ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ФЛИНАКА В ТЕРМОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКЕ ТИН

А.Ю. Пашков

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Работа посвящена вопросам безопасности, связанным с применением в blankets проектируемой установки ТИН смеси жидких солей типа флинка, содержащей торий. Дан обзор токсических и радиационных свойств химических элементов, входящих в состав флинка, и вызываемых ими заболеваний. Приведены нормы на предельно допустимые концентрации составных частей флинка в воздухе и воде. С точки зрения безопасности описан опыт эксплуатации установок и стендов, использовавших смеси жидких солей. Дан прогноз возможных аварий в установке ТИН с учётом свойств флинка. Предложена технология безопасного обращения с флином и его компонентами, намечены направления его дальнейших исследований.

Ключевые слова: флинка, термоядерный источник нейтронов, прогноз аварийных ситуаций, безопасность.

SAFETY PROBLEMS AT FLiNaK USE IN TNS-FACILITY

A.Yu. Pashkov

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

This article is devoted to safety problems of the thermonuclear neutron source using mixture of liquid fluorine salts (named FLiNaK) with thorium in the blanket. The review of toxic and radiological properties of the chemical compounds forming FLiNaK is given. The diseases, caused by the FLiNaK and its components, are described. The maximum permissible concentrations of the chemical compounds forming FLiNaK in the air and water are given. The field experience gained at the installations with FLiNaK (from the viewpoint of safety) is described. Some possible accidents in the thermonuclear neutron source with FLiNaK are considered. The technology of safe handling with FLiNaK and its components is offered. The directions of future investigations for FLiNaK handling are proposed.

Key words: FLiNaK, thermonuclear neutron source, assessment of accident situation, safety.

ВВЕДЕНИЕ

По определению, данному в [1], жидкосолевые blankets (ЖСБ) — это blankets, в которых в качестве теплоносителя и среды для трансмутации изотопов в различных сочетаниях используются сплавы фторидов (солей) таких элементов, как литий, натрий, калий, бериллий, торий, уран. В частности, в проектируемой установке ТИН (термоядерный источник нейтронов) [2] предполагается использовать смесь солей следующего состава: $30\text{ThF}_4 + 32,55\text{LiF} + 8,05\text{NaF} + 29,4\text{KF}$ (цифры означают количество молярных процентов). По названию содержащихся в смеси химических элементов (фтор, литий, натрий и калий) её называют FLiNaK (флинка). Все содержащиеся в флинке данного состава химические элементы и их соединения являются высокотоксичными и при работе с ним могут выделяться в свободном состоянии. В процессе нейтронного облучения флинка в blankets в нём будут образовываться тритий и уран, а также радиоактивные изотопы исходных элементов. Это делает вопросы безопасности при работе с флином ещё более сложными и вызывает необходимость разработки безопасной технологии обращения с ним на всех этапах работы. С этой целью дан обзор токсических свойств химических элементов, входящих в состав флинка, и вызываемых ими заболеваний. Приведены нормы на предельно допустимые концентрации химических элементов флинка в воздухе и воде.

СХЕМА КОНСТРУКЦИИ БЛАНКЕТА УСТАНОВКИ ТИН

Принципиальная схема установки ТИН с ЖСБ приведена на рисунке. В частности, blanket выполнен в виде системы вертикальных каналов, через которые циркулирует флинка. Это первый контур системы охлаждения. Через промежуточный теплообменник тепло, выделившееся в первом контуре, передаётся во второй контур, где также циркулирует флинка, но другого химического состава. Окончательно тепло утилизируется в третьем контуре, заполненном водой. В первом контуре имеется байпасная система, которая позволяет отводить часть флинка на переработку (например, для выделения наработанного в нём трития, урана, протактиния). В нижней части конструкции, под основанием установки ТИН, имеются сбросные ёмкости, куда флинка должен стечь в случае возникновения аварийной ситуации.

Сливные трубопроводы для стока флиака снабжены так называемыми «замерзающими» клапанами, представляющими собой локальный охлаждаемый воздухом участок трубопровода (т.е. находящийся вне вакуумной камеры). Такое локальное охлаждение обеспечивает застывание флиака на этом участке и образование пробки в сливном трубопроводе. При повышении температуры флиака в бланкете выше расчётной флиак в «замерзающих» клапанах плавится и происходит его сток в сбросные ёмкости, имеющие автономную систему охлаждения. Эта система предохраняет первый контур системы охлаждения от чрезмерного повышения температуры в нём. Конструкция сбросной ёмкости исключает возможность образования в ней критической массы.

Компоновка сегмента бланкета в реакторе [2]

ТОКСИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОНЕНТОВ ФЛИАКА

Чистый фтор. Необходимость его рассмотрения вызывается тем, что он входит во все компоненты флиака и его применение является составной частью технологии обращения с флиаком, например, при многих процессах требуется барботаж фтора через расплав солей. Он обладает исключительно высокой реакционной способностью и легко проникает в организм человека, вызывая разнообразные нарушения обмена веществ. Повышенная концентрация фтора в питьевой воде приводит к разрушению эмали зубов и вызывает тяжёлые отравления, сопровождающиеся тошнотой, рвотой, болями в животе [3, 4]. Известны случаи с летальным исходом. Концентрация фтора во вдыхаемом воздухе более 77 мг/м^3 смертельно опасна для человека, меньшие концентрации переносятся ограниченное количество времени. Заболевание человека при повышенной концентрации фтора в окружающей среде называется флюорозом. Это заболевание имеет несколько стадий и проявляется при длительном (несколько лет) пребывании человека в среде с повышенной концентрацией фтора. При соприкосновении с кожей пары фтора при его концентрации $150\text{—}300 \text{ мг/м}^3$ вызывают зуд, раздражение вплоть до появления пузырей. Контакт кожи с чистым фтором в течение нескольких секунд вызывает ожог второй степени, поражаются также глаза. Предельно допустимые концентрации (ПДК) фтора и его соединений приведены в табл. 1. Следует отметить, что при одновременном содержании в воздухе нескольких соединений фтора, различающихся по растворимости и агрегатному составу, имеет место суммирование токсического эффекта.

Таблица 1. Предельно допустимые концентрации фтора и его соединений

Вещество	ПДК для воздуха рабочей зоны, мг/м^3	ПДК для атмосферного воздуха максимальная разовая, мг/м^3	ПДК для атмосферного воздуха максимальная среднесуточная, мг/м^3	ПДК для воды, мг/л
Фтор Фториды натрия, калия, лития	0,2	0,03	0,01	1,5

Из искусственных радиоактивных изотопов фтора наибольшее практическое значение имеет ^{18}F , основные свойства которого и ПДК для него согласно [5] даны в табл. 2.

Фторид натрия. Представляет собой бесцветные кристаллы, хорошо растворяющиеся в воде. Чрезвычайно токсичное вещество. При приёме внутрь дозы от 16 до 450 мг наблюдаются симптомы острого отравления, доза 5—10 г вызывает смерть в течение 1—4 ч, большее количество вызывает смерть в течение нескольких минут [3, 4].

Из искусственных радиоактивных изотопов натрия наибольшее практическое значение имеют ^{22}Na и ^{24}Na , основные свойства которых и ПДК даны в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Основные свойства радионуклидов, образующихся при облучении флиака нейтронами

Радионуклид	Состояние нуклида в соединении Р — растворимое, НР — нерастворимое	Период полураспада	Предельно допустимое поступление радионуклида в организм, мкК за год	Допустимая концентрация радионуклида в воздухе рабочей зоны, Ки/л	Допустимая концентрация радионуклида в атмосферном воздухе или воде, Ки/л	Допустимая концентрация радионуклида в атмосферном воздухе или воде, Ки/л	Группа радиационной опасности
^{18}F	Р	1,87 ч	$1,3 \cdot 10^4$			$5 \cdot 10^{-7}$	Г
^{22}Na	НР	1,87 ч	$6,4 \cdot 10^3$	$2,6 \cdot 10^{-9}$	$8,7 \cdot 10^{-11}$		В
	Р	2,6 г.	$4,3 \cdot 10^2$			$3 \cdot 10^{-8}$	
^{24}Na	НР	2,6 г.	21	$8,4 \cdot 10^{-12}$	$2,9 \cdot 10^{-13}$		В
	Р	15 ч	$3,1 \cdot 10^3$			$2,8 \cdot 10^{-8}$	
^{42}K	НР	15 ч	$3,6 \cdot 10^2$	$1,4 \cdot 10^{-10}$	$4,9 \cdot 10^{-12}$		В
	Р	12,4 ч	$5 \cdot 10^3$			$2 \cdot 10^{-8}$	
^{232}Th	НР	12,4 ч	$2,7 \cdot 10^2$	$1,1 \cdot 10^{-10}$	$3,7 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-8}$	Г
	Р	$1,4 \cdot 10^{10}$ лет	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-15}$	$2,5 \cdot 10^{-17}$	$2 \cdot 10^{-11}$	
	НР	$1,4 \cdot 10^{10}$ лет	$1,2 \cdot 10^{-2}$				

Фторид калия. Представляет собой бесцветные кристаллы, хорошо растворяющиеся в воде. По своему токсическому действию подобен фториду натрия. Из радиоактивных изотопов калия наибольшее практическое значение имеют ^{40}K (входящий в состав природного калия) и искусственный ^{42}K , основные свойства которых и ПДК даны в табл. 2.

