

НАТРИЕВЫЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ В ТЕХНОЛОГИИ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ

В.М.Поплавский, Р.П.Баклушин, В.Н.Иваненко

ГНЦ РФ- Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



В статье рассматривается современное состояние использования натрия как теплоносителя в ядерной технологии.

Обсуждаются вопросы, связанные с обеспечением требуемого качества теплоносителя (реакторная чистота), пожарной безопасности. Анализируются экологические аспекты применения натрия, включая радиационную безопасность АЭС.

ВВЕДЕНИЕ

Натрий как теплоноситель всегда привлекал внимание инженеров-разработчиков энергетических и промышленных установок благодаря своим хорошим теплофизическим (высокая теплоемкость и теплопроводность) и технологическим (сравнительно низкая температура плавления и высокая температура кипения при атмосферном давлении, низкая коррозионная активность) свойствам.

Особую актуальность вопросы использования натрия в качестве теплоносителя приобрели в связи с потребностями атомной энергетики.

Как известно, вопрос о выборе теплоносителя для реакторов на быстрых нейтронах является важнейшим. Поэтому на заре развития проблемы ему было уделено много внимания. При анализе возможных теплоносителей взвешивались все аспекты: физические, теплофизические, коррозионные и др. Были подробно изучены водяной пар, газы (особенно гелий), жидкометаллические теплоносители (ртуть, свинец и его сплавы, литий и др.). При этом был принят во внимание весь промышленный опыт использования этих сред.

По комплексу свойств был сделан выбор в пользу натрия, несмотря на хорошо известные его свойства - активное взаимодействие с кислородом воздуха и водой. К тому моменту, когда был сделан окончательный выбор, были сооружены и эксплуатировались несколько экспериментальных установок с использованием ртути и натрия-калия. Этот опыт также говорил в пользу натрия.

Развитые страны, в которых практически одновременно начались исследования по проблеме быстрых реакторов (США, СССР, Англия, Франция) независимо друг от друга пришли к мнению о том, что именно натрий является наиболее оптимальным теплоносителем для быстрых реакторов.

Освоение технологии натрия в быстрых реакторах шло достаточно быстро. В течение менее чем 10 лет во всех странах были подтверждены основные фундаментальные физические, теплофизические, коррозионные и другие свойства натрия и получены первые и весьма обнадеживающие сведения о технологии натрия в условиях эксплуатации и ремонта основного оборудования.

Тем не менее, проводились исследования по поиску альтернативных теплоносителей для быстрых реакторов. Предлагались водяной пар, гелий (проработки закончились на уровне концептуальных исследований), диссоциирующий газ N_2O_4 (исследования были приостановлены после выявившихся серьезных коррозионных процессов в экспериментальной установке), в последнее время - тяжелые теплоносители (свинец и сплав свинец-висмут).

И все же необходимо констатировать, что в настоящее время натрий является единственным теплоносителем, в достаточной степени и успешно освоенным в технологии АЭС с реакторами на быстрых нейтронах.

Ниже рассматривается современное состояние различных аспектов использования натрия как теплоносителя.

ТЕХНОЛОГИЯ НАТРИЕВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Как указано выше, практически все вопросы, связанные с использованием натрия в качестве теплоносителя, к настоящему времени достаточно обоснованы на стендах, прошли многолетнюю отработку в условиях экспериментальных реакторных установок, а затем и АЭС.

В заводских условиях отработана технология получения теплоносителя реакторной чистоты (путем электролиза дешевого и доступного хлористого натрия). Затраты электроэнергии на получение 1 кг натрия не превышают 12,5-13,5 кВт.ч.

Решены вопросы транспортировки натрия с завода-поставщика на АЭС в специальных железнодорожных цистернах объемом около 35 м³. Причем отработаны также меры безопасности при перевозке, включая аварийные ситуации на железнодорожном транспорте.

Созданы и проверены в условиях АЭС технологические процессы приемки и накопления, а также очистки до необходимого уровня значительных количеств натрия, требуемых для заполнения циркуляционных контуров. Так на АЭС БН-600 за 8 мес. было подготовлено 1800 т натрия, при этом максимальная скорость накопления превышала 300 т теплоносителя в месяц.

