

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ОГНЕЗАЩИТЫ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ МАШЗАЛОВ АЭС

Вахитова Л. Н.

Старший научный сотрудник
ИнФОРУ НАН Украины

Чеповский В. О.

Начальник НИЦ проблем пожаротушения и огнетушащих веществ УкрНИИПБ, г. Киев

Пожарная безопасность является одной из главных составляющих обеспечения всей системы безопасности атомных электростанций (АЭС). Пожары и взрывы на АЭС могут возникать при нарушении технологического режима, из-за неосторожного обращения с огнем, в результате допущенных нарушений при проектировании, строительстве, эксплуатации. Дополнительными факторами пожарной опасности объектов являются изношенность и старение значительной части технологического оборудования, снижение качества ремонта и производственной дисциплины, недостаточность как нормативной базы, так и финансовых ресурсов.

Основными факторами уникальности пожарной опасности АЭС являются:

- чрезвычайная уязвимость атомного реактора при пожаре (даже незначительный пожар может привести к неконтролируемому выбросу радиоактивных материалов в атмосферу);
- разложение под действием воды применяемых в атомной энергетике веществ и материалов, приводящее не только к усилению горения, но и к катастрофическим экологическим последствиям.

Одним из пожаро- и взрывоопасных узлов АЭС являются машинные залы, где в маслосистемах турбоагрегатов использу-

ются горючие масла, а в системе охлаждения турбогенераторов — горючий и взрывоопасный водород [1; 2]. Помимо этого пожароопасность машинных залов АЭС повышают:

- дизельное топливо и мазут, применяемые в резервных дизельных электростанциях;
- изоляция силовых и контрольных кабелей;
- короткое замыкание электрических кабелей;
- попадание масла на горячие участки оборудования;
- ошибки персонала в процессе ремонтных работ и проверок систем;
- горючие материалы, используемые в электрических устройствах и аппаратуре.

Согласно справочным данным водородная смесь с воздухом имеет следующие взрывоопасные свойства: область воспламенения — 4,12—75,4 об. %, минимальная энергия зажигания — 0,02 мДж, температура самовоспламенения — 783°K, нормальная скорость распространения пламени — 2,7 м/с, минимальное взрывоопасное содержание кислорода — 5 об. %. Поэтому горение водорода может сыграть решающую роль в разрушении или ускорении разрушения защитной оболочки реактора при аварии, связанной с разрывом главного циркуляционного трубопровода реактора, а также при аварии с полной потерей устройств безопасности.

В настоящее время система водородного охлаждения является единственно возможной для турбогенераторов большой мощности. Применение этой системы связано с необходимостью создания специальной маслосистемы — для подачи





масла к уплотнениям турбогенератора, предотвращающего утечку водорода из корпуса через уплотнения вала. В то же время использование масла в значительной степени повышает степень пожарной опасности в турбинном отделении.

В общем случае разрушение турбины приводит к проливу огромного количества масла, сопровождается выбросом водорода и возникновением пожара, который по классификационным параметрам можно отнести к самой высокой категории взрывопожарной и пожарной опасности. При этом аварийная ситуация может развиваться по граничным сценариям «взрыв — пожар» или «пожар — взрыв». По первому пути развития пожара при разрушении масляного уплотнения вала генератора возникает высокотемпературный (выше 2000°C) факел горения водорода с маслом, а по второму — наиболее вероятной причиной взрыва является накопление водорода в верхней части машинного зала при значительной его утечке. В любом случае мощные огневые потоки горящего масла в совокупности с температурным режимом водородного пламени представляют серьезную опасность для целостности и несущей способности как металлоконструкций, стропильных ферм кровли, так и колонн машинного зала. В этих условиях достижение критической температуры незащищенных металлоконструкций (500°C), а значит и их обрушение, может произойти в течение 1 минуты [4].