Фторид лития. Представляет собой бесцветные кристаллы, хорошо растворяющиеся в воде. По своему токсическому действию подобен фториду натрия. Радиоактивные изотопы лития не представляют радиационной опасности для человека, так как имеют малый период полураспада. ПДК фторидов в воздухе 1 мг/м^3 (в пересчёте на фтористый водород HF).

Токсические свойства тория и его соединений. Основной природный изотоп тория ^{232}Th — естественный альфа- и гамма-излучатель. Токсическое действие тория проявляется как за счёт ионизирующего излучения, так и вследствие его химической токсичности. Фторид тория ThF_4 нерастворим в воде. Присутствие фторида тория в воздухе вызывает поражение кожи и верхних дыхательных путей, а также внутренних органов. Опасно длительное присутствие тория и его химических соединений в организме человека. Основные свойства ^{232}Th даны в табл. 2. ПДК тория в воздухе $0,05 \text{ мг/м}^3$.

ОРГАНИЗАЦИЯ МОНИТОРИНГА ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ПРОМПЛОЩАДКЕ ТИН

Указанные ПДК для фтора и фторидов являются весьма жёсткими и свидетельствуют о необходимости их постоянного или регулярного мониторинга в воздухе рабочей зоны и промплощадки ТИН. Для этого во всех производственных и санитарно-бытовых помещениях, а также на промплощадке должны быть установлены соответствующие приборы. Необходим также контроль содержания фторидов на поверхностях помещений.

Следует отметить, что в настоящее время отсутствуют допустимые концентрации для флиака в целом. Неясно также, что он представляет собой в санитарно-гигиеническом отношении, каковы его токсические свойства. Эти вопросы необходимо тщательно исследовать. Тем более необходимо исследовать вопросы безопасного обращения с активированным флиаком, подвергшимся нейтронному облучению. В нём будут образовываться тритий и уран. Для флиака такого состава также необходимо разработать предельно допустимые концентрации и создать технологию безопасного обращения с ним и соответствующие приборы для мониторинга.

Радиационная стойкость флиака исследовалась на специальной реакторной установке [6]. Опыты показали, что общее газовыделение из флиака мало и в основном определяется не радиолизом, а ядерными реакциями на ^6Li с образованием гелия и трития. Флиак можно считать радиационно-стойким материалом. Тем не менее система мониторинга должна быть готова к измерению количества и качества выделившихся из флиака газов. Следует отметить, что в [6] исследовался флиак не того состава, который предполагается применить в ТИН. Возможно, из интересующего нас флиака газовыделение будет больше.

ТЕХНОЛОГИИ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ФЛИАКА И ОБРАЩЕНИЯ С НИМ

Приготовление флиака. Флиак состава $46,5\text{LiF} + 11,5\text{NaF} + 42\text{KF}$ использовался при проведении опытов на стенде «Солярис» [7]. При его приготовлении использовались фториды лития и натрия в безводном виде, а фторид калия в виде гидрата. Для получения качественного флиака и исключения вредного влияния примесей необходимо использовать фториды высокой чистоты. Из-за повышенной коррозионной активности фтористых солей при наличии в них влаги возникла необходимость их дегидратации перед загрузкой в установку. Это было сделано с помощью сухого вакуумного обезвоживания с контролируемым подогревом. Подготовленная порция солевой композиции засыпалась в сливной бак и плавилась при непрерывном вакуумировании. Затем полученный флиак передавливался в другой бак через фильтры грубой и тонкой очистки и в дальнейшем использовался для проведения гидродинамических, теплофизических и технологических исследований. Следует отметить, что технология приготовления флиака требуемого состава весьма сложна и требует высокой квалификации персонала.

Техника безопасности при изготовлении флиака. По причине токсичности исходных компонентов флиака при его изготовлении основным неблагоприятным фактором является их пыль. Основные гигиенические мероприятия должны быть направлены на локализацию и герметизацию источников пылевыделения. Необходима максимальная механизация всех технологических операций. С целью защиты органов дыхания работников от пыли флиака и его компонентов следует применять респираторы типа «Лепесток». Работники должны быть обеспечены спецодеждой. Для защиты кожи рук желательно использовать перчатки и защитные мази. Помещение, где производится изготовление флиака, а также технологические участки с возможным пылеобразованием должны быть оборудованы приточно-вытяжной вентиляцией и комплексом аппаратуры для контроля содержания вредных примесей в воздухе, на коже и одежде работников. В этом помещении должен быть организован санитарно-пропускной режим с дозиметрическим контролем.

Транспортирование и хранение исходных компонентов флиака следует производить в соответствии с требованиями стандартов и технических условий на применяемые материалы. Хранение образующихся отходов и их утилизацию следует осуществлять согласно требованиям санитарных правил.