В натрии содержится в качестве примесей большое количество химических элементов. Однако концентрация большинства из них невелика и они не оказывают существенного влияния на работоспособность оборудования. Исключение составляет небольшая группа примесей, которые требуется контролировать и ограничивать их присутствие. Наиболее важными из неметаллических примесей являются кислород, углерод, водород, азот, из металлических - калий, кальций, свинец, олово, цинк, серебро. Контроль примесей осуществляется как путем отбора проб с последующим химическим анализом, так и различными непрерывными методами. Точность измерения - до сотых и тысячных долей мг/кг. Для очистки натрия от примесей используются простые по конструкции проточные холодные ловушки.

Проблемы коррозии сталей, связанные с использованием в качестве теплоносителя натрия к настоящему времени решены. В зависимости от типа стали, температурных условий и других эксплуатационных параметров скорость коррозии изменяется в пределах 10^{-5} - 10^{-3} мг/см² ч. Это соответствует скорости утонения стенки оборудования, работающего в натриевых контурах АЭС 10^{-4} - 10^{-2} мм/год.

Поддержание натрия в расплавленном состоянии осуществляется системой электрообогрева с автоматическим регулированием заданного температурного режима.

Разработана и проверена на практике в условиях АЭС технология проведения ремонтных работ на оборудовании, контактирующем как с радиоактивным, так и нерадиоактивным натрием. Использование ремонтных защитных скафандров, в которых транспортируется извлекаемое из контуров оборудование, позволяет нейтрализовать воз-

действие радиации. Возгорание натрия (при отсутствии нарушений технологии) исключается применением инертных защитных газов.

Отработаны, наконец, способы уничтожения отходов, отмывки и дезактивации оборудования с использованием воды, водяного пара, парогазовых смесей, легких и тяжелых спиртов и т. д.

ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ НАТРИЯ

Горение натрия может возникать в случае разуплотнения соответствующих контуров и течи натрия из них наружу. Не всякая течь приводит к горению, т.к. температура воспламенения натрия на воздухе 180-200°C. Но поскольку рабочие температуры в технологических системах находятся на уровне 300-500 °C, течи при работе АЭС в энергетическом режиме часто сопровождаются загоранием. Поэтому обсуждая опасность такого горения, надо ответить на три вопроса: насколько опасно само горение натрия, какова вероятность больших утечек теплоносителя и есть ли надежные меры для обнаружения и тушения горения.

Параметры натрия как горючего вещества и, для сравнения, некоторых других веществ приведены в табл.1. Из нее видно, что среди горючих веществ натрий занимает одно из последних мест по тепловому эффекту реакции и скорости горения. Температурные эффекты натриевого горения гораздо ниже, чем для обычных горючих веществ [1]. Это снижает разрушительный эффект горения и облегчает его тушение. В частности, при выливах до десятков литров к разлитому и горящему нерадиоактивному натрию можно подойти вплотную и тушить его, засыпая порошковым составом.

Расчетный анализ и длительный опыт эксплуатации натриевых контуров говорят о том, что течи из них являются довольно редким событием. Наиболее частыми причинами течей являются дефекты металла оборудования или трубопроводов, усталостные трещины из-за недостаточной компенсации температурных расширений и ошибки персонала при разогреве систем с замороженным натрием. При этом принципиально важно, что дефекты малы по размерам; такие дефекты часто вообще не приводят к загоранию теплоносителя, т.к. вытекающий натрий окисляется и образовавшиеся окислы закупоривают трещину.

Подчеркнутая выше малость дефектов связана со следующим. Натриевые трубопроводы и корпуса оборудования выполняются из пластичной нержавеющей стали. Толщина стенок такова, что возникающие при рабочих режимах напряжения в несколько раз ниже допустимых. Все соединения выполняются на сварке. Рабочие давления в напорной части контура не превосходят несколько атмосфер, т.е. нет источников энергии, могущих вызвать большой разрыв. С другой стороны, натрий не вызывает заметной коррозии применяемых сталей во всем диапазоне рабочих температур. Все это приводит к весьма низкой вероятности течей натрия.

Таблица 1

Характеристики некоторых горючих веществ

Горючий материал или вещество	Скорость горения, кг/м ² ·ч	Тепловой эффект, кДж/кг
Бензин	160-200	41870
Дизельное топливо	150	41870
Древесина	54	13800
Мазут	126	38700
Резина	40	33500
Натрий	42-63	10900

Крупные течи натрия (разрушения, эквивалентные полному сечению трубопровода) возможны в случае полного и длительного отказа систем контроля и непринятия мер эксплуатационным персоналом, либо при разрушениях здания АЭС от внешних причин. Оценки вероятности таких ситуаций дают значение порядка 10^{-7} 1/реактор.год. Ниже описаны меры, принимаемые для ограничения последствий и в таких маловероятных случаях.