Анализ мирового опыта по возгоранию в машзалах АЭС [2; 3; 5] показывает, что механическое разрушение узлов турбоагрегатов является причиной 70 % пожаров. Утечки водорода с возгоранием и взрывом имели место в 18 % случаев с катастрофическими последствиями и гибелью обслуживающего персонала. Согласно статистике в странах СНГ и за рубежом в машзалах АЭС и тепловых электростанций, где используются турбоагрегаты

мощностью 50 МВт и более, за период с 1965 года зафиксировано 97 аварий, в том числе 31 пожар, 2 взрыва и 2 взрыва с пожарами. Результатом 22-х аварий стали обрушения кровли машинного зала, что составляет 21 % от общего количества аварий за этот период.

Для машзалов эксплуатируемых АЭС с ядерными реакторами типа ВВЭР установлена степень огнестойкости здания III-а.

Надо сказать, что проблема поиска оптимальных решений повышения огнестойкости ферм, перекрытий и несущих конструкций машзалов украинских АЭС имеет свою историю. В 1993 году по заказу Госкоматома Украины ВНИИПО МВД России выполнил научно-исследовательскую работу по теме «Предложения по защите несущих конструкций машзалов от воздействия опасных факторов пожара» [6]. Полученные в результате этой работы расчеты и созданная модель пожара показывают, что при разрушении уплотнения генератора истекающая в машзал горящая смесь водорода и масла достигает металлических ферм с нагреванием их до 500°C в течение 25—30 с, а температура в ядре горящего водородного факела составляет 2000°C.

При таком варианте пожара ВНИИПО рекомендует произвести сброс водорода из корпуса генератора в максимально короткое время после возникновения возгорания с целью понижения высоты факела и сокращения в целом времени теплового воздействия на металлоконструкции [6].

Необходимо особо подчеркнуть, что при возникновении пожара в машинном зале важна каждая минута сохранения несущей способности строительных конструкций. Это связано, прежде всего, со строго регламентированным действием автоматических систем управления и обслуживающего персонала в случае возникновения [1]. Мониторинг аварийных ситуаций в машзалах АЭС показывает, что при значительной разгерметизации генератора минимальное время от обнаружения утечки водорода до отключения генератора от электроснабжения составляет 2—7 мин. Время автоматического отключения трубопроводов достигает 2 мин., а ручного отключения — 5 мин. При сбоях в работе сиг-

нализации и защиты, а также при запаздывании персонала с принятием мер это время может увеличиваться.

Следовательно, одним из главных условий снижения необратимых последствий пожара в машинном зале является сохранение несущей способности металлоконструкций хотя бы в течение 2—5 мин. — времени, необходимого для обнаружения пожара и приведения в действие предусмотренных установок и противоаварийных средств. Поэтому необходимость повышения предела огнестойкости строительных конструкций путем обработки средствами огнезащиты очевидна, а правильность технических решений огнезащитной обработки в этом случае трудно переоценить.

В письме № 07-504.202.049.КР-Ф Киевского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института «Энергопроект», адресованного НПП «Спецматериалы», сообщается, что в 2005 году практически на всех АЭС Украины выполнена огнезащита ферм машинных залов до предела огнестойкости R 45. При этом подчеркивается, что использованные покрытия были испытаны в условиях стандартного пожара (рис. 1), максимальная температура которого не превышает 1000°C в течение 60 мин. после начала действия огня, что значительно ниже температуры водородного факела, мгновенно создающего температуру выше 2000°C. Одного этого факта достаточно, чтобы поставить под сомнение эффективность проведенных огнезащитных мероприятий. Кроме того, при сравнении стандартного и водородного пожаров нужно помнить, что процессы горения и взрыва водорода существенно отличаются по характерным пространственно-временным масштабам газодинамических течений и химических процессов, а также значительным влиянием геометрических факторов на характеристики

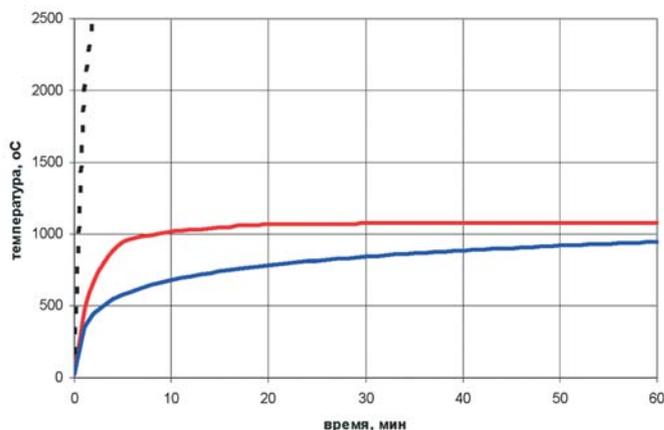


Рис. 1. Динамика среднеобъемной температуры в огневой камере при стандартном (синяя линия), углеводородном (красная линия) пожаре и взрыве водорода (пунктир) — расчетные данные

динамических воздействий и определяемые ими условия перехода горения в детонацию.

