

ПРОМЫШЛЕННЫЙ СЕРВИС

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№3(40)
2011

Главный редактор
Б. П. ТУМАНЯН

Научно-редакционный совет:

А. Б. АМЕРИК,
С. В. ДЕЙНЕКО,
Е. А. ЛУКАШЕВ,
Е. А. МАЗЛОВА,
М. Л. МЕДВЕДЕВА,
А. З. МИРКИН,
О. И. СТЕКЛОВ,
В. С. ШУПЛЯКОВ,
Ф. М. ХУТОРЯНСКИЙ

Редакция:

Н. Н. ПЕТРУХИНА (редактор,
ответственный секретарь),
О. В. ЛЮБИМЕНКО (редактор),
В. В. ЗЕМСКОВ (оформление
и верстка)

СОДЕРЖАНИЕ

СЕРВИСНЫЕ НЕФТЕГАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

И. И. Козлова, З. Ф. Исмагилова, Ф. Р. Исмагилов

ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА СБОРА И ОЧИСТКИ
ЖИДКОЙ СЕРЫ ОТ СЕРОВОДОРОДА 2

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

А. Б. Америк

КОМПЛЕКСНОЕ ОПТИМИЗАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ
ОСНОВНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ НА ПРИНЦИПАХ
КОЛЛЕКТИВНОГО КОНТРОЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
И СЕРВИСНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ АРХИТЕКТУРЫ
ИНТЕГРИРОВАННЫХ НЕФТЕГАЗОВЫХ КОМПАНИЙ
4. Тренды развития информационных технологий
в управлении основными фондами, инфраструктуры мобильной
интеграции с другими производственными и бизнес-системами..... 6

ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ТЕХНИЧЕСКИЙ НАДЗОР

В. Г. Мартынов, А. И. Ермолаев,
В. М. Казаков, Е. В. Кондратенко

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ
ЛИКВИДИРОВАННЫХ СКВАЖИН 34

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АУДИТ

И. М. Колесников

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ 36

НАУЧНЫЕ ШКОЛЫ, ВЫСШЕЕ И СПЕЦИАЛЬНОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Ф. Ш. Хафизов, Д. И. Шевченко,
А. А. Кудрявцев, А. Р. Арсланов

ЦЕЛИ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
РАЗРАБОТКИ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ
СРЕДСТВ ОБУЧЕНИЯ 36

Адрес редакции:

111116, Москва, ул. Авиамоторная, 6.
Тел./факс: (495) 361-11-95.
e-mail: tpps@list.ru

При перепечатке любых материалов
ссылка на журнал
«Промышленный сервис»
обязательна.

Редакция не несет ответственности
за достоверность информации в материалах,
в том числе рекламных, предоставленных
авторами для публикации.

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ
по делам печати, телерадиовещания
и средствам массовой коммуникации.
Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-44240 от 17.03.2011 г.

Подписной индекс в каталоге
агентства «Роспечать» 46831
Материалы авторов не возвращаются.

Тираж 1000 экз.

Отпечатано ООО «Стринг»
E-mail: String_25@mail.ru

Интегрированная система сбора и очистки жидкой серы от сероводорода

И. И. Козлова, З. Ф. Исмагилова, Ф. Р. Исмагилов
НП «Интегрированные технологии (г. Уфа)

Приведены результаты исследования, направленного на создание новых нейтрализующих реагентов для очистки жидкой серы от сероводорода. Реагенты получают на основе соединений диоксазинового ряда с использованием полиаминов (триэтилендиамин, диэтилентриамин, гексаметилендиамин, гексаметиленамин и др.) в качестве одного из компонентов сырья. Интегрированная система очистки жидкой серы в колонном аппарате с принудительным сбором жидкой серы значительно повышает эффективность процесса.

Ключевые слова: жидкая сера, сероводород, очистка, реагент, колонный аппарат, система сбора, интегрированная система, технологические схемы.

В последние годы на нефте- и газоперерабатывающих заводах России наметилась тенденция строительства новых установок производства серы методом Клауса. Для соответствия экологическим требованиям эти установки оснащаются блоками доочистки отходящих газов и дегазации получаемой серы. В настоящее время в нефтегазовой отрасли страны накоплен определенный опыт эксплуатации зарубежных установок дегазации серы. Например, на газоперерабатывающих заводах Астраханского и Оренбургского газохимических комплексов такие установки эксплуатируются длительное время. В течение ряда лет проводятся работы по усовершенствованию установок Клауса, оснащенных блоком дегазации серы, разрабатываются технические мероприятия по снижению эксплуатационных затрат за счет уменьшения продолжительности дегазации и расхода энергии [1, 2]. На нефтеперерабатывающих заводах зарубежные установки дегазации серы только начинают внедрять в эксплуатацию. Создание конкурентоспособной отечественной технологии дегазации жидкой серы устранил зависимость производителей серы от импортных технологий и оборудования.

Нами проведены исследования, направленные на разработку технологии дегазации серы в колонном аппарате, результаты которых представляют интерес для промышленной реализации [3]. Сущность разрабатываемого процесса дегазации сводится к комбинированию двух технологических стадий. На первой стадии проводится десорбция основного количества сероводорода с использованием инертного продувочного газа, а на второй стадии осуществляется подача реагента для нейтрализации остаточного количества сероводорода и полисульфидов. Первая стадия является массообменным процессом,

вторая — химическим. Несмотря на это, обе стадии удачно совмещаются в одном аппарате, хотя возможно проведение их в разных аппаратах.

На второй стадии для доочистки жидкой серы от сероводорода и полисульфидов используется, как отмечено выше, реакция связывания их с нейтрализующим реагентом. Нами разработан, испытан и сертифицирован нейтрализующий реагент, обеспечивающий нейтрализацию сероводорода в жидкой сере до его содержания 10 ppm (мас.) и ниже, что отвечает нормативным требованиям [4].

В развитие разрабатываемого процесса проводятся исследования по созданию новых реагентов с целью расширения их сырьевой базы благодаря использованию вторичных продуктов нефтехимической промышленности. Синтезированы нейтрализующие реагенты на основе полиаминов (триэтилендиамин, диэтилентриамин, гексаметилендиамин, гексаметиленамин и др.), из них получены соединения диоксазинового ряда. Эти соединения при температуре до 180°C проявляют термическую и термоокислительную устойчивость в жидкой сере, что подтверждается данными термомеханических исследований. Это свойство реагента важно для исключения вероятности вторичного загрязнения серы сероводородом из-за разложения органических примесей при транспортировке, переработке и хранении серы в жидком состоянии и при повторном расплавлении комовой или гранулированной серы у потребителя.

Влияние новых реагентов на степень нейтрализации сероводорода в жидкой сере исследовали при варьировании следующих факторов: концентрации реагента в растворе в интервале 5–60% об., расхода реагента в интервале 0,05–1,5 мл/кг жидкой серы, начальной концентрации сероводорода в жидкой сере в пределах

20–140 ppm. Для практического определения расхода и концентрации реагента до достижения безопасной остаточной концентрации сероводорода в сере (10 ppm) составляли номограммы. На рис. 1 приведен график для определения расхода реагента «Делисалф», необходимого для достижения остаточной концентрации сероводорода (C_{H_2S}) в жидкой сере в зависимости от его исходной концентрации (Q_{H_2S}) и концентрации реагента в водном растворе. Важно отметить, что количество вводимых в серу исследованных реагентов не приводит к заметному увеличению содержания органических примесей в очищенной от сероводорода сере. Увеличение суммарного содержания органических примесей в товарной сере, дегазированной с использованием предлагаемых реагентов, не превышает 0,0022% мас. (для сравнения согласно ГОСТ на товарную серу требуется не более 0,01% мас.).

Основными преимуществами данного процесса по сравнению с другими [5] процессами дегазации серы являются:

- уменьшение продолжительности дегазации серы до 10–30 мин по сравнению с 16–20 ч, принятыми для «внутриямных» процессов;

- непрерывность процесса, которая позволяет отказаться от громоздких полуподземных приемных резервуаров суточного хранения серы, дегазации и хранения дегазированной жидкой серы, поскольку вместо них монтируются небольшие по размеру приемная и накопительная емкости;

- возможность непрерывной подачи дегазированной серы из приемной емкости непосредственно на железнодорожный транспорт, на блок гранулирования или на склад;

- возможность блочно-комплектной поставки оборудования, а небольших установок — в модульном виде;

- взрывобезопасность процесса благодаря его непрерывности и исключению свободного реакционного пространства, где возможно образование и скопление взрывоопасных смесей.

В развитие разрабатываемой технологии очистки жидкой серы от сероводорода мы рассматривали различные схемы сбора жидкой серы и выбирали точку подачи нейтрализующего реагента в жидкую серу с целью дальнейшего снижения расхода реагента и повышения надежности процесса. Кроме того, для снижения расхода реагента и обеспечения непрерывности процесса важна оптимальная организация первой стадии процесса дегазации серы, поскольку на этой стадии происходит удаление из жидкой серы в результате десорбции основного коли-

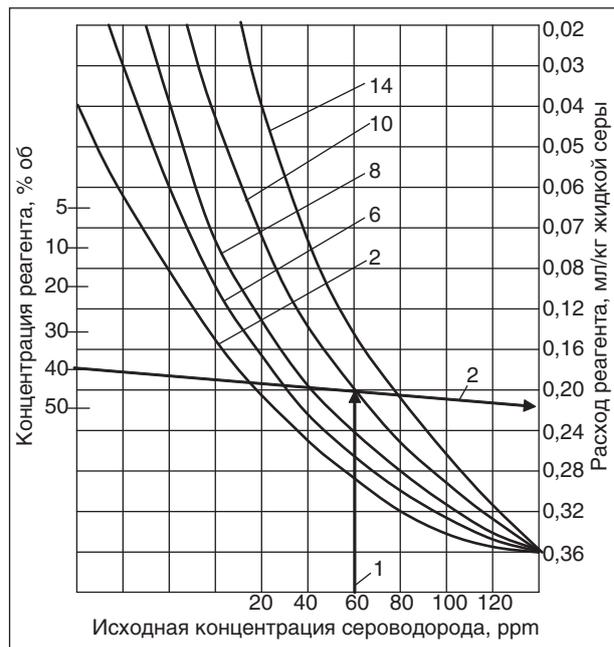


Рис. 1. График для определения расхода реагента «Делисалф», требуемого для достижения остаточной концентрации сероводорода в жидкой сере в зависимости от его исходной концентрации и концентрации реагента в водном растворе: прямые 1 и 2 — пример определения расхода реагента при исходной концентрации сероводорода 60 ppm и концентрации реагента 40% об. для достижения остаточной концентрации H_2S 10 ppm (цифры на кривых — остаточная концентрация сероводорода в сере, ppm)

чества сероводорода. Действительно, расход реагента на второй стадии тем меньше, чем ниже концентрация сероводорода и полисульфидов в жидкой сере, поступающей на вторую стадию, что видно из номограммы (см. рис. 1).

