МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ И РИСКОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ – ОСНОВА ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Низкая наблюдаемость скрытых процессов деградации технического состояния производственных комплексов, протекающих вследствие износа и неадекватных действий технологического, обслуживающего и ремонтного персонала, является фундаментальной причиной проблем эксплуатации оборудования опасных производств. Анализ надежности технологических установок современных нефтеперерабатывающих и нефтехимических комплексов (НХК) показывает, что более трех четвертей отказов оборудования приходится на машинные агрегаты, высокая концентрация которых на установках нередко служит причиной инцидентов, аварий и производственных неполадок, вызывающих простои установок и снижающих коэффициент их технического использования и готовности. Часто на отечественных заводах он составляет 80% и ниже, что приводит к высоким эксплуатационным издержкам и потерям прибыли. Результаты оценки надежности по известным λ-характеристикам показывают, что вероятность отказа нефтехимического комплекса может достигать 50% в сутки. Для исправления этого положения необходимо обеспечить наблюдаемость и оценку технического состояния агрегатов при изготовлении в производстве и приемке на заводах-потребителях, в процессе ремонта в ремонтных подразделениях предприятий, при монтаже агрегатов и в процессе их эксплуатации на технологических установках. Чтобы развитие неисправностей стало наблюдаемым, необходима непрерывная диагностика с автоматической доставкой объективных результатов независимо от воли исполнителей лицам, ответственным за эксплуатацию оборудования. Система диагностики и мониторинга должна обнаружить эти неисправности, обеспечить наблюдение за их развитием и своевременно предупредить персонал о необходимости вывода оборудования в ремонт или экстренной его остановки. Существенное повышение надежности НХК без замены оборудования и реконструкции, как показывает опыт, можно обеспечить внедрением средств мониторинга на всех этапах жизненного цикла агрегатов. *Мониторинг технического состояния агрегатов позволяет перевести большинство отказов из категории внезапных для персонала установок в категорию постепенных за счет раннего их обнаружения* и оповещения персонала о развивающейся неисправности, которая уже существует, хотя, может быть, пока не является опасной и не нарушает работоспособности технологических установок НХК. Эксплуатационные потери можно сократить до минимума, проводя своевременное и целенаправленное техническое обслуживание на основе результатов мониторинга технического состояния оборудования, прежде всего динамического, в реальном времени. Это позволяет использовать в полной мере заложенный в оборудовании ресурс, исключив его внеплановую (аварийную) остановку и необоснованный ремонт, обеспечив высокий уровень безопасности и коэффициент технической готовности. Опыт разработки, внедрения и эксплуатации систем мониторинга состояния оборудования в реальном времени изложен в руководящем документе и стандартах, созданных в последние годы.

Серия стандартов «Мониторинг оборудования опасных производств» принята ассоциацией «Ростехэкспертиза», Ассоциацией нефтехимиков и нефтепереработчиков, Научно-промышленным союзом «РИСКОМ» и аттестована Независимым органом по аттестации документов по неразрушающему контролю, аккредитованным в Единой системе оценки соответствия в области промышленной, экологической безопасности, безопасности в энергетике и строительстве, согласована Ростехнадзором. На их основе разработаны федеральные стандарты [8–10, табл. 2].

Данные документы направлены на стандартизацию правил и процедур создания, внедрения и эксплуатации систем комплексного мониторинга (СКМ) оборудования опасных производственных объектов (ОПО), в первую очередь входящих в перечень федеральных законов, в том числе от 21.07.1997 №116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» и от 27.12.2002 №184-ФЗ «О техническом регулировании», и определяют основные принципы реализации комплексного мониторинга оборудования, подлежащего мониторингу, оценки состояния диагнос-

тируемого оборудования и классы систем мониторинга. Особое внимание уделено организационным мероприятиям: стандарт [8] определяет базовые принципы создания службы мониторинга надежности оборудования на предприятии.

Впервые в нормативных документах дано полное, не имеющее двусмысленной интерпретации определение понятия *мониторинга технического состояния,* под которым подразумевается *наблюдение за техническим состоянием агрегата (комплекса агрегатов) для определения и предсказания момента перехода в предельное состояние. Результат мониторинга объекта представляет собой совокупность диагнозов составляющих его субъектов (конструкция, машина, узел, механизм), получаемых на неразрывно примыкающих друг к другу интервалах времени, в течение которых состояние агрегата (комплекса агрегатов) существенно не изменяется.* Принципиальным отличием мониторинга состояния от мониторинга параметров является наличие в первом интерпретатора измеренных параметров в термины технического состояния *(конкретные неисправности)* – экспертной системы поддержки принятия решения о состоянии объекта и дальнейшем управлении. В системах мониторинга 1-го класса, используемых для всех агрегатов опасного производства, экспертные системы должны быть полностью автоматическими и обеспечивать обнаружение, определение и представление персоналу неисправностей оборудования без участия инженера-диагноста, что позволяет существенно увеличить интервал времени для выполнения персоналом компенсирующих мероприятий. Это особенно важно при высокой скорости деградации технического состояния оборудования.

Эти документы направлены на стандартизацию правил и процедур создания, внедрения и эксплуатации СКМ и призваны обеспечить надежную и безопасную ресурсосберегающую эксплуатацию оборудования ОПО, а также устанавливают основные организационно-технические принципы построения и реализации СКМ, определения категории оборудования, подлежащего мониторингу, в том числе содержат матрицу анализа риска, оценки состояния диагностируемого оборудования, классы СКМ, требования к службе мониторинга надежности оборудования.

Стандарты [4, 8] распространяются на СКМ, предназначенные для обеспечения безопасной ресурсосберегающей эксплуатации оборудования ОПО путем получения в реальном времени оперативной информации о прошлом, текущем и прогнозируемом техническом состоянии оборудования ОПО, которая используется в системе принятия решений:

- по контролю и оценке технического состояния оборудования при приемочных испытаниях и в процессе эксплуатации различными видами (методами) неразрушающего контроля и технической диагностики (виброакустический, акустико-эмиссионный, тепловизионный и др.);
- выявлению дефектных узлов оборудования и причин возникновения дефектов и неисправностей;
- ведению технологического режима объекта мониторинга (ОМ) с учетом его технического состояния;
- регулированию параметров технологического процесса для минимизации деструктивных нагрузок, действующих на ОМ, с целью обеспечить максимальный ресурс безопасной эксплуатации оборудования ОПО;
- изменению периодичности проведения регламентных работ (для оборудования, находящегося в эксплуатации);
- эксплуатации оборудования ОПО по фактическому состоянию, подразумевающей, что объемы и содержание штатных периодических осмотров и обследований объектов, снабженных СКМ, могут быть изменены в зависимости от текущего технического состояния;
- условиям дальнейшей эксплуатации оборудования ОПО сверх нормативного срока эксплуатации.

На основе стандартов разрабатывается регламент предприятия по проведению мониторинга технического состояния, учитывающий специфику работы и конструктивные особенности оборудования.

Комплексный мониторинг технического состояния оборудования ОПО базируется на системе программно-технических средств и организационно-технических мер, обеспечивающих непрерывное получение в реальном времени информации о техническом состоянии оборудования ОПО в необходимом количестве и качестве для обеспечения наблюдаемости его технического состояния.

Целью оснащения оборудования ОПО системой комплексного мониторинга является обеспечение безопасной ресурсосберегающей эксплуатации оборудования путем заблаговременной выработки управляющих воздействий, которые должны обеспечить необходимый запас устойчивости технологической системы, качество ее функционирования, создать необходимый запас ее техногенной, экологической и экономической безопасности. Такие свойства СКМ делают их производственными исполнительными системами реального времени – MES-системами.

Периодичность получения информации о техническом состоянии оборудования ОПО определяется скоростью развития в нем неисправностей и для обеспечения наблюдаемости состояния должна быть в несколько раз меньше продолжительности развития неисправности в ОМ до предельного состояния.

Категория оборудования при выборе объектов мониторинга устанавливается на основе анализа матрицы риска. Критичность оборудования определяется ответственностью технологической позиции, на которой оно эксплуатируется, а также вероятностью отказа в процессе эксплуатации и степенью техногенной опасности, характеризующимися высокими потенциальными скоростями износа.

Количественная оценка риска требует анализа частот (вероятности) отказов оборудования и вызываемых этим последствий (потерь). Для оценки частоты отказов используют, как правило, статистические данные эксплу-

атации, приведенные в справочниках, нормативных документах, эксплуатационных журналах или отчетах по надежности оборудования конкретного предприятия или компании, на которых планируется установить СКМ. Анализ последствий (потерь) в результате отказа оборудования включает потери, связанные с полной или частичной утратой объекта (экономические), существенным или незначительным нанесением вреда окружающей среде (экологические), нанесением ущерба жизни и/или здоровью людей (нарушение безопасности жизнедеятельности).

Для управления действиями в сфере мониторинга надежности оборудования, оснащаемого СКМ, предприятие должно создать подразделение (службу) мониторинга надежности оборудования, которая должна быть неотъемлемой частью его общей системы менеджмента.

Цель службы мониторинга состоит в обеспечении процесса неуклонного повышения надежности оборудования ОПО и снижения затрат на его эксплуатацию и ремонт путем необходимых организационно-технических мероприятий и мониторинга состояния в реальном времени.

Весьма важным является определение понятия *системы мониторинга состояния оборудования*. Под ним понимается система (машина), продуктом которой является текущая информация о техническом состоянии оборудования и его опасности с необходимыми комментариями (прогноз остаточного ресурса, предписания неотложных действий персонала и т.д.) и заданным риском.

Система мониторинга (СМ) согласно [3, 9] должна обеспечивать получение информации о состоянии оборудования (объекта мониторинга) в необходимом количестве и качестве для обеспечения *наблюдаемости* его технического состояния. По результатам наблюдения СМ должны *заблаговременно* вырабатывать *управляющие* воздействия, которые обеспечивают необходимый запас *устойчивости* технологической системы, ее *техногенной, экологической* и *экономической* безопасности, качество ее функционирования. Помимо технического состояния введены определения *опасности технического состояния производственного комплекса, агрегата и входящего в него субъекта (узла). Опасность технического состояния обратно пропорциональна остаточному ресурсу и определяется отношением текущей скорости утраты работоспособности к текущему запасу работоспособности.*

В стандартах представлен рекомендуемый перечень автоматически определяемых неисправностей динамического оборудования, таких как неисправности подшипников, нарушение центровки и балансировки, ослабление крепления агрегата к фундаменту и присоединенным конструкциям и др., и статического оборудования: раковины, несплошности, коррозионные и усталостные микротрещины и т.д., которые должны своевременно распознавать СКМ.

В стандартах впервые приведена классификация систем и определены требования к системам, осуществляющим мониторинг оборудования различных категорий опасности, на основе анализа матрицы риска оборудования опасного производства.

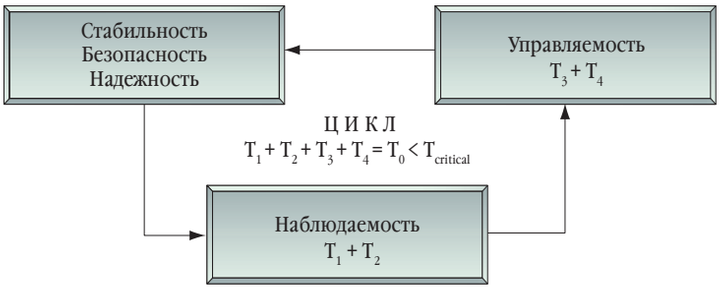
Системы 1-го класса предназначены для мониторинга оборудования 1-й категории, которое занимает ключевые позиции в технологическом процессе и определяет безопасность производства. Внезапный отказ этого оборудования может привести к техногенной аварии (взрыву, пожару) и/или существенному снижению технико-экономических показателей производства. Они обеспечивают эксплуатацию оборудования всех категорий по фактическому техническому состоянию. Критическое оборудование (1-я категория – высокие бизнес-риски) – оборудование, внезапный отказ которого может привести к снижению технико-экономических показателей производства на 80–90%, остановке технологического процесса и/или возникновению аварии и экологическим последствиям. Оно является первым компонентом информационного базиса мониторинга факторов производства. Для получения объективных данных о состоянии оборудования 1-й категории его необходимо оснастить стационарной системой мониторинга состояния с автоматической экспертной системой поддержки принятия решений, что позволит исключить фактор внезапности отказов, субъективизм персонала в процессе принятия решений и оценить его исполнительскую дисциплину.

Системы 2-го класса предназначены для мониторинга оборудования 2-й категории, которое обеспечивает второстепенные позиции в технологическом процессе и влияет на безопасность производства. Это оборудование технологического комплекса, отказ которого может привести к снижению технико-экономических показателей производства на 10–20% (2-я категория – средние бизнес-риски). Например, оборудование, перекачивающее взрывопожароопасные и вредные вещества, выход из строя которого может привести к возникновению аварии и экологическим последствиям, но при своевременной реакции персонала существенным образом не влияет на стабильность технологического процесса. Оно подлежит оснащению стационарными системами мониторинга состояния оборудования, что обеспечивает безопасность и дополняет информационный базис мониторинга факторов производства.

Внезапный отказ этой категории оборудования может привести к снижению безопасности и технико-экономических показателей производства. Системы 2-го класса обеспечивают эксплуатацию оборудования 2-й и 3-й категорий по фактическому техническому состоянию.

Системы 3-го класса предназначены для мониторинга оборудования 3-й категории, решающего вспомогательные задачи. Вспомогательное оборудование (3-я категория – низкие бизнес-риски) – оборудование, выход из строя которого не влияет на безопасность и стабильность технологического процесса, а лишь приводит к необоснованным затратам на его ремонт. Оно не является обязательным компонентом информационного базиса мониторинга состояния факторов производства, однако для дополнительного эффекта от сокращения затрат на ремонт может диагностироваться переносными системами автоматической диагностики с интеграцией результатов в систему мониторинга технологической установки для выработки и реализации решений по ближайшим неотложным действиям в целях сокращения эксплуатационных затрат и контроля их выполнения. Обеспечивают

1



T_1 – подготовка оборудования к диагностике, измерение информационных (диагностических) характеристик объекта
T_2 – непосредственная формулировка и документирование диагностических предписаний, регистрация диагностических предписаний, передача диагностических предписаний, содержащих информацию о состоянии объекта и мерах, необходимых для его улучшения, персоналу, ответственному за техническое обслуживание
T_3 – управление действиями персонала, связанными с ремонтом объекта и предотвращением нежелательных последствий
T_4 – внесение поправок в действия персонала в случае необходимости
$T_{critical}$ – наиболее короткий интервал развития неисправности в оборудовании предприятия
T_o – интервал мониторинга состояния оборудования в реальном времени

НАБЛЮДАЕМОСТЬ И УПРАВЛЯЕМОСТЬ – ОСНОВА СТАБИЛЬНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА

Таблица 1

ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ ОБОРУДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НПЗ*

Наименование	АВТ-10 (первичная переработка) λ_Σ	43-103 (крекинг) λ_Σ	35/11-1000 (риформинг) λ_Σ
Интенсивность отказов**			
статического оборудования	7256	3328	2642
динамического оборудования	24460	11642	6280
Вероятность отказа установки за сутки, всего	0,53	0,30	0,19
в том числе из-за машин	0,44	0,25	0,14
Отказы из-за машин, %	77	78	71

* Рассчитано при обследовании ряда НПЗ.
** Количество отказов в час × 10^{-6} в среднем за 10 лет.

эксплуатацию оборудования 3-й категории по фактическому техническому состоянию.

Прочее оборудование (4-я категория – бизнес-риски отсутствуют) – оборудование, выход из строя которого не влияет на безопасность и стабильность технологического процесса. Оно не включается в информационный базис и эксплуатируется до отказа, оценивается с периодом, достаточным для своевременной замены.

Впервые введена классификация систем мониторинга по 13 показателям, важнейшим из которых является *риск пропуска опасного состояния оборудования,* который определяется как *совокупность статической, динамической ошибок системы мониторинга и ошибки из-за влияния человеческого фактора, обусловленного несвоевременным выполнением персоналом предписаний системы мониторинга по устранению обнаруженного системой опасного состояния оборудования.*

Стандарты [2, 10] распространяются на центробежные насосные и компрессорные агрегаты с приводом от электродвигателей и/или паровых турбин с редукторами и другие виды оборудования и устанавливают нормы вибрации для оценки технического состояния при эксплуатации и приемочных испытаниях после монтажа и ремонта. Эти стандарты являются дальнейшим развитием руководящего документа [1]. В них отражены общие требования к системам мониторинга машинных агрегатов, условия установки датчиков, нормируемые параметры, критерии оценки состояния агрегата, эксплуатационные нормы вибрации центробежных и винтовых насосов, электричес-

Таблица 2

СТАНДАРТЫ ПО МОНИТОРИНГУ СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

№п.п.	Наименование
1	Руководящий документ. Центробежные электроприводные насосные и компрессорные агрегаты, оснащенные системами компьютерного мониторинга для предупреждения аварий и контроля технического состояния «КОМПАКС». Эксплуатационные нормы вибрации. Разработан НПЦ «Динамика». Утв.: Госгортехнадзор России, Минтопэнерго России, 22.09.1994.
2	СА 03-001-05. Центробежные насосные и компрессорные агрегаты опасных производств. Эксплуатационные нормы вибрации: стандарт ассоциации «Ростехэкспертиза», Ассоциации нефтехимиков и нефтепереработчиков и НПС «РИСКОМ» / Колл. авт. М.: Химическая техника, 2005. (Согласован Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору письмом от 01.02.2005 №11-16/219)
3	СА 03-002-05. Системы мониторинга агрегатов опасных производственных объектов. Общие технические требования: стандарт ассоциации «Ростехэкспертиза», Ассоциации нефтехимиков и нефтепереработчиков и НПС «РИСКОМ» / Колл. авт. М.: Химическая техника. 2005. (Согласован Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору письмом от 01.02.2005 №11-16/219)
4	СТО-03-002-08. Мониторинг оборудования опасных производств. Порядок организации: сб. стандартов НПС «РИСКОМ» // Мониторинг оборудования опасных производств. Стандарт организации / Колл. авт. М., 2008. С. 25–63.
5	СТО 03-003-08. Мониторинг опасных производств. Термины и определения: сб. стандартов НПС «РИСКОМ» // Мониторинг оборудования опасных производств. Стандарт организации / Колл. авт. М., 2008. С. 5–24.
6	СТО 03-004-08. Мониторинг оборудования опасных производств. Процедуры применения: сб. стандартов НПС «РИСКОМ» // Мониторинг оборудования опасных производств. Стандарт организации / Колл. авт. М., 2008. С. 65–77.
7	СТО 03-007-11. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Стационарные поршневые компрессорные установки опасных производств: эксплуатационные нормы вибрации // Стандарт организации / Колл. авт. М.: Изд-во «КХТ», 2011.
8	ГОСТ Р 53563-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Порядок организации. М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2010.
9	ГОСТ Р 53564-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Требования к системам мониторинга. М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2010.
10	ГОСТ Р 53565-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Вибрация центробежных насосных и компрессорных агрегатов. М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2010.

Таблица 3

МАТРИЦА КЛАССИФИКАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ ПО СТЕПЕНИ РИСКА ЭКСПЛУАТАЦИИ

Вероятность отказа оборудования	Потери вследствие пропуска отказа системой мониторинга		Техногенная опасность
Высокая	**I** 80–90% ТЭП	**II** 20–10% ТЭП	Есть
Низкая	**III** Небольшие (рост затрат на ремонт)	**IV** Незначительные (затраты на ремонт)	Нет

ких машин, а также вентиляторов, центробежных и винтовых компрессоров, мультипликаторов и пароприводов, представлен перечень машин и агрегатов, вибропараметры которых использованы при разработке настоящих стандартов. В данных стандартах впервые в мире приведены нормативные значения виброускорения и нормативные значения скоростей изменения виброускорения, виброскорости, виброперемещения. Все параметры используются совместно. Эти нормативы сегодня работают на нескольких десятках тысяч машин, свыше 1,5 тыс. типов в России и за рубежом, на отечественных и импортных агрегатах в разных климатических зонах в течение последних 20 лет.

Согласно указанным нормативным документам применяются четыре оценки технического состояния: «Хорошо» (Х), «Допустимо» (Д), «Требует принятия мер» (ТПМ), «Недопустимо» (НДП – недопустимо при эксплуатации).

Каждая оценка технического состояния оборудования ОПО определяет соответствующую совокупность действий персонала по управлению этим состоянием.

Внедрение систем комплексного мониторинга, выполненных в соответствии с указанными нормативными документами, обеспечивает для агрегатов нефтепереработки возможность безаварийной, безопасной ресурсосберегающей эксплуатации по фактическому техническому состоянию. Аварии оборудования и простои производств по этой причине сведены практически к нулю благодаря техническому обслуживанию и ремонтам оборудования (ТОРО) по указаниям системы мониторинга. Межремонтный пробег увеличился более чем в шесть раз. Сокращение затрат на ремонт оборудования составило более восьми раз. Сокращение сроков ремонта и пуска новых производств составило не менее 30%.

Изложенный подход воплощен и результаты получены благодаря *инвестициям предприятий в модернизацию производства и в эффективные, безопасные, экологически чистые технологии,* невзирая на кризисы и экономические трудности, поэтому представляются важными и существенными для страны. Достигнутые показатели безопасной ресурсосберегающей эксплуатации оборудования ОПО, подтвержденные результатами внедрения свыше 500 систем в 12 отраслях промышленности и транспорта, многократно окупили эти инвестиции. Разработанная методология и совокупность стандартов обладают мировой новизной и, по нашему мнению, могут служить основой для разработки стандартов по мониторингу рисков и оценки показателей защищенности стратегически и критически важных объектов в соответствии с Концепцией совершенствования государственной политики в области обеспечения промышленной безопасности до 2020 года и риск-ориентированным подходом.

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР
ООО НПЦ «ДИНАМИКА» Д.Т.Н., ПРОФЕССОР
В.Н. Костюков

ПРЕЗИДЕНТ НПС «РИСКОМ»,
ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ РАН Д.Т.Н., ПРОФЕССОР
Н.А. Махутов

ПЕРВЫЙ ЗАМЕСТИТЕЛЬ
ГЕНЕРАЛЬНОГО ДИРЕКТОРА
ООО НПЦ «ДИНАМИКА» К.Э.Н.
А.В. Костюков