14,1	114	75,5	63,5	25,5	35,6
$M_{\text{см}}$, кг	39,9	138,6	125,9	80,9	70,2	46
$r_{\text{воз}}$, %	23,5	71,8	47	58,6	23	44,1
$r_{\text{пара}}$, %	68,2	23,8	49,5	24,4	64	15,2
$r_{\text{вод сум}}$, %	8,3	4,4	3,5	17	13	40,7

¹При рассмотрении вариантов 4—1—2, 5—1—1, 5—1—2, 6—1—1, 6—1—2 и 6—2—2 расчёт показывает, что в этом случае в самом начале аварии после испарения вылившейся воды и отепления крионасосов и криопанелей в ВК установится давление $P_{\text{полн}} = P_{\text{пара 0}} + P_{\text{H крио}}$, превышающее атмосферное. Прорыв воздуха в ВК исключён, и расчёт параметров в ней не проводился. Будет происходить медленное истечение пароводородной смеси с малым процентным содержанием водорода из ВК в реакторный зал. В вариантах 4—2—1, 5—2—1 и 6—2—1 значение $P_{\text{пара 0}} \leq 0,05$ МПа, расчёт проводится по методике № 4. Остальные варианты рассчитываются по методике № 2. Во всех вариантах (за исключением 4—2—2) процентное (по объёму) содержание водорода в смеси больше, чем нижний КП горения. В варианте 4—1—1 высокое значение $r_{\text{пар}}$ и температура смеси ниже T_v позволяют предполагать, что взрыв ГС не произойдёт. Во всех остальных вариантах взрыв ГС возможен. Весьма вероятен взрыв ГС в вариантах 5—2—1 и 6—2—1 (температура смеси выше T_v , концентрация $r_{\text{вод сум}}$ велика, концентрация $r_{\text{пар}}$ незначительна).

Следует отметить, что водород вследствие своей малой плотности поднимается к потолку помещений и накапливается там. Поэтому даже если по результатам расчётов средняя концентрация водорода в помещении будет ниже нижнего КП горения (или взрыва) или концентрация пара в смеси делает невозможной её взрыв, то локальная концентрация водорода может быть пожаро- и взрывоопасной.

Для предотвращения возможности взрыва ГС в ВК после рассматриваемой аварии предлагаются несколько способов:

- принудительная подача в ВК ингибиторов, замедляющих и подавляющих реакцию (2);
- гарантированная подача в ВК такого количества воды, чтобы образовавшийся пар создал парциальное давление, превышающее атмосферное и препятствующее поступлению в ВК воздуха. Кроме того, пар является разбавителем ГС и препятствует её горению;
- аварийное охлаждение всех элементов в ВК до температуры ниже T_v — это устранил возможный источник воспламенения ГС. Снижение температуры БО будет также способствовать уменьшению количества водорода, образующегося по реакции (2).

Авария без поступления воздуха в ВК представляется потенциально наиболее опасной по следующим причинам. В этом случае возможно накопление в ВК большого количества водорода без возможности его горения и взрыва. После разрушения ВК произойдёт поступление водорода в воздух с образованием ГС.

В случае поступления воздуха в ВК с самого начала аварии возможно горение ГС без накопления большого количества водорода, что, как представляется, не приведёт к тяжёлым последствиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сорокин С.И., Давыдов Д.А.** Моделирование химического взаимодействия бериллиевой облицовки с водяным паром в замкнутой полости. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2004, вып. 1, с. 10.
2. **Колбасов Б.Н.** 3-е техническое совещание МАГАТЭ по первому поколению термоядерных энергетических установок: проекты и технология (Вена, 13—15 июля 2009 г.) и 9-е техническое совещание МАГАТЭ по безопасности термоядерных энергетических установок (Вена, 15—17 июля 2009 г.). — Там же, 2009, вып. 3, с. 70.
3. **Колбасов Б.Н.** Максимальная проектная авария термоядерного источника нейтронов ДЕМО-ТИН. — Там же, 2014, вып. 3, с. 31.
4. **Азизов Э.А. и др.** Токамак ДЕМО-ТИН: концепция электромагнитной системы и вакуумной камеры. — Там же, 2015, т. 38, вып. 2, с. 5.
5. **Теплотехника.** Ред. А.П. Баскаков. — М.: Энергоиздат, 1982.
6. **Гельфанд Б.Е. и др.** Водород: параметры горения и взрыва. — М.: Физматлит, 2008.
7. **Глинка Н.Л.** Общая химия. — М.: Химия, 2003.

8. **Ананьев С.С. и др.** Топливный цикл термоядерного источника нейтронов. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2014, вып. 4, с. 11.
9. **Шведов В.П. и др.** Ядерная технология. — М.: Атомиздат, 1979.
10. **Уникальные** разработки и экспериментальная база Курчатовского института. Ред. Н.Н. Пономарев-Степной. — М.: ИздАТ, 2008.
11. **Пашков А.Ю.** Оценка возможных аварий в первой стенке термоядерного источника нейтронов, вызванных отказами в системе ее охлаждения. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2013, вып. 3, с. 96.
12. **Taylor N. et al.** Key issues in the safety and licensing of ITER. — In: 9th IAEA Technical Meeting on Fusion Power Plant Safety. Vienna, 15—17 July 2009.
13. **Пашков А.Ю.** Оценка скорости распыления первой стенки ТИН. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2014, вып. 2, с. 45.
14. **Давыдов Д.А. и др.** Химическое взаимодействие бериллиевой пыли в щелях и на плоской поверхности с водяным паром. — Там же, 2002, вып. 3—4, с. 118.
15. **Сорокин С.И., Давыдов Д.А.** Исследование константы скорости реакции при окислении водяным паром компактного и пористого бериллия и бериллиевого порошка. — Там же, с. 102.
16. **Позняк И.М. и др.** Эрозия металлов при воздействии интенсивных потоков плазмы. — Там же, 2012, вып. 4, с. 23.
17. **Чиркин В.С.** Теплофизические свойства материалов ядерной техники. — М.: Атомиздат, 1968.
18. **Ягодин Г.А. и др.** Технология редких металлов в атомной технике. Учебное пособие для вузов. — М.: Атомиздат, 1974.
19. **Кузовлев В.А.** Техническая термодинамика и основы теплопередачи. — М.: Высшая школа, 1975.
20. **Идельчик И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям. — М.: Машиностроение, 1975.
21. **Теплотехника.** Ред. В.И. Крутов. — М.: Машиностроение, 1986.
22. **Давыдов Д.А. и др.** Исследование взаимодействия компактного и пористого бериллия с воздухом и водяным паром с точки зрения проблемы бериллиевой безопасности реактора ИТЭР. — ВАНТ. Сер. Материаловедение и новые материалы, 1995, вып. 1(52), с. 74.



Александр Юрьевич Пашков,
заместитель начальника отдела,
с.н.с.; НИЦ «Курчатовский ин-
ститут», 123182 Москва, пл.
Академика Курчатова 1, Россия
A_Yu_Pashkoff@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28 апреля 2017 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 2, с. 78—91.