Для обнаружения течи и горения натрия используются устройства, основанные на обнаружении электрического замыкания вытекающим натрием токоведущих проводников электрообогрева, контроле за температурой газовой среды технологических помещений, контроле появления дыма в них с помощью дымоизвещателей, а для систем с радиоактивным натрием - контроле появления аэрозольной радиоактивности в трубопроводах вытяжной вентиляции. Эти системы позволяют надежно обнаруживать факт течи и горения натрия. При формировании сигнала о течи дается команда на автоматическое срабатывание систем, обеспечивающих локализацию горения в пределах аварийного технологического помещения, включение устройств фильтрации аэрозольных продуктов горения, отсечение аварийной натриевой системы.

Пожаротушение натрия обеспечивается, в первую очередь, пассивными средствами, основанными на эффекте самотушения [2]. Используется герметизация помещений, что предотвращает натекаание кислорода воздуха извне и обеспечивает снижение концентрации кислорода до огнегасительного значения. Применяются системы сливного пожаротушения, основным элементом которых являются емкости из нержавеющей стали, расположенные под технологическими помещениями, где, в принципе, возможны крупные выливы теплоносителя. Вылившийся натрий расплавляет легкоплавкую мембрану, закрывающую дренажную линию, и самотеком сливается в емкости, где из-за недостатка кислорода гаснет. В других случаях используется система поддонов самотушения. Наконец, возможно применение ручных (огнетушители) или стационарных систем порошкового тушения. Отечественная и мировая практика показала достаточность этих мер.

При натриевом пожаре не происходит разрушения бетонных строительных конструкций и распространения натрия в смежные помещения.

Предотвращение прямого контакта натрия с бетоном обеспечивается облицовкой поверхностей пола и нижней части стен стальными листами. Тепловое воздействие ослабляется слоем теплоизолирующих материалов.

Отметим в заключение, что в общую пожарную опасность АЭС с БН натрий вносит неопределяющий вклад.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАТРИЯ

Эти вопросы сводятся, в основном, к ограничению распространения продуктов горения натрия и предотвращению выбросов продуктов реакции натрия с водой в парогенераторе при нарушении герметичности его поверхности теплообмена.

При горении натрия в атмосфере образуются оксиды, которые затем переходят в гидроксид. Далее, при взаимодействии с углекислым газом воздуха, гидроксид постепенно трансформируется в карбонат. Главную токсическую опасность представляет гидроксид. В связи с этим необходимо принимать меры к ограничению количества образующихся продуктов горения в помещениях натриевых систем и предотвращению их выхода в атмосферу, о чем говорилось выше.

С точки зрения обсуждаемых вопросов процесс взаимодействия натрия с водой при течах в парогенераторах АЭС требует рассмотрения в двух направлениях: предотвращения разрушения элементов натриевого контура из-за аварийного повышения давления в парогенераторе (следствие - горение натрия), и исключение выброса натрия и токси-

чески опасных продуктов реакции натрия с водой в окружающую среду через системы защиты парогенератора.

Проведенный комплекс расчетно-экспериментальных исследований аварийных процессов в парогенераторе натрий-вода позволил к настоящему времени создать надежную систему его защиты [3]. Устройства, входящие в эту систему, своевременно фиксируют малые течи воды в натрий и предотвращают их переход в большие, исключают повышение давления в натриевом контуре сверхдопустимого. Двухступенчатая система сброса и сепарации продуктов реакции, входящая в систему защиты парогенератора, эффективно сепарирует и улавливает жидкие фракции (Na , Na_2O , NaH , NaOH) и сбрасывает водород за пределы парогенераторного бокса.

Опыт около 80 течей, имевших место на парогенераторах отечественных (БН-350, БН-600) и зарубежных ("Феникс", PFR) АЭС, подтвердил правильность и достаточность выбранных технических решений.

НАТРИЙ И РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ АЭС

В процессе работы БР в теплоносителе первого контура вследствие активации натрия и содержащихся в нем примесей, поступления в теплоноситель продуктов деления, коррозии конструкционных материалов накапливаются различные радиоактивные нуклиды. Радиационная обстановка определяется, в основном, изотопами натрия, цезия и ^{131}I .