Наиболее популярные огнезащитные составы, которые применяются в мировой практике огнезащиты металлических конструкций, можно условно разделить на четыре основные группы (табл. 1).

Таблица 1. Характеристика основных средств огнезащиты

Средство огнезащиты	Механизм действия	Основные компоненты	Максимальный предел огнестойкости, мин.
Интумесцентные полифосфатные составы	Эндотермические процессы с образованием теплоизоляционного слоя	Полиол, полифосфаты аммония, газообразователь, полимерное связующее	90
Составы на основе терморасширяющегося графита	Вспучивание графита с образованием термостойкого и негорючего теплоизоляционного слоя	Терморасширяющийся графит, антипирен, полимерное связующее	60
Огнезащитные штукатурные смеси специального состава	Теплоизоляция	Перлит, вермикулит, огнеупорные волокна с наполнителями, минеральное вяжущее	240
Конструктивные огнезащитные материалы, плиты, сегменты, скорлупы, кирпичи	Теплоизоляция	Перлит, вермикулит, огнеупорные волокна с наполнителями, минеральное вяжущее	240

В этой же таблице приведены данные по максимальным пределам огнестойкости металлоконструкций, которые обеспечивают составы различных типов в условиях сертификационных испытаний, где предусмотрено воздействие стандартного (целлюлозного) пожара в соответствии с ДСТУ В 1.1.-4.

По информации производителей огнезащитных работ в течение последних 15-ти лет на АЭС Украины для огнезащиты несущих металлоконструкций машзалов были применены интумесцентные полифосфатные составы «Фламмопласт» и «Уни-терм» (Германия), «Протермстил» (Россия), состав на основе терморасширяющегося графита «Эндотерм ХТ-150» (Украина). Все эти составы использовались на основании данных сертификационных испытаний в условиях стандартного пожара. В последнее время для огнезащиты машзалов предлагается покрытие «Интерчар» (Швеция), которое было испытано в Великобритании в условиях углеводородного пожара.

Испытания при углеводородном пожаре согласно стандарту UL 1709 (Underwriters Laboratory, США) проводят для оценки устойчивости и огнестойкости несущих конструкций на объектах повышенной пожароопасности (железнодорожные и автомобильные тоннели, оборудование по добыче, переработке и транспортировке газа, нефти и нефтепродуктов). Данный

стандарт определяет критерии стойкости огнезащитных покрытий в условиях пожара, при котором температура 1000°C достигается в первые 7 мин. горения (рис. 1). Специально для оценки эффективности огнезащиты трубопроводов дополнительно применяется метод «прямого удара» реактивного пламени.

В некоторых странах, в частности США и Великобритании, углеводородный пожар стандартизирован для испытаний предела огнестойкости металлоконструкций наряду с общепринятым стандартным пожаром, что позволяет моделировать температурный режим, соответствующий горению нефти, нефтепродуктов или природного газа.

Здесь следует подчеркнуть, что испытание огнезащитного покрытия в условиях углеводородного пожара не является достаточным основанием для применения его в качестве огнезащиты металлических конструкций машинных залов АЭС. Как известно, одним из источников пожара является масло, которое и создает пожар, эквивалентный режиму углеводородного пожара. Однако, как было показано выше, температура горения водорода в первые минуты пожара превышает 2000°C [1], что может привести к самым непредсказуемым преобразованиям огнезащитного покрытия, выдержавшего испытания при 1100°C — максимальной температуре углеводородного пожара.

Сложностью прогноза поведения разных типов огнезащитных покрытий в условиях, приближенных к развитию аварийной ситуации в машзале, является принципиальная невозможность проведения натуральных крупномасштабных экспериментов при тепловом ударе пламени водорода. Тем не менее, возможен комплексный

подход моделирования условий водородного пожара, основанный на сочетании данных стандартных испытаний и изучении ряда физико-химических параметров огнезащитного покрытия в условиях пламени, температура которого превышает 2000°C.

С этой целью, по заказу института «Энергопроект» (письмо № 07-504.202.049.КР-Ф) и НПП «Спецматериалы», Региональным испытательным центром на безопасность строительных материалов и конструкций «Донстройтест» (г. Донецк) был проведен ряд испытаний по определению предела огнестойкости покрытий производства НПП «Спецматериалы» при воздействии на них пламени ацетилен-кислородной горелки. Протоколы всех испытаний с цветными иллюстрациями представлены на сайте НПП «Спецматериалы» [7].

В качестве объектов исследований были выбраны четыре типа покрытий, а также их комбинация (табл. 2).

Покрытия (№ 1—4) были нанесены на металлические образцы — пластины размером 150×150×5 мм с смонтированными термоэлектрическими преобразователями ТХА в середине образца. Плита огнезащитная была закреплена перед пластиной без покрытия (№ 5) и пластиной с покрытием «Эндотерм ХТ-150» (№ 6) на расстоянии 28 мм.

Цель эксперимента состояла в определении предела огнестойкости металлических образцов с огнезащитными покрытиями марки «Эндотерм» и без них при воздействии пламени ацетилен-кислородной горелки непосредственно в месте зачеканивания термоэлектрических преобразователей, а также определении времени от начала теплового воздействия до наступления предельного состояния образцов. За предельное состояние принимается достижение критической температуры стали испытываемых образцов, равной 500°C. После достижения этой температуры прекращали воздействие пламени на образец.

В качестве источника пламени использовали инжекторную ацетилен-кислородную горелку Airac M16x1 R 3/8 L 3.4991. Температуру пламени горелки измеряли до проведения испытаний на термоэлектрических преобразователях марки ТХА диаметром 4 мм. Определяемая температура пламени составляла выше 1700°C, дальнейшее определение температуры не представлялось возможным из-за оплавления преобразователей. По технической документации производителя горелки температура пламени достигает 2350°C [8].

На рис. 2 представлены результаты испытаний в виде графика зависимости тем-

Таблица 2. Предел огнестойкости покрытий производства НПП «Спецматериалы», испытанных в пламени ацетилен-кислородной горелки

№ п/п	Покрытие	Толщина покрытия, мм	Предел огнестойкости, с (500°С)
1	Покрытие огнезащитное вспучивающееся «Эндотерм 170205», полифосфатное интумесцентное, ТУ У 24.3-13481691-009-2004	2,0	40
2	Покрытие огнезащитное вспучивающееся «Эндотерм ХТ-150» на основе терморасширяющегося графита, ТУ У 13481691.01-97	2,06	122
3	Рулонное покрытие «Эндотерм ХТ-150» для воздуховодов, ТУ У 13481691.01-97	3,05	217
4	Огнезащитный штукатурный состав «Эндотерм 210104», ТУ У 24.313481691007-2003, нанесенный непосредственно на пластину	20,52	250
5	Плита огнезащитная «Эндотерм 210104», ТУ У 24.3-13481691007-2003, закреплена перед пластиной	20,0	732
6	Плита огнезащитная «Эндотерм 210104» — внешний слой, покрытие огнезащитное «Эндотерм ХТ-150» — внутренний слой	20,0 2,0	873
7	Металлическая пластина без покрытия	—	19

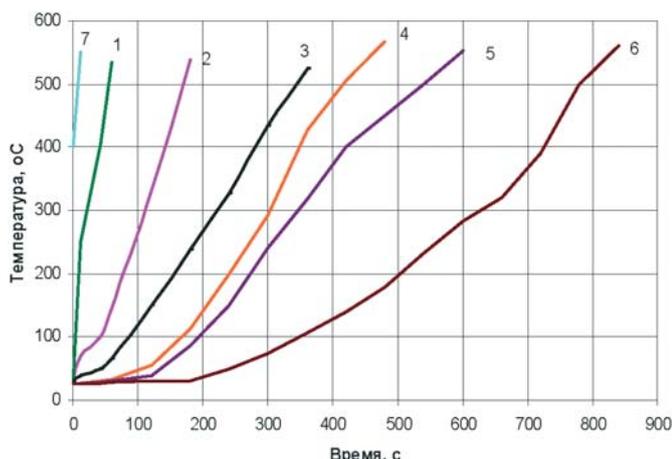


Рис. 2. Зависимость температуры металлических пластин от времени воздействия пламени ацетилен-кислородной горелки (номера кривых соответствуют номерам покрытий, приведенным в табл. 2)

пературы образцов от времени воздействия пламени. Результаты определенных пределов огнестойкости приведены в табл. 2.

Анализ данных рис. 2 позволяет сделать предварительные выводы о целесообразности использования огнезащитных покрытий различных типов для огнезащитной обработки металлических конструкций машзалов АЭС.

Покрытия интумесцентного типа, которые содержат полифосфат аммония, меламин и его производные, пентаэритрит, комплекс антипиренов и связующее, не оказывают огнезащитного действия в условиях термоудара при температуре пламени горения водорода (около 2000°С). Это заключение сделано на основе испытаний трех интумесцентных покрытий производства НПП «Спецматериалы», а также пяти аналогов импортного производства. Во всех случаях, независимо от типа испытываемой конструкции, предел огнестойкости (время достижения критической температуры 500°С) не превышает 65 с. Основная причина неэффективности интумесцентных покрытий — специфика механизма огнезащитного действия, которая заключается в согласованных

химических превращениях компонентов покрытия, приводящих к образованию теплоизоляционного теплоизоляционного слоя. В условиях термоудара происходит мгновенное термическое разложение участников ожидаемого химического процесса, покрытие выгорает без вспучивания, что приводит к моментальному разрушению металлической подложки (рис. 3.1).

Более оптимистичны прогнозы по использованию в качестве огнезащитного покрытия составов на основе терморасширяющегося графита, предел огнестойкости которых можно оценить как 2-3 мин., что в три раза превышает предел огнестойкости интумесцентных покрытий (табл. 2). На пластине (рис. 3.2) отчетливо

видно, что состав «Эндотерм ХТ-150» в условиях термоудара вспучивается, образует термоизоляционный слой, выгорание которого начинается через 2 мин. после начала воздействия пламени. Также ведет себя и модифицированный состав «Эндотерм ХТ-150», изготавливаемый в виде рулонного покрытия, который обеспечивает предел огнестойкости металлической пластины 4 мин. (№ 3).

На наш взгляд, наиболее приемлемыми для защиты металлических конструкций машинного зала от воздействия высоких температур водородного пламени являются толстослойные материалы — штукатурка № 4 и огнезащитная плита № 5. Разрушение покрытия и достижение металлом критической температуры происходит в первом случае через 5 мин. после начала воздействия пламени. При создании воздушного зазора между плитой и пластиной (№ 5) предел огнестойкости пластины составляет более 12 мин.

Однако, принимая во внимание, что возгорание в машзале может сопровождаться взрывом водорода, а соответственно и мощным разрушающим действием в отно-

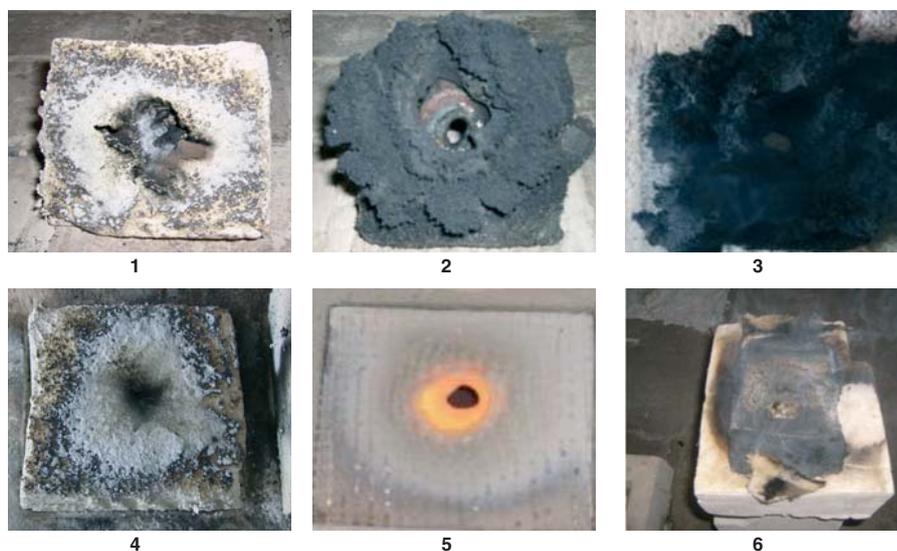


Рис. 3. Внешний вид пластин с огнезащитным покрытием после воздействия пламени ацетилен-кислородной горелки (номера фото соответствуют номерам покрытий в табл. 2)

шении плитных конструкционных материалов, закрепленных на расстоянии от металлической конструкции, наиболее надежной нам кажется двойная огнезащита (№ 6). Она достигается за счет того, что на поверхность металлической конструкции наносится материал «Эндотерм ХТ-150», который показал максимальную огнезащитную эффективность среди всех огнезащитных красок, и на определенном расстоянии (в опыте — 28 мм). Над слоем огнезащитного покрытия закрепляется экран в виде огнезащитной плиты «Эндотерм 210104». Повышение предела огнестойкости защищенной таким образом металлической пластины может осуществляться в двух предельных режимах аварийной ситуации. При сценарии «взрыв — пожар» огнезащитные плиты при разрушении снижают динамическую и тепловую нагрузку на покрытие «Эндотерм ХТ-150», которое, как следует из табл. 2, сохраняет свою огнезащитную эффективность в течение 2 мин. В случае развития в машзале водородного пожара огнезащитные плиты полностью прогорают в течение 12 мин., а за это время в пространстве воздушной прослойки под воздействием высоких температур формируется плотный теплоизоляционный слой покрытия «Эндотерм ХТ-150» (рис. 3.6), который добавляет еще 2 мин. до достижения критической температуры пластины (500°C).

«полученные результаты рекомендуются использовать при поиске оптимальных решений огнезащиты несущих металлоконструкций машзалов АЭС»

Полученные в данном исследовании результаты следует воспринимать как информацию о поведении огнезащитных составов различных типов при воздействии на них пламени ацетилен-кислородной горелки, которая создает температурный режим, сходный с температурным режимом горения водорода и водород-масляной смеси. Значения пределов огнестойкости, определенные в этих условиях, являются относительными величинами, позволяющими сделать предварительную оценку огнезащитной эффективности средств огнезащиты, представленных на рынке Украины. Тем не менее, полученные результаты рекомендуются использовать при поиске оптимальных решений эффективной огнезащиты несущих металлоконструкций машзалов АЭС.

Литература

1. Солдатов Г.Е., Голоднова О.С. О путях снижения риска пожаров в машинных залах АЭС // Атомкон. — 2009. — № 2 (3). — С. 42—46.
2. Ключников А.А., Кучинский К.А., Федоренко Г.М. Термомеханическое состояние элементов стержня обмотки статора турбогенератора типа ТВВ-1000-2у3 при снижении расхода охладителя // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2009. — Вип. 12. — С. 49—59.
3. Гальбурт В.А., Иванов М.Ф., Минеев В.Н., Фортов В.Е., Фунтиков А.И. Воздействие взрыва водорода на защитную оболочку реакторного зала АЭС // Математическое моделирование. — 2002. — Т. 14. — № 1. — С. 73—86.
4. Микеев А.К. Противопожарная защита АЭС. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
5. Пахомов С.А., Дубасов Ю.В. Оценка величины мгновенного энерговыделения при аварии реактора на ЧАЭС // Труды Радиевого института им. В.Г. Хлопина. — 2009. — Т. XIV. — С. 79—86.
6. Разработка предложений по защите несущих конструкций машзалов АЭС от воздействия опасных факторов пожара: Отчет / ВНИИПО МВД РФ; Договор от 13.11.1992 № 553. — М., 1993.
7. <http://www.endoterm.com.ua/>
8. www.belkrafting.by/?info=86&cat=1/