ВОЗМОЖНЫЕ АВАРИИ, СВЯЗАННЫЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФЛИАКА В ТИН

Первыми ядерными реакторами, где использовались топливные соли, были созданные в США ARE и MSRE. По литературным данным, на этих установках не произошло ни одной аварии, хотя MSRE проработал более 15 000 ч. На советских стендах «Курс-2» и «Солярис» также не было аварий, правда, потребовалась замена отдельных элементов оборудования [8].

Бланкет ТИН, содержащий флиак, является глубоко подкритичной системой, поэтому ядерные аварии в нём можно исключить.

Наиболее вероятной является авария с разгерметизацией контура циркуляции (либо первого, либо второго) и истечением флиака из него. В этом случае, в зависимости от уровня энерговыделения в флиаке, возможны два сценария. Если энерговыделение невелико, флиак стечёт в дренажный бак и застынет там, а возможно, и прямо на полу реакторного помещения. В случае, если энерговыделение достаточно велико, флиак стечёт в дренажный бак и будет застывать благодаря действию штатной системы охлаждения.

Возможен случай, когда нейтронная нагрузка в реакторе увеличится и, соответственно, возрастёт температура флиака. В этом случае расплавится замерзающий клапан и флиак стечёт в дренажный бак. К тем же последствиям приведут прекращение циркуляции флиака в первом контуре и потеря стока тепла во второй контур, приводящая к росту температуры флиака в первом контуре.

В флиаке отсутствует существенная запасённая химическая энергия. Он взрыво- и пожаробезопасен, поэтому не следует опасаться соответствующих аварий. Авария с разрушением теплообменника между первым и вторым контуром приведёт к взаимодействию флиаков разного химического состава, но их взаимодействие, как ожидается, будет слабым и не приведёт к опасным последствиям.

Взаимодействие флиака с водой и воздухом, по литературным данным, является слабым, но в принципе может утяжелить последствия аварии с разгерметизацией контуров.

Отказ системы слива флиака в дренажный бак приведёт к его разогреву. Поэтому необходимо предусмотреть автономную систему аварийного охлаждения флиака.

ВЫВОДЫ

Применение в бланкете ТИН смеси солей типа флиак возможно, но требует проведения большого комплекса исследований. Необходимо теоретически и экспериментально разработать оптимальный для данной задачи химический состав флиака. Следует тщательно отработать технологию изготовления больших количеств флиака требуемого состава и скрупулезно исследовать его свойства (ядерно-физические, теплофизические, химические, включая вопросы его взаимодействия с воздухом, водой, конструкционными материалами и флиаком другого химического состава). Необходимо определить токсические свойства флиака и создать безопасную технологию обращения с ним, включая облучённый флиак, а также исследовать влияние на его свойства примесей в исходных компонентах. Требуется исследовать все возможные аварийные ситуации, связанные с применением флиака в ТИН.

REFERENCES

1. **Novikov V.M., Prusakov V.N., Blinkin V.L. Chuvilin D.Yu.** Molten salt blankets of fusion reactors: the advantages and problems — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 1985, issue 4, p. 19 (in Russian).
2. **Report** on scientific research «Development of preliminary specifications of the schematic design of a demonstration fusion neutron source (FNS)». Phase 3 (Intermediate). Moscow, NRC «Kurchatov Institute», 2011 (in Russian).
3. **Harmful chemicals.** Inorganic compounds of elements of V—VIII groups. Reference book. Ed. by prof. V.A. Filov. — L.: Khimiya (Chemistry), 1989 (in Russian).
4. **Harmful substances in industry.** Vol. 3. Inorganic and hetero organic compounds. Reference book — L.: Khimiya (Chemistry), 1977 (in Russian).
5. **Radiation safety regulations (NRS-99)** — Informational and Publishing Centre of the Ministry of Health of Russia, Moscow, 1999 (in Russian).
6. **Brayko V.D. et al.** Investigation of radiation resistance of fluoride fuel compositions in a nuclear reactor. — VANT. Ser. Atomno-vodorodnaya energetika i tekhnologiya (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Atomic-Hydrogen Energy and Technology), 1981, issue 3, p. 70 (in Russian).
7. **Abalin S.S. et al.** Technological research on molten salt circulation stand «Solyaris». — VANT. Ser. Atomno-vodorodnaya energetika i tekhnologiya (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Atomic-Hydrogen Energy and Technology), 1981, issue 3, p. 66 (in Russian).
8. **Novikov V.M., Ignat'ev V.V. et al.** Molten salt NPF: prospects and problems. — M.: Energoatomizdat, 1990 (in Russian).

AUTHORS

Pashkov A.Yu. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia. Pashkov_AY@nrcki

Received 19 July 2012
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2012, issue 3, pp. 36—40.