Особенностью натриевого теплоносителя является его способность удерживать летучие радионуклиды. При работе ловушки окислов происходит эффективная очистка теплоносителя от йода и трития. Для очистки от изотопов цезия применяется система, основанная на использовании специального графита.

Основная масса натрия первого контура (95-100%) в проектах современных АЭС с БН находится в баке реактора. Чтобы не допустить оголения активной зоны при маловероятном разуплотнении бака, корпус реактора окружен равнопрочным с ним страховочным кожухом. Таким образом, радиоактивный натрий заключен в сосуд с двойной стенкой.

В некоторых проектах за пределами корпуса реактора располагаются вспомогательные системы. Это устройства контроля и очистки примесей, контроля герметичности оболочек твэл. Маловероятный выход натрия за пределы контура связан с разуплотнением именно этих систем.

При горении натрия I-го контура и сопутствующем отказе локализирующих систем безопасности возможны выбросы радиоактивных натриевых аэрозолей в атмосферу. Были проведены предельные оценки доз облучения населения в результате таких выбросов. Для конкретных условий быстрого реактора типа БН-800 (вылив и горение 1 м^3 радиоактивного натрия) эффективная доза за первый год после аварии на расстоянии 20 км от точки выброса составит 0.008 бэр (0.08 мЗв). Согласно НРБ-96 [4], при этом не требуется проведение каких бы то ни было защитных мероприятий.

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ НАТРИЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ АЭС

Показателем завершенности натриевой технологии является эксплуатационная надежность и безопасность работы оборудования натриевых контуров.

Наиболее характерным в этом плане является опыт эксплуатации АЭС с реактором БН-600. При имевших на установке случаях взаимодействия натрия с водой в парогенераторе и протечках натрия на контурах, безопасность АЭС была полностью обеспечена с помощью вышеупомянутых в статье инженерно-технических решений.

Для течей воды в натрий в парогенераторе можно отметить следующее:

- из 72 модулей течи воды в натрий имели место в 12 (преимущественно в первые годы эксплуатации);
- только в 1 случае блок останавливался из-за того, что перед течью он работал на 2-х петлях;
- только в 3-х случаях останавливалась дефектная петля и мощность реактора снижалась до 67 % от номинала;
- в остальных 8 случаях отключалась дефектная секция; дефектная петля и реактор в целом оставались в работе на номинальной мощности.

Изложенное дает возможность утверждать, что освоена технология, которая нейтрализует обсуждаемый недостаток натрия в условиях его применения в нерадиоактивном втором контуре.

Что касается течей натрия из контуров в помещения, то таких случаев на БН-600 было 27 [5], в том числе 5 из систем с радиоактивным натрием. Объем утечки натрия в 21 случае не превышал 10 л, в трех случаях он был не более 100 л и в трех остальных составлял 300, 650 и 1000 л. В одном случае (31.12.90 г.) при течи натрия через кольцевую сквозную трещину длиной 30 мм штуцера модуля парогенератора из-за пропуска отсечной арматуры диаметром 300 мм количество пролитого натрия составило 650 л. Течь прекратилась через 4 сут. после замораживания натрия в подводящих трубопроводах к секции парогенератора. Процесс утечки и горения натрия протекал достаточно спокойно и не препятствовал действиям персонала.

Наиболее серьезное нарушение было с течью натрия (около 1000 л) на трубопроводе вспомогательной системы очистки натрия I контура диаметром 48 мм, которая произошла 07.10.93г. с выбросом 10.7 Ки натрия-24 в окружающую атмосферу.

Приведенный опыт показывает, что утечка и горение натрия легко обнаруживаются, а их последствия эффективно локализуются даже при больших массовых разливах. Каких-либо последствий для металлических или строительных конструкций не обнаружено.