В настоящее время на установках Клауса сбор жидкой серы после конденсаторов серы осуществляется самотеком в бетонные ямы суточного хранения серы, ямы дегазации и хранения дегазированной серы. Этот вид сбора серы предполагает, что ямы хранения и дегазации серы должны располагаться ниже уровня земли. Имеются реализованные в промышленности проекты установки Клауса, в которых резервуары хранения серы располагаются над землей, однако установка Клауса в этом случае для обеспечения соответствующего гидравлического напора и создания режима самотека должна находиться несколько выше резервуаров серы. Это увеличивает капитальные затраты на строительство установки. Подземные хранилища серы требуют

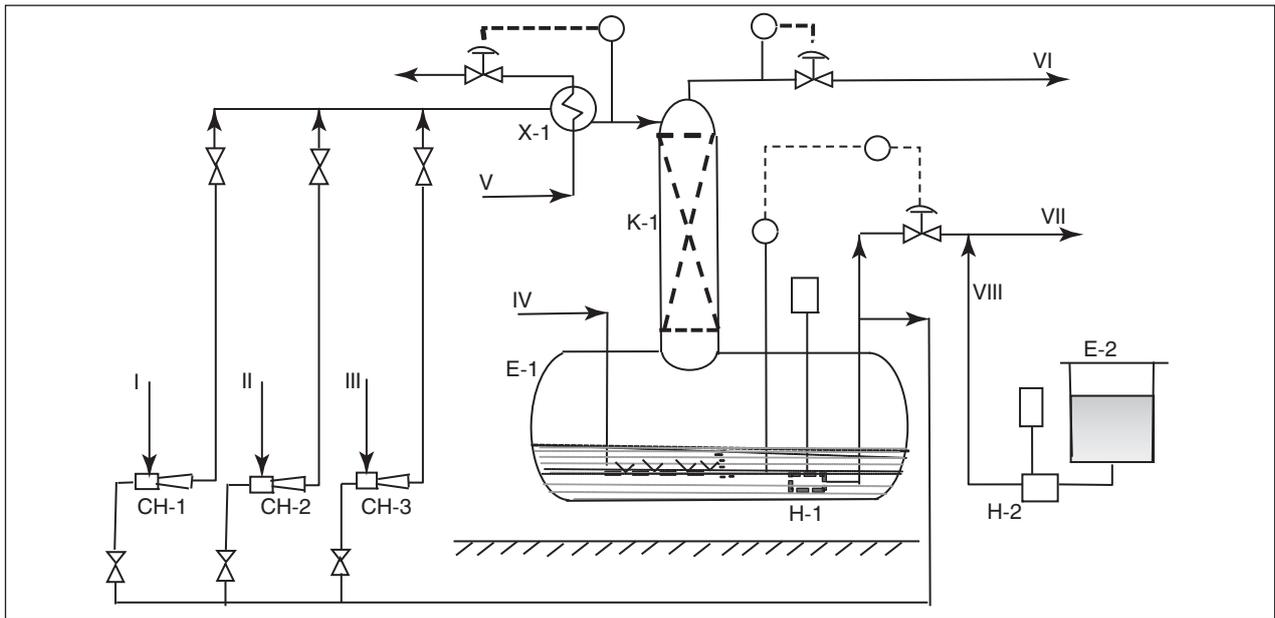


Рис. 2. Схема установки сбора и дегазации жидкой серы: I — жидкая сера после конденсатора термической ступени установки Клауса; II, III — жидкая сера после конденсаторов каталитических ступеней; IV — продувочный воздух; V — охлаждающая вода; VI — газ на доочистку; VII — дегазированная сера; VIII — реагент

постоянных ремонтных работ из-за разрушения бетона в результате образования в нем трещин под действием напора грунта, грунтовых вод и кислотной коррозии. Недостатком подземных хранилищ является также загрязнение грунтовых вод серной кислотой, которая образуется в результате бактериального окисления серы.

Выход из сложившейся ситуации состоит в строительстве наземных хранилищ серы, для чего потребуется отказаться от схемы сбора серы самотеком и переходить в режим принудительного сбора. Наиболее простым путем решения этой задачи является использование струйных насосов для перекачки серы непосредственно из гидрозатворов. Этот способ сбора серы, кроме невысоких капитальных затрат, отличается рядом других преимуществ, которые учтены при разработке технологии.

Объединение операции принудительного сбора жидкой серы с использованием эжекционного насоса с разрабатываемым нами процессом дегазации серы в колонном аппарате в интегрированную систему значительно повышает эффективность процесса дегазации серы. Положительный эффект достигается благодаря дополнительному перемешиванию серы в серопроводе и, как результат, подаче серы после установки Клауса непосредственно в колонну дегазации, минуя приемную емкость.

Исследования показали, что уменьшение продолжительности контактирования серы с

растворенным в ней сероводородом до начала процесса дегазации положительно сказывается на эффективности процесса. Это связано с уменьшением содержания трудноудаляемых полисульфидов водорода в жидкой сере, которые образуются в результате взаимодействия серы с растворенным сероводородом. Результаты ранее проведенных исследований подтверждают эту особенность серы [1]. В одном из вариантов предлагаемой нами интегрированной системы дегазации жидкая сера подается в контактор с насадкой противотоком потоку воздуха. Последний подается в пространство над жидкой серой в приемной емкости. Альтернативой этому является пропускание воздуха через жидкую серу, далее через колонну противотоком стекающей жидкой сере (рис. 2). Протеканию процесса дегазации способствуют охлаждение потока серы до 130–140°C и подача катализатора. Возможно использование вместо воздуха отходящих газов с установки Клауса.

Технико-экономические расчеты показывают, что технологический процесс с использованием исследуемых реагентов по всем показателям не уступает зарубежным аналогам. Освоение его в опытно-промышленном масштабе возможно как на вновь проектируемых установках Клауса небольшой производительности, так и на действующих установках Клауса, а также на установках, находящихся на любой стадии реконструкции.

Литература

1. Исмагилова З. Ф., Сафин Р. Р., Исмагилов Ф. Р. К разработке промышленного процесса дегазации жидкой серы // Химия и технология топлив и масел. — 2004. — № 4. — С. 52–54.
2. Капустин С. И., Пшегорский А. А., Сасина Т. И. Новый способ дегазации жидкой серы с применением «Дегазатора-окислителя» на Астраханском газоперерабатывающем заводе // Химия и химическая технология. — 2006. — № 10. — С. 109–112.
3. Исмагилова З. Ф., Козлова И. И., Прохоров Е. М. и др. Процесс очистки жидкой серы в колонном аппарате // Нефтепереработка и нефтехимия. — 2011. — № 1. — С. 50–53.
4. Исмагилова З. Ф. Разработка технологии производства высокоэффективных реагентов для процесса очистки жидкой серы от сероводорода // В кн.: Материалы Международной научно-практической конференции «Нефтегазопереработка и нефтехимия-2007». — Уфа: Изд-во ГУП ИНХП РБ, 2007. — С. 255–256.
5. Fenderson S., Allison T. Degassing Developments // Hydrocarbons Engineering. — 2002. — April. — P. 1–5.

I. I. Kozlova, Z. F. Ismagilova, F. R. Ismagilov

Integrated System of Collection and Treating Liquid Sulfur from Hydrogen Sulphide

Results of research on new neutralization reagents development for liquid sulphur treating from hydrogen sulphide are presented. Reagents are obtained on the basis of dioxazine compounds using polyamines (triethylenediamine, diethylenethreeamine, hexamethylenediamine, hexamethylenamine, etc.) as one of raw components.

Integrated system of liquid sulphur treating in the columned apparatus with compulsory liquid sulphur collection allows increasing efficiency of process considerably.

Keywords: liquid sulphur, hydrogen sulphide, treating, neutralization reagent, columned apparatus, collecting system, integrated system, technological schemes.

Вниманию специалистов!

С. В. Дейнеко

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА НЕФТИ И ГАЗА

В учебном пособии излагаются основы теории надежности систем трубопроводного транспорта нефти и газа и их практическое применение для решения научных и инженерных задач. Приводится анализ и классификация отказов газонефтепроводов, а также обработка статистических данных по отказам.

Рассматриваются методы обеспечения надежности на стадии проектирования и оценки надежности газонефтепроводов на стадии эксплуатации. Рассматриваются теория, критерии и показатели надежности невосстанавливаемых и восстанавливаемых систем.

Представлены методология исследования и оценки эксплуатационной надежности систем трубопроводного транспорта; методика построения структурных схем надежности газонефтепроводов; методика построения моделей надежности объектов газонефтепроводов; методика компьютерного моделирования в Excel для решения задач надежности; методы оценки достоверности построенных моделей надежности. Практическая реализация методов приводится в ранее изданных книгах «Оценка надежности газонефтепроводов. Задачи с решениями» и «Построение моделей надежности газонефтепроводов методом компьютерного моделирования. Лабораторный практикум», которые дополняют данное учебное пособие.

Учебное пособие предназначено для студентов, магистрантов, аспирантов специальности 130501 «Проектирование, сооружение и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ», а также может быть использовано инженерно-техническим персоналом, связанным с оценкой эксплуатационной надежности газонефтепроводов.

М.: Издательство «Техника», 2011. — 176 с.

Комплексное оптимизационное управление основным производством на принципах коллективного контроля эффективности и сервисно-ориентированной архитектуры интегрированных нефтегазовых компаний.

4. Тренды развития информационных технологий в управлении основными фондами, инфраструктуры мобильной интеграции с другими производственными и бизнес-системами

А. Б. Америк
ООО «ЛУКОЙЛ-ИНФОРМ»

Обобщены основные технологические тренды развития программных комплексов управления жизненным циклом производственных фондов, технического обслуживания и ремонта: систем закупок и методов прогнозирования и управления запасами товарно-материальных ценностей (запчастей, комплектующих), вопросы интеграционного взаимодействия с системами производственного управления. Рассмотрены ключевые аспекты эволюции на основе современных стандартов/протоколов связи мобильных решений в EAM, программно-технических средств и беспроводной инфраструктуры предприятий нефтегазовой и перерабатывающей отраслей. Описаны современные методы и практики рационализации управления сигнализациями и ответного реагирования на них с применением новых технологических подходов в соответствии со стандартом ISA 18.2.

Ключевые слова: надежность, тренды развития, управление производственными активами, бизнес-приложения, стандарты/протоколы беспроводной связи, методы прогнозирования и оптимизации запасов товарно-материальных ценностей, мобильные устройства, мобильные станции, техническая инфраструктура, интеграционные решения, сервисы системы управления производственными фондами, жизненный цикл, управление сигнализациями, рационализация тревожных сигнализаций, RCM 2, MTBF, MTTR.

В настоящей работе, завершающей обсуждение архитектуры и, в более широком смысле, — сервисов, поставляемых операторам производственных активов [1–2], рассмотрены технологические и интеграционные решения, определяющие развитие и существенно расширяющие возможности систем управления производственными активами: EAM или PAM (УПФ). Аналитический обзор новых подходов сопровождают примеры их реализации на предприятиях.

Ориентируясь на ИТ-тенденции последних 2–4 лет и развивая взгляды профессионалов в области управления производственными фондами, можно выделить следующие основные векторы развития EAM на уровне предприятия:

- «трехмерная» интеграция;
- лин-технологии в управлении производственными активами, фондом запчастей и комплектующих;
- новые инфраструктурные решения и унифицированные коммуникации;

- широкое применение мобильных внутри-корпоративных средств с целью обеспечения ИТ-сервисов подвижного инженерно-технического персонала в системе управления производственными активами (УПФ) или технического обслуживания и ремонта (ТОРО);

- распространение беспроводных технологий в целях упрощения процессов обслуживания, обеспечения оборудования средствами контроля, оптимизации затрат;

- совместное применение усовершенствованных средств визуализации и имитационного моделирования объектов для оптимизации ТОРО и УПФ.

Сервисно-ориентированная архитектура и комбинированные платформенные приложения: интеграция EAM

Как следует из многочисленных публикаций (например [3]) по сервисно-ориентированной архитектуре (SOA), из предмета научных по-

строений и отраслевых концепций SOA превратилась в реальную практическую методологию создания современных классов информационных систем (ИС). Развертывание таких инициатив, как IBM SOA Foundation, упрощает этот переход с помощью набора интегрированного программного обеспечения (ПО), методических руководств и проверенных практик имплементации. Напомним, что SOA — это компонентная модель, устанавливающая соответствие между функциями подразделений и сервисами различных приложений многократного применения. Основным преимуществом данной архитектуры является использование ее в качестве средства для отображения (проецирования) бизнес-процессов на технические ресурсы с последующим обеспечением поддержки и совершенствования этих процессов, в том числе УПФ. Сервисная архитектура включает также набор технологий и руководств, учитывающий динамику любого сектора и позволяющий связать бизнес и ИТ, «бесшовно» интегрировать вновь внедряемые и наследуемые системы с сохранением гибкости.

Инфраструктурные пакеты основных игроков (семейства продуктов IBM Tivoli/WebSphere, Oracle Middleware и др.) представляют собой полнофункциональный «фундамент» для построения бизнес-приложений и промышленных решений. В их основе лежит связующее ПО, которое позволяет сформировать ИТ-инфраструктуру бизнеса, обеспечивающую масштабируемость и необходимые заказчику гибкость, надежность и эффективность. В целом, на расширяемых SOA-платформах, функционирующих на обеспечении связующего слоя (MDM) нового поколения (который выполняет, в том числе, роль посредника в «разумной» доставке удаленных ИТ-сервисов), крупнейшие производители ERP и/или EAM-пакетов (Oracle, SAP, IBM, Siebel) и строят свой прикладной ландшафт. В качестве недавнего примера приведем перечень прикладного ПО Oracle Fusion Middleware 1.0, выпущенного в апреле 2011 г.: финансовая деятельность, планирование ресурсов; управление взаимоотношениями с клиентами (CRM); управление соответствиями (требованиям) и рисками; управление человеческим капиталом/ресурсами (HRM); управление закупками; управление портфелем проектов; управление цепочками поставок (SCM).

Основное назначение платформ: обработка крупномасштабных запросов критически важных прикладных программ, интеграция данных и информации из разнообразных источников, agile-

интеграция и оптимизация бизнес-процессов, развертывание и трансформация систем поддержки бизнеса.

Дальнейшие релизы таких суперпакетов предполагают практически неограниченное углубление так называемых best-in-class-функциональностей благодаря усовершенствованиям модулей EAM и SOA-коннекторов. В отношении системы управления фондами «трехмерная» интеграция предполагает:

- интеграционные решения в составе системы планирования ресурсов (ERP/EAM-модули);
- интеграцию с системой управления содержанием организации (ECM), навигационной или геоинформационной системой (ГИС), а также интеграцию с системами реального времени;
- опосредованную интеграцию (с SCM-пакетами), либо «прямое» объединение с компонентами системы управления производством и поставками (составные приложения).

Интеграционная связь управления обслуживанием, материальными закупками и модуля оптимизации запасов с ERP TOPO (EAM/MRO или APM)

Оптимизационное обслуживание и управление закупками/материалами большей части компаний (MRO) предоставляет широкие возможности для улучшения структуры затрат, которые, например, на НПЗ очень значительны. Как правило, в компаниях существуют раздутые объемы запасов (~8–15% от валовой прибыли). Это связано с тем, что сервисное обслуживание, сфокусированное на высоком уровне доступности оборудования, прямо заинтересовано поддерживать огромное число единиц запасных частей и материалов по принципу just-in-case — для минимальной продолжительности замены или ремонта. Для каждой единицы нового оборудования и апгрейда также создаются новые запасы компонентов, которые дублируют часть имеющихся на складе ТМЦ (так называемые множественные запасы аналогичных SKU). Иными словами, чем длительнее срок эксплуатации объекта, тем больше возможностей для оптимизации запасов ТМЦ, в особенности для фондоемких отраслей — химической, нефтехимической, предприятий топливно-энергетического комплекса (ТЭК).

Другими особенностями динамики фондов запчастей и комплектующих, усложняющими лин-управление запасами, является прерывистость расходования и поставок (рис. 1, а), проблемы эффективности внутреннего распределения ТМЦ, специфические статистики

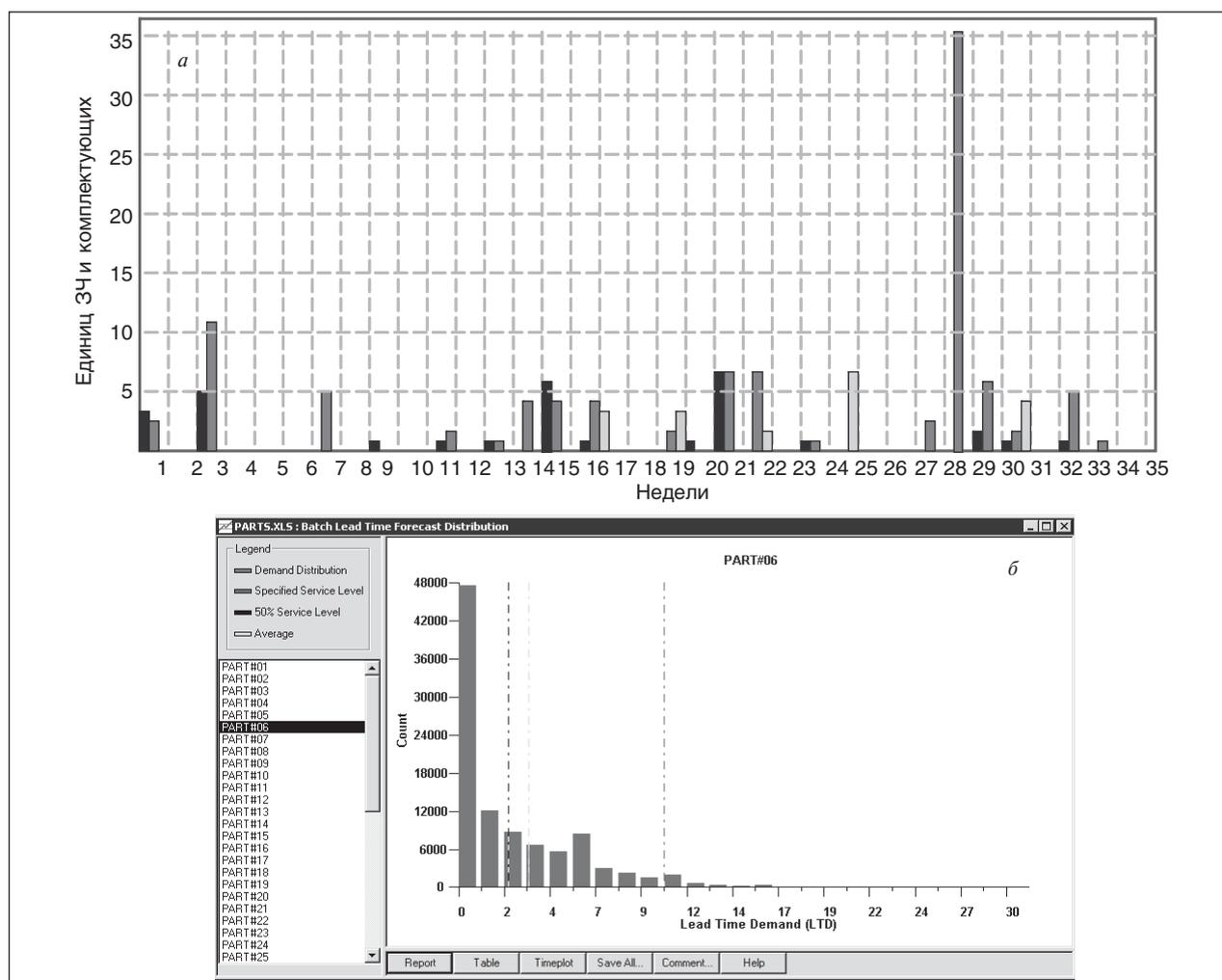


Рис. 1. Проблемы: *a* — неравномерности/прерывистости расходования запчастей и материалов для ТОРО (пример потребности в трех ЗЧ на НПЗ); *б* — высоко ассиметричного распределения прогнозного времени задержки от формирования заявки до размещения на складе

интервалов на исполнение/доставку заказа (lead time), не подчиняющиеся нормальному распределению (рис. 1, б) [4, 5]. Как показывает наш опыт, эти и другие особенности приводят к неадекватности простой (идеальной) статической модели с равномерно-периодическим или мгновенным пополнением, а также к трудно прогнозируемой текущей потребности в запасных частях и материалах (ЗЧМ) (рис. 2). Все это вынуждает использовать стохастические и иные рассмотренные ниже методы моделирования с различными объемом партий, интервалами ревизии запасов, а также модели неравномерных поставок с интеллектуальным прогнозированием потребности/задержки.

Для рационального формирования фондов ЗЧ, как и любых материальных запасов, при-

менимы известная классическая либо модифицированная модели «экономичного заказа» Уилсона [6] и оптимального интервала перезаказа (EOQ)¹:

$$H = h C; \quad (1)$$

$$Q = \sqrt{\frac{2RS}{H}}; \quad (2)$$

$$T = \sqrt{\frac{2S}{RH}}; \quad (3)$$

где R — объем потребления ЗЧМ в течение определенного периода $\gg T$ — интервала возобновления запаса; S — затраты на оформление заказа и дополнительные расходы на формирование партии; C — стоимость единицы

¹ Оптимальной окажется партия (заказ) такой величины Q , при которой сумма затрат S на формирование (пополнение) запасов и затрат H на содержание (хранение) запасов будет минимальной.

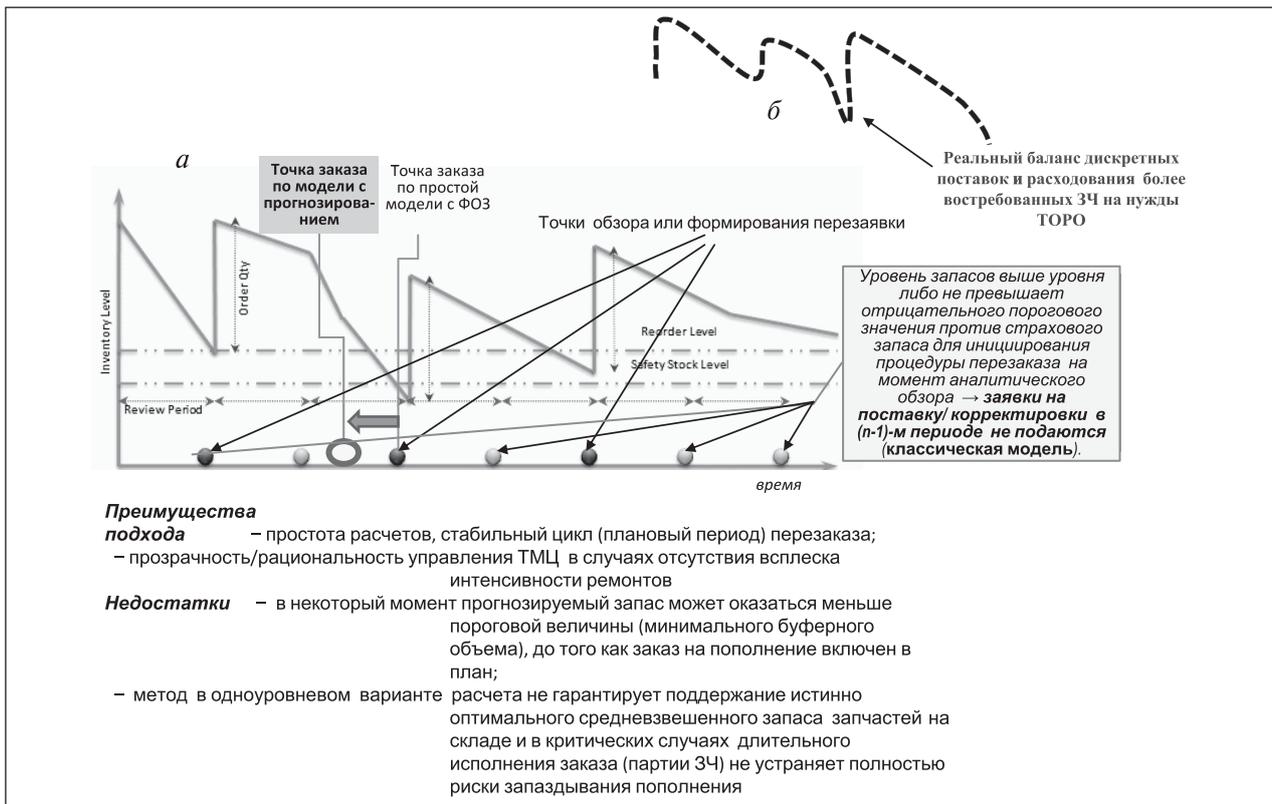


Рис. 2. Прогнозирующая модель (а) с фиксированным объемом партии поставки и ревизией срока перезаявки и пополнения в сравнении (б) с реальным профилем (балансом) запчастей и комплектующих

запчастей, комплектующих определенной категории; h — затраты (в %) на оформление заказа и хранение (доля от закупочной стоимости); H — стоимость хранения единицы/партии ЗЧ/М в течение определенного периода; Q — величина партии (пере)заказа.

Вместе с тем, сервисные организации сталкиваются на предприятиях не просто с экономическими, а с множественными ограничениями. Они вынуждены искать очень непростые компромиссы между затратами на поддержание производственных фондов и уровнем их готовности, достижением показателей гибкости поставок комплектующих, непрерывности производства.

Модули управления закупками и/или современные ERP/EAM-комплексы [7] включают электронные каталоги (ЭК) комплектующих, модули для закупки ТМЦ и оптимизации запасов (АРМ) разного методико-технологического уровня². Поскольку большая часть этих модулей разрабатывалась для функций прямого снабжения под заявки, ПО основных поставщиков обычно помехоустойчивое и функционально достаточ-

ное. В последние 2–3 года модули интегрируют с компонентами бизнес- (BI) или производственной аналитики (MI) реального масштаба времени для реализации функциональности:

- прогнозирования месячной/квартальной потребности в ЗЧ/М на предприятии;
- выполнения ABC-XYZ анализа, определения порогового минимального значения по категориям, при котором требуется пополнение запаса, и сигнального значения, при котором осуществляется оповещение о скором исчерпании запаса ЗЧ/М;
- итеративного (возобновляемого) расчета оптимального графика поставки (по объему партий, периодичности);
- выдачи оперативных оповещений в графическом виде и на email.

Сравнение методов и алгоритмов предсказания и оптимизации ТМЦ для ТОРО

В используемой ABC-классификации внимание сосредоточено на дорогостоящем оборудовании, где «А» — та часть спецификационного

² Как отмечено в [2], в противоположность ERP/EAM, даже подвергшийся обновлению функционал систем CMMS включает обычно только одну (в лучшем случае две) упрощенные статические модели пополнения запасов без функций их оптимизации.

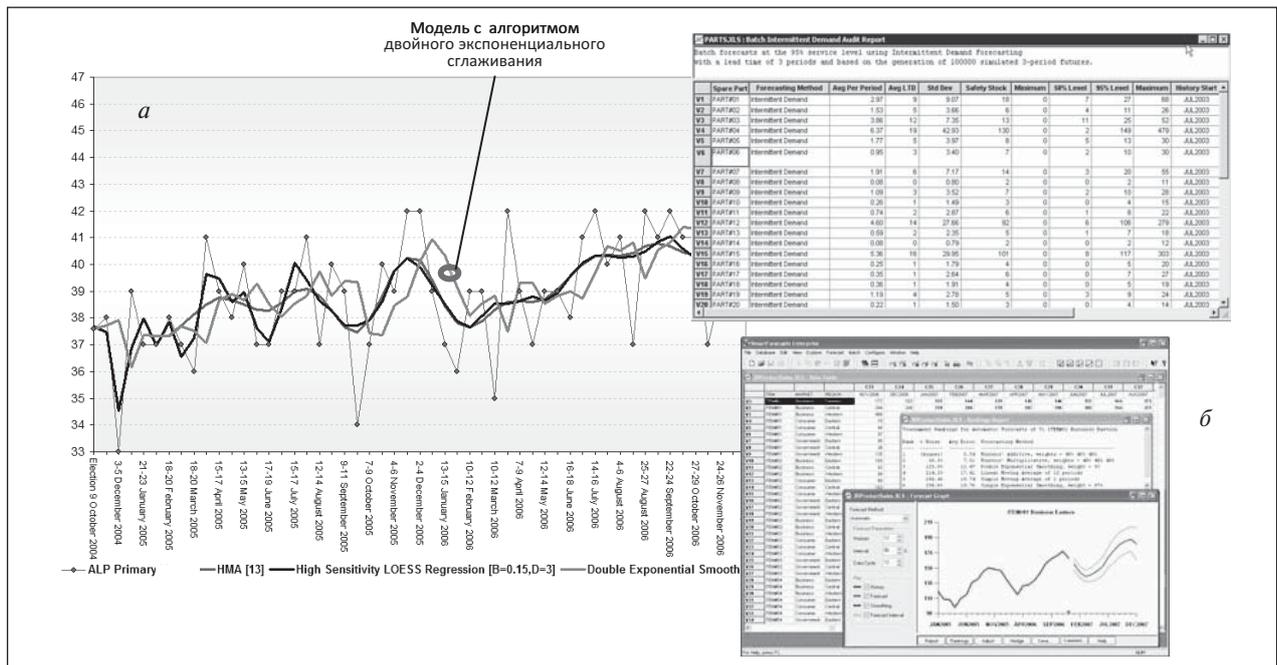


Рис. 3. Сравнение методов экспоненциального сглаживания с другими алгоритмами сглаживания (а); компьютерная реализация новых методов bootstrapping для целей краткосрочного прогнозирования потребности/оптимального уровня оперативных запасов ЗЧК (б)

листа, которая обеспечивает максимальный эффект от оптимизации. Автоматизированные средства осуществляют аналитический мониторинг изменений времени задержки/допоставки, скорости расходования ЗЧ, отслеживают риски поставок на основе темпов исчерпания гарантийного запаса (рис. 3) и других моделируемых переменных. Некоторые корпоративные пользователи программных систем Oracle применяют технологию усовершенствованного планирования цепочки поставок (ASCP) по пороговым значениям для разработки скользящих планов закупок. Последние регулярно обновляются по уровню потребности, складских запасов и параметрам поставщиков. Подобные инструменты, интегрированные с EAM, применяются дополнительно к MRO-единицам для рекурсивного контроля затрат и итоговой прибыльности с суммированием этих издержек по категориям.

Прогнозирование потребности с учетом критерия оптимальности запасов ЗЧ и перечисленных факторов — крайне непростая математическая задача трех- или четырехкритериального поиска решения.

Экспоненциальное сглаживание (МЭС) является одним из наиболее широко используемых статистических подходов промышленной инженерии, основанных на том, что потребность следующего периода есть некоторое средневзвешенное значение от потребностей в предыдущем

периоде (n -предыдущих). Однако такие методы, в том числе с подстройкой тренда, обычно неадекватны для специальной проблемной области предсказания потребности в ЗЧМ:

$$F_t = \alpha(A_t) + (1 - \alpha)F_{t-1} + T_{t-1}; \quad (4)$$

$$T_t = \beta(F_t - F_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1}, \quad (5)$$

где F_t — экспоненциально сглаженный прогноз временного ряда в период t ; T_t — экспоненциально сглаженный тренд в период t ; A_t — реальная потребность в период t ; α — константа сглаживания по усреднению; β — константа сглаживания для тренда.

Варианты МЭС разрабатывались для оценок усредненной потребности, а не уровня обеспеченности сервиса запасам (см. рис. 3). Действительно, вопреки утверждениям сторонников этого метода прогнозирования, вероятность распределения параметра lead time demand (LTD — требуемое число ЗЧ и сервис-компонентов на период до поставки) практически никогда не соответствует кривой нормального распределения по причине упомянутой интермитентности потребления фонда ЗЧ.

Метод Кростона представляет собой модификацию МЭС, которая способна работать с необычными образцами прерывистого, медленного движения единиц ЗЧМ. Вместе с тем, результаты последних исследований практического

применения этого метода на объектах указывают на не лучшую, в сравнении с МЭС, точность предсказания потребности, слабо коррелирующего с данными регулярной инвентаризации движения остатков.

Модели Пуассона количественно определяют, что потребность характеризуется большей или меньшей степенью случайности. В этом отношении они в первом приближении описывают специфический пример (распределения) расходования/потребности в сервисных компонентах и ЗЧ, однако имеют два серьезных недостатка:

- распределение LTD также не подчиняется пуассоновскому;
- модель игнорирует тот факт, что потребность в следующем периоде существенным образом определяется (или коррелирует с) расходом в предыдущем.

Модели надежности в RCM 2. Планирование запасных частей для критического оборудования, для которого продолжительное время устранения поломок влечет экстремально негативный эффект, начинается с *анализа надежности по естественному износу*, по индивидуальным и средневзвешенным параметрам

MTBF (двухпараметрическому распределению Вейбулла) либо вероятности отказа. При этом в усовершенствованных решениях используются как статические, так и связанные (например в IBM Maximo) стохастические/динамические модели RCM и инвентаризации, что в итоге приводит к формированию интегрированных бизнес-процессов прогностического ТОРО (PdM) и пополнения запасов (рис. 4). Заложенный в модулях ERP/EAM инструментарий аналитики и производственного «интеллекта» помогает идентифицировать риски и ранжировать критическое оборудование, работающее близко к предельным эксплуатационным параметрам, и ограничивающее общую производительность объекта.

Основным ограничением данного метода является технология и стоимость обработки огромных массивов данных о физическом состоянии/ресурсах ПФ (количество элементов и ЗЧ в обслуживании, продолжительность (мото-часы) эксплуатации каждого компонента, уровень/число предельных износов, вероятность отказа в установленный период и т. д.), используемых подразделениями ТОРО и сервисной органи-

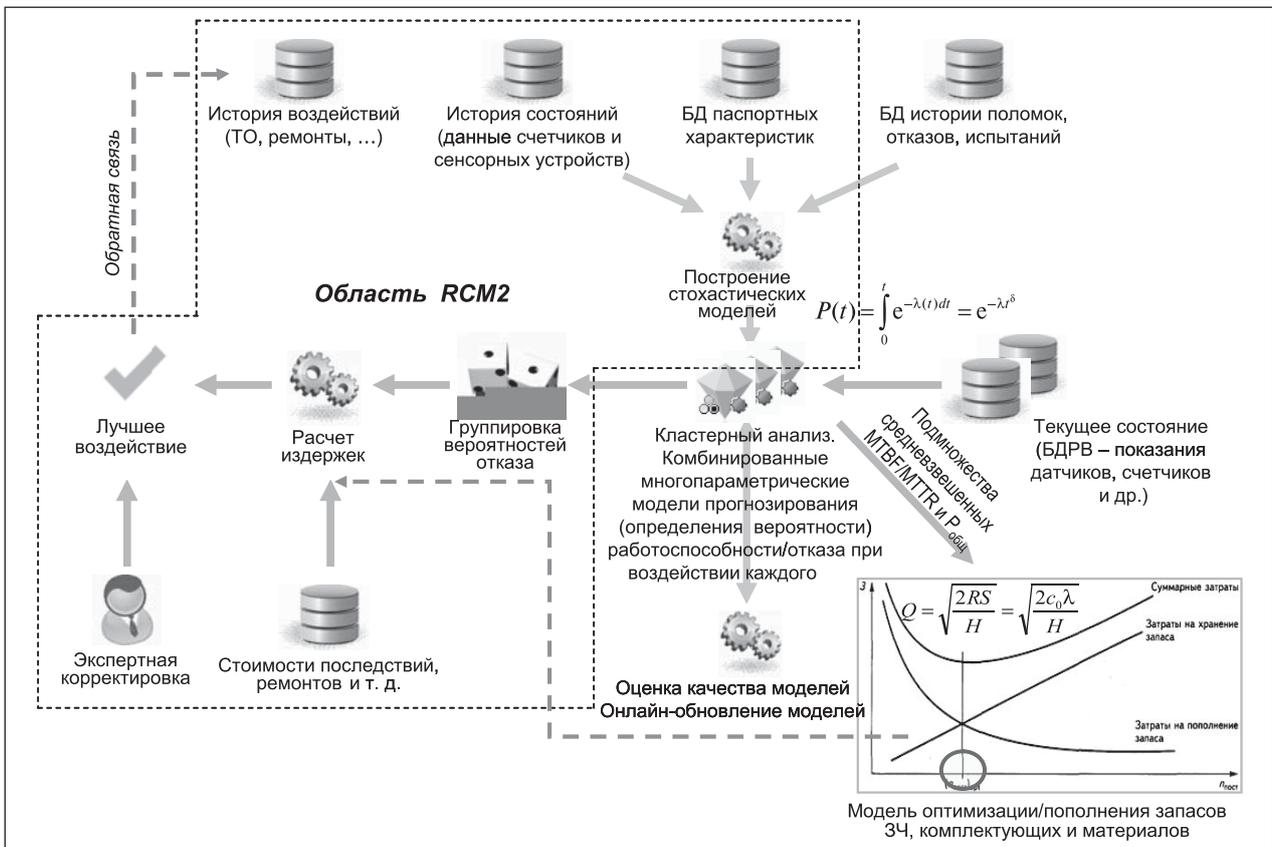


Рис. 4. Фазы типового динамического бизнес-процесса модель-центричного ТОРО с прогнозированием (PdM), интегрированного с управлением запасами ЗЧиМ

зацией для прогнозирования рациональных запасов ЗЧМ десятков тысяч наименований. В последние 2–3 года активно внедряются информационные технологии обработки данных моделей такой размерности посредством вычислительных средств, «встроенных» в оперативную память (in-memory computing) [8] и аналитики категории in-database. Эти технологии позволяют быстро идентифицировать и анализировать тренды и образцы для улучшения процессов планирования, прогнозирования и объемно-ценовой оптимизации.

Bootstrapping. В наиболее сложных случаях, при наличии десятков (сотен) тысяч единиц хранения ЗЧМ (комплектующих) используются продвинутые системы прогнозирования потребности, например на основе методов статистической рационализации — «бутстрэппинга» [9, 10], считающегося лучшим для решения задач этого класса. Представителями таких компонентных моделей нового поколения являются наборы алгоритмов в ПО SmartForecasts™ и SPSS IBM (включают метод Smart-Willemain и варианты усовершенствованных статистических подходов класса *resampling*: моделирование латентных приращений, многоуровневое/низкоплотное моделирование, а также усовершенствованные методы временных рядов). Такие технологии отличаются быстротой генерации десятков тысяч возможных сценариев последовательной потребности или величин кумулятивной потребности будущих периодов после формирования партии и доставки запчастей поставщиком; позволяют производить разнообразные расчеты, например норм текущих запасов для 95%-ного уровня обслуживания заказчика, сбалансированного страхового запаса и др.

По запчастям с пролонгированным временем доставки по-прежнему используют простой минимаксовый алгоритм управления запасом, в котором устанавливается значение $\min = 1$. В ряде приложений (все чаще привязанных к ГИС в случае территориально распределенных организаций) вместо хранения множества единиц/компонентов на различных складах, SCM/IM-подсистема определяет наилучшее место хранения дорогостоящих запчастей таким образом, чтобы одна номенклатурная спецификация в ЭК могла поддерживать несколько производственных площадок.

Интеграция по данным с системами производственного управления

На уровне предприятия для полномасштабного функционирования системы управ-

ления основными фондами обычно в качестве номинальных требований предусматривается одно- или двухстороннее интеграционное взаимодействие с:

- общезаводским хранилищем данных для получения актуальной информации о фактическом производстве, динамике производительности/изменения показателя механической готовности объектов;
- системой мониторинга (эффективности) работы технологического оборудования для оптимального планирования и ранжированного осуществления мероприятий по ТОРО/PdM ключевого технологического оборудования;
- системой оперативного планирования производства для синхронизации планов по ремонту узлов технологических установок;
- с ERP-системой для предоставления прогнозной информации о возможных потерях производительности от деградации оборудования, данных о состоянии ПФ и уточнения очередности/оптимизации сервисов обслуживания, ранжированных по категориям (критичности) оборудования и видам ТО;
- с системой визуализации контролируемых ключевых показателей эффективности предприятия, оснащенной графическими инструментальными панелями (рис. 5), по иерархической системе KPI [11] (см. рис. 12 в [2]);
- с системой генерации производственных инструкций и учета, либо системой контроля движения нефти и продуктов и (под)системой управления заявками и перемещением материалов (если такая отсутствует в составе EAM или CMMS, для синхронизации информации о маршрутизации заводских потоков на период ремонта);
- при необходимости — с системой управления информационным содержанием организации (ЕСМ);
- со средствами обеспечения инспекций и подсистемой риск-менеджмента (ПБ) по уровню коррозионного износа или данным толщинометрии и др.

На среднем (преимущественно технологическом) уровне современная архитектура приложений НПЗ и нефтехимических предприятий предполагает развертывание в EAM или самостоятельное внедрение (при отсутствии модуля) подсистемы *мониторинга эффективности работы основного оборудования*, в частности, с применением OPC-серверов. Помимо основного назначения подсистемы — оффлайн/онлайн мониторинга технико-экономических показателей работы, функционал инструмента предполагает

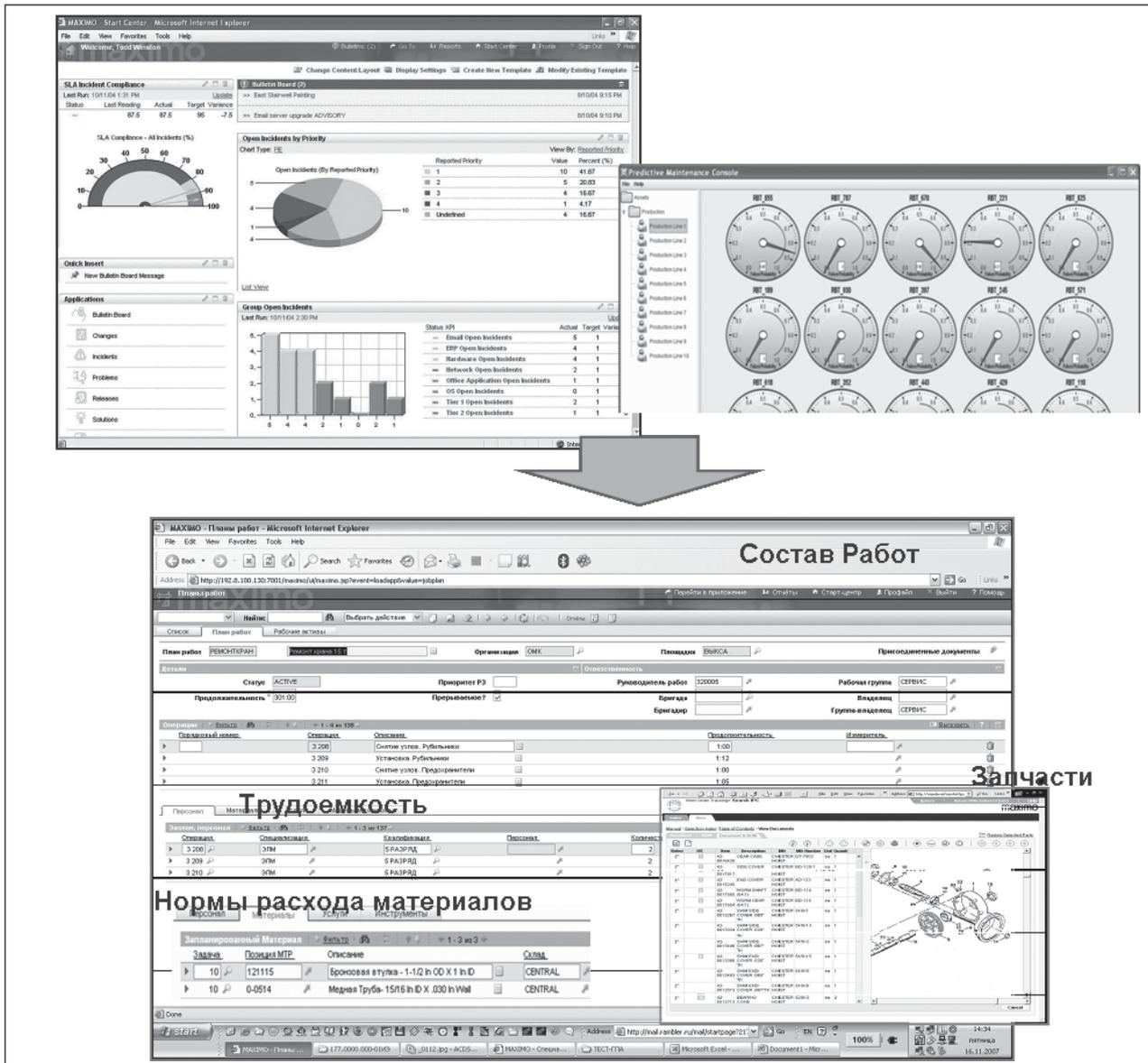


Рис. 5. Мониторинг эксплуатации и непрерывное улучшение показателей активов в течение жизненного цикла при помощи легко конфигурируемых инструментальных панелей (визуализация) KPI в EAM Maximo Asset Management с функцией drill down на уровень технологических карт, контроля работ и нормативов операций

оперативное выявление проблем работы оборудования и генерацию данных для анализа в EAM уровня утраты производительности от деградации оборудования. На этом уровне, естественно, важна интеграция не только с системами инструментального контроля состояния (CM) согласно стандарту ISO 17359:2011 [12, 13] или с распределенными АСУТП (DCS, SCADA), но и с:

- инструментом анализа эффективности мероприятий по ТОРО, если он отсутствует в системе УПФ;
- имитационными моделями технологических установок для точного инженерного моделирова-

ния рабочих параметров, расчетов эксплуатационных характеристик (условий) и ограничений, предкритических состояний элементов технологических блоков и узлов;

- заводской лабораторной информационной системой (LIMS) для получения оперативной информации, в том числе о качественных характеристиках потоков между технологическими узлами;

- специализированным системным уровнем обработки/управления предупреждениями и реагирования на них (Alarm Response Management);

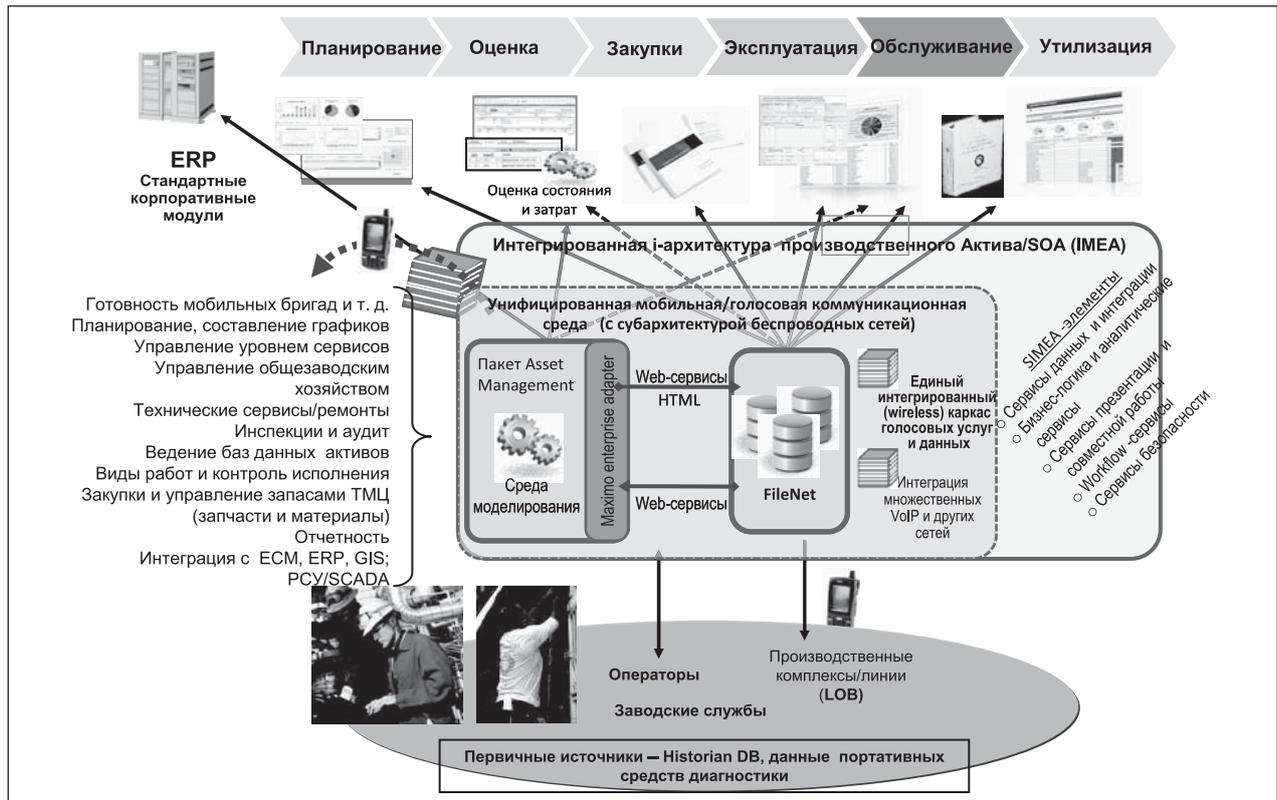


Рис. 6. Пример интеграционного решения (IBM, Motorola) — накопление практик оптимизации за счет синергий архитектурных решений, циркуляции знаний между управлением активами, управлением мобильными сервисами/контентом и процессами организации

- при необходимости — с системой календарного планирования (для анализа отклонений от плана и исследования вариантов его улучшения/корреляции) и CAD/CAM/CAE;

- в перспективе — с системой онлайн оптимизации работы установок (проведение технологической оптимизации групп процессов).

Учитывая объемы циркулирующей информации и сложность многомерной физической реализации, подобная техническая интеграция исключает архаичный способ использования множества интерфейсов к приложениям по принципу «от каждого к каждому». Напротив, во избежание «спагеттиобразной» архитектуры проектируются современные системы управления информацией. Здесь спектр элементов и технологий довольно обширен — от механизма «подписка-публикация» с семантической моделью, усовершенствованных средств ETL³ и ПО-адаптеров интеграции, подсистем управления нормативно-справочной информацией (НСИ или MDM) с поддержкой многопоточковой обработки, — до технологий унифицированного доступа

(EIA), распределенных вычислений («облачные» решения) и разного масштаба интеграционных шин сервисов ESB, основанных на принципах SaaS, PaaS. За рубежом крупные организации уже имеют дело с консолидацией ПО интеграции приложений и интеграции данных в новый рыночный сегмент, называемый Data Services.

Один из вариантов интеграции на принципах SOA и объединенной коммуникационной среды (MEAP) схематически приведен на рис. 6 [14].

Интеграция с системами управления техническими/мобильными сервисами

На объектах нефтяной и нефтехимической промышленности (технологических установках, газопроводах, нефтяных вышках и др.) некачественное обслуживание приводит не только к огромным прямым финансовым потерям. Неточности в инвентаризации активов или ненормативные запасы ЗЧМ могут противоречить отраслевым нормативным актам, привести к увеличению оборотных средств и повлечь соответствующие штрафные санкции или даже

³ Однако и в настоящее время значительная часть предприятий нефтегазовой отрасли продолжает борьбу за организацию и оснащение истинного ТОРО и мобилизацию полевых сервисов/работников, обеспечение нужных ИТ-способностей для эффективной поставки услуг.

дополнительные налоги на имущество. Организации производственного сервиса нацелены на преодоление ограничений текущей экономики в отношении продуктивности услуг ТОРО и повышения готовности ПФ. Поэтому в фокус их внимания попадает решение первоочередных проблем оснащения технических работников (ремонтных бригад и др.) на объектах мобильными устройствами, устраняющими препятствия, возникающие, в том числе, при работе с бумажными документами.

Как показано на примере систем IBM Maximo Asset Management и EAM Infor, применение результатов по программе проактивного RCM возможно отслеживать в полной мере при условии:

- перечисленных выше интеграционных решений;
- посредством расширенных опций управления работами (WM) и поставки сервисов (SD);
- способностей workflow продукта, комбинируя функциональные возможности показанного на рис. 3 конфигурируемого дэшборда KPI с новыми возможностями доступа мобильных устройств к web/mobile-приложениям. В совокупности эти решения и возможности поддерживают элементы стратегии лин-операций и непрерывного совершенствования.

Мобильные вычисления и коммуникации, технологии RFID-локации на складах запчастей, дополненные беспроводными технологиями и локальными вычислительными сетями (БЛВС или WLAN), способны кардинально рационализировать бизнес-процесс (уменьшить число стадий) ТОРО и упростить функции УПФ (рис. 7). Обнаружение неэффективной деятельности, наслаивающейся на необходимые функции обслуживания, позволяет достоверно подтверждать, что критическое для бизнеса оборудование действительно находится в надлежащей эксплуатационной готовности, сопровождается рациональным набором работ ТОРО, тщательно выполняемых в

соответствии с планом. Мобильные технологии существенно (нередко в 1,8–2,5 раза) ускоряют доставку запчастей и маршрутизацию полевых специалистов/бригад, способствуют рациональному распределению обхода/работ (сервисы корректировки последовательности на ходу и т. д.). Онлайн-услуги или удаленный доступ дополнительно уменьшают продолжительность ремонта оборудования, высвобождая время на выполнение неотложных задач. Перечень и конкретные выгоды от применения современных мобильных EAM-приложений приведены в табл. 1 и 2.

Согласно аналитическому исследованию группы Aberdeen Group [15], организации, которые успешно расширили функции подразделений от бэк-офиса до полевого уровня, увязывая их в четко интегрированные рабочие потоки, достигают в среднем увеличения на 16% прибыльности услуг от развертывания мобильных решений. Лучшие же в своем классе компании (из 200 опрошенных) достигли следующих результатов (KPI):

- последовательное среднегодовое уменьшение на 17% усредненного интервала времени на выполнение ремонтов (аналог MTTR) и 18%-ное повышение производительности труда (число закрытых суточных заявок по ТОРО);
- повышение текущего выявления неполадок (first-time fix) на 77%;
- увеличение сервисных маржин (отношение прибыльности к выручке) на 26%.

Подобные решения весьма перспективны, в частности, на мобильных базах (МБ) технических сервисов вблизи промышленных площадок, таких как ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтегазпереработка». Это позволит использовать многочисленные современные средства и оборудование конфигурирования, диагностики, анализаторы, многофункциональные калибраторы для оказания услуг на территории газоперекачивающих станций (ГПС) с малым временем реагирования, предусмо-

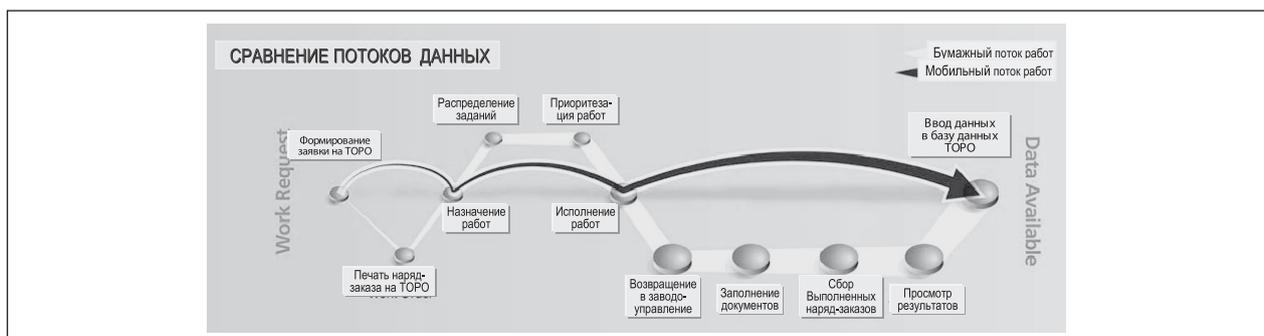


Рис. 7. Упрощение бизнес-процесса ТОРО за счет мобильных решений

Табл. 1. Типовые результаты внедрения мобильных сервисов, поставляемых ЕАМ-системами крупных и средних производственных компаний

Приложение	Описание сервисов	Выгоды, результативность
Мобильный трекинг активов	<p>Автоматическое определение по радиометкам в реальном времени местоположения и/или сканирование штрих-кодов — облегчение и автоматизация работ по отслеживанию нефтяными и химическими компаниями широкого спектра производственных фондов, расположенных на обширных/удаленных промышленных площадках (технологические узлы, стационарное и динамическое оборудование, погружные средства, средства обеспечения промышленной безопасности, клапаны и КиП, оборудование АСУТП, транспортные средства, буровые установки, ДНС и др.).</p> <p>Мгновенное подключение через мобильные устройства к ГИС-приложениям.</p> <p>Оборудование может быть быстро локализовано в случае аварии; при необходимости может быть определено местоположение подвижного состава; автоматическое выполнение учетных операций в случае арендованного оборудования (время прибытия/отправления/нахождения в эксплуатации по лизингу).</p> <p>Детализированное видение в реальном времени запасов и дублирующих единиц в любом удаленном месте (морские платформы и др.), достоверность информации о доступности корректного набора оборудования и поставщика с устранением времени простоя и обеспечением безопасности персонала с его минимальным участием.</p>	<p>Повышение эффективности процесса инвентаризации и продуктивности персонала.</p> <p>Прозрачность в режиме реального времени по запасам элементов активов/оборудования на удаленных, территориально разбросанных площадках с защитой от простоев.</p> <p>Адекватное по затратам соответствие законодательным и нормативным актам по учету — улучшение использования активов, уменьшение текущих запасов.</p> <p>Надлежащее налогообложение по активам.</p> <p>Устранение утраты, угроз потери единиц активов.</p>
Автоматизированное мобильное обслуживание ПФ	<p>Рациональное, адекватное обслуживание для достижения максимальной механической готовности ПФ.</p> <p>При отсылке электронного задания на работы ТОРО непосредственно на наладочные устройства или портативные компьютеры техника-инженера исключается необходимость затрат времени на сбор распечаток заявок на работы в центральном подразделении ТОРО предприятия в начале смены, ручной ввод на автоматизированных рабочих местах с бумажных ведомостей информации о завершенных работах, возвращение в заводоуправление для получения срочных заказов.</p> <p>Работник продуктивно использует все рабочее время на выполнение работ по обслуживанию, (получение и завершение заявок в реальном времени). Диспетчер ТОРО динамически меняет графики обхода и работ в течение рабочего дня в соответствии с приоритетностью поступающих заявок на сервисы.</p> <p>Использование интерфейсов интеграции с современными средствами (полевой) диагностики на месте.</p>	<p>Радикальное улучшение производительности труда инженерно-технического персонала.</p> <p>Надежное своевременное обслуживание благодаря непосредственной визуализации в реальном времени графиков ТОРО, заявок на неотложные сервисные работы, функций их оперативной диспетчеризации.</p> <p>Двухсторонняя связь с инженерами — возможность проактивной регистрации и указания на потенциальные проблемы с оборудованием до их негативного воздействия на производственный процесс.</p>
Управление фондом запасных частей и инструментов	<p>Возможность отслеживания запасных частей и ТМЦ для функций обслуживания в масштабе реального времени с целью поддержания эффективности ТОРО-сервисов и исключения излишних складских запасов ЗЧ.</p> <p>Спецификации требуемых ЗЧ и комплектующих автоматически заполняются для каждого техника на основе дневных заявок на работы. Возможно сканирование всех ЗЧ и инструментов, помещаемых на внутризаводские транспортные средства с генерацией в реальном времени информации о номенклатуре, расходе и размещении выделенного запаса.</p> <p>Устранение необходимости затрат времени на непродуктивные действия (возврат в цех по ТОРО для поиска недостающих ЗЧ, инструмента). В случае экстренного ремонта диспетчер устанавливает местонахождение ближайшего техника требуемой квалификации с необходимым инструментарием и ЗЧ.</p> <p>Совместно с модулем Spare-Parts&Tools Inventory — непрерывный контроль/устранение избыточного буферного запаса.</p>	<p>Устранение потерь эффективности функций обслуживания.</p> <p>Оптимизация уровня запасов ЗЧИМ, инструментов и связанных с ними капитальных затрат.</p> <p>Снижение эксплуатационных затрат, в том числе за счет уменьшения складских запасов и площадей и/или их альтернативного использования для других важных задач бизнеса.</p>

Табл. 2. **Комплексное решение компании Syclo для подвижного персонала ТОПО на базе мобильной платформы Agentry**

Приложение	Описание сервисов	Преимущества
SMART Work Manager	Диспетчеризация заказ-нарядов/заявок на сервисы, ведомости рабочих задач удаленным работникам; обзор исторических данных о производственных активах и сервисах; доступ к конфигурации активов и планированию стандартизуемых задач калибровки	Быстрое развертывание системы и получение результатов; повышение эффективности (производительности) работы персонала
Smart Calibrations	Интеграция модуля с EAM, LIMS с приложением для проведения калибровок; снабжение мобильных работников информацией о конфигурациях и усовершенствованные вычисления в рамках требований NIST и ISO в части калибровок приборов и оборудования	Новый корпоративный стандарт; уменьшение продолжительности процесса; все результаты калибровок и действий автоматически регистрируются для подтверждения соответствия требованиям и отчетности
SMART Inventory Manager	Ускорение расчетных циклов набора инструментов и выбора ЗЧ на основе наряд-заказов; безбумажное исполнение (решение проблем с ЗЧ, перемещения/возврата)	Автоматизация работ по пополнению и использованию запасов; уменьшение числа подпроцессов ТОПО; полное аудиторское отслеживание активностей
SMART Inspections	Обеспечивает быстрый и соответствующий задаче захват количественных и качественных результатов наблюдений; мгновенная загрузка данных инспекций в подсистемы УПФ и бэкэнд-системы	Полные и отслеживаемые данные обеспечивают адекватное и четкое принятие решений, полноценную отчетность
SMART Schedule	Оптимизация труда рабочего персонала и инженерно-технических работников посредством эффективных графиков работ, оптимизация обходов и приоритезация задач с диспетчеризацией заказ-нарядов	Автоматический скедулинг ТОПО с поддержкой принятия решений по критериям заказчика
SMART Mobile Sales	Доступ к информации заказчика и ее обновление сервисной организацией непосредственно на объекте в соответствии с требованиями законодательства	Инициация и прямой контроль фонда (закупка) ЗЧ, материалов и комплектующих

тренным договорами обслуживания (4–8 ч на устранение неисправности/ремонт).

Новые разработки и интеграция мобильных средств сбора эксплуатационных данных, управления сигнализациями. Современные беспроводные решения

Полномасштабные решения по управлению ПФ были бы невозможны без портативных инструментов сбора данных о состоянии и управления событиями, онлайн диагностики/контроля состояния и производительности оборудования. Так, опираясь на тесную обратную связь с заказчиками, компания SKF разработала новый программный модуль Microlog Inspector — следующее поколение системы Marlin inspection. Приложение обеспечивает возможность управления рабочим потоком и сбора данных внутри технологического объекта и между разными производствами завода, включая производственные операции, обслуживание/контроль контракторов, безопасность, мониторинг эксплуатации и состояния в рамках «одномодульного мобильного» решения [16].

Совместимость с большинством портативных устройств платформы Windows или

Android позволяет пользователям использовать как массовые мобильные аппараты, например смартфоны, так и i-Pad в промышленном исполнении и коллекторы/анализаторы данных линейки Microlog и др. (рис. 8). Microlog Inspector позволяет автоматически в беспроводной среде подсоединяться к центральному серверу, загружать последние маршруты, работы и т. д. и передавать собранные данные любому возможному удаленному компьютеру, в базы данных вне зависимости от географического расположения (поддержка коммуникаций через LAN/WLAN, USB, Wi-Fi (WiMAX) и подсоединение к сотовым сетям данных). Новый продукт компании SKF напрямую интегрируется с пакетом приложений SKF @ptitude Inspector, в котором данные анализируются, информация группируется в отчеты и распространяется по всему предприятию через функционал SKF @ptitude asset management system (Microlog Inspector в последнем релизе поставляется с коннекторами к SAP MM и продуктами ряда других лидирующих поставщиков EAM).

Функционально насыщенное и полностью конфигурируемое мобильное решение для EAM фирмы Syclo для подвижного персонала рассма-

тривается как одно из перспективных для нефтегазовой промышленности [17]. Этот оригинальный продукт промотируется и поддерживается двумя ключевыми поставщиками ERP-пакетов. Система разработана на платформе мобильных сервисов AGENCY, совместима с продуктами SAP и реализована в виде 5 преднастроенных и начально-интегрированных модулей. Гибкая, рациональная политика продаж и сопровождения производителем обеспечивает почти линейное уменьшение расходов при установке каждого следующего приложения.

Похожие комплексные решения предлагают компании Emerson (AMS), Invensys и Honeywell. В частности, портфель ИТ-решений Honeywell по промышленной автоматизации в последние 5–6 лет последовательно дополняется серией беспроводных технологий и «экосистем» OneWireless. Спектр предложений чрезвычайно широк — от mesh сетей WLAN, обеспечивающих беспроводной охват для Wi-Fi и wireless-преобразователей, формирующих самонастраивающиеся сети; переносных компьютерных устройств, включая Webpad с мобильными приложениями; беспроводных видеокамер — до газоанализаторов и детекторов, беспроводной датчиковой аппаратуры (см. рис. 8, а, в, д). Все эти системы и устрой-

ства интегрированы с DCS (Experion, DeltaV) или системой обеспечения безопасности (EBI). Компания Invensys Operations Management выпустила в 2010 г. обновленную версию продукта Wonderware IntelaTrac для управления мобильным персоналом и поддержки принятия решений. Система IntelaTrac 4.0 позволяет надлежащим образом исполнять лучшие практики промышленных компаний в части процедур управления и обслуживания ПФ с адаптацией рабочего потока к реальным условиям эксплуатации установок, с оптимизацией затрат. Возможны комплексные решения на платформах типа Wonderware System Platform для управления (обмена) данными между полевым персоналом ТОПО, например на НПЗ и химическом предприятии или в сегменте upstream нефтегазового сектора, обеспечивающие прозрачность операций реального времени (рис. 9, 10). Также возможно взаимодействие с другими мобильными