Данные по эксплуатационной надежности натриевого оборудования на отечественных реакторах на быстрых нейтронах приведены в табл.2. Нарботанный ресурс изме-

Таблица 2

Максимальный по данному типу натриевого оборудования ресурс без капитального ремонта (часы)

Установка \ Оборудование	БР-10	БОР-60	БН-350	БН-600
Несменяемое оборудование				
• корпус реактора	150.000	200.000	170.000	120.000
• трубопроводы I к	300.000	200.000	170.000	120.000
Натриевые насосы	170.000 (электромагнитные)	130.000 (механические)	100.000 (механические)	100.00 (механические)
Промежуточные теплообменники	300.000	200.000	170.000	120.000
Парогенераторы	-	Опытные модели разных типов парогенераторов	150.000	105.000

ряется сотнями тысяч часов, что вполне достаточно для обеспечения необходимой работоспособности промышленных АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы пожарной теплофизики. - М.: Стройиздат, 1978.
2. *Выломов В.В. и др.* Опыты по тушению больших количеств горящего натрия//Атомная энергия. – 1977. - Т.43. - Вып.4. – С.286.
3. *Поплавский В.М., Козлов Ф.А.* Безопасность парогенераторов натрий-вода. - М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. Нормы радиационной безопасности (НРБ-96) . - М.: Госкомсанэпиднадзор России, 1996.
5. *Сараев О.М. и др.* Опыт эксплуатации энергоблока с БН-600//Атомная энергия. – 1996. - Т.80. - Вып.5. - С.330.

Поступила в редакцию 27.05.99.

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 530.1: 536.4

Fluctuation Theory of Microheterogeneity of Liquid Metal Coolants \A.L. Shimkevich; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 11 pages, 4 illustrations. - References, 32 titles.

A theory of the nonheterogeneous melts based on the calculus of variations of the Landau two parameters potential as a functional for density and composition fluctuations of a binary system is presented in this paper. Using diagram technique and "bootstrap" method, the Green functions for these fluctuations are obtained and their correlation radii are analyzed as a function of impurity concentration and model parameters.

It is shown that such the system in some conditions is characterized by impurity microheterogeneity.

УДК 621.039.534

Sodium Coolant in the Fast Reactor Technology \V.M. Poplavsky, R.P. Baklushin, V.N. Ivanenko; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 7 pages, 2 tables. - References, 5 titles.

The modern state of usage of sodium as coolant for NPP is considered. It is shown that the problems of technology of the sodium coolant, fire safety and quenching of sodium fires, interaction of sodium with water in steam generators, ecological and radiation safety are successfully solved. Methods of solution problems are briefly discussed.

УДК 621.039.534.6

Hydrogen and Sodium-Potassium Alloys \M.N. Arnoldov, M.N. Ivanovski, V.A. Morozov, S.S. Pletenets; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 9 pages, 1 table, 4 illustrations. - References, 8 titles.

Authors data on solubility of hydrogen in the sodium-potassium eutectic alloy and an analysis of oxygen influence on hydrogen solubility parameters in the sodium-potassium system is presented in this paper. The standard data is determined.

УДК 621.039.534.63

Chromium and Nickel Mass Transfer in a Circulating Sodium Loop \V.V. Alekseev, F.A. Kozlov, Yu.I. Zagorulko, N.D. Kraev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 7 pages, 3 tables, 5 illustrations. - References, 5 titles.

Description of the model of impurities mass exchange in cooled channels of the circulating sodium loop is given. On the hightemperature section of experimental sodium loop the examinations of transfer of nickel and chromium formed by dissolution of nickel, chromium and stainless steel in sodium are made. On the basis of these experiments physical constants describing the mass transfer of the impurities depending on dissolving materials are obtained. Mutual influence of the impurities on their mass transfer in sodiums is shown.

УДК 541.15

Corrosion and Mass Transfer of Structural Materials in Sodium and Sodium-Potassium Coolants \N.D. Kraev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 9 pages, 2 tables, 3 illustrations. - References, 28 titles.

Experimental results on the influence of temperature, flow velocity, oxygen and corrosion product concentration in sodium and sodium-potassium (22% sodium) coolants on corrosion resistance of various reactor materials is generalized in this paper.

УДК 621.039.533 : 519.55

The Diffusion Model of Intergranular Corrosion of Steels in Alkali Metals \I.V. Pyshin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 7 pages, 3 illustrations. - References, 8 titles.

The process of intergranular corrosion in loops with liquid metal coolant has been simulated. The coolant penetration to a structural material is considered at edge graph of the polycrystalline structure of a loop material.

УДК 621.039.7 (088.8)

Neutralization of a Radioactive Wastes of Alkali Metals by Processing in Alkaline Solution and Solidification in Geocement \S.N. Skomorokhova, E.Ey. Kononov, O.V. Starkov, E.A. Kochetkova, V.S. Kopylov, T.V. Poletakhina, E.M. Triphanova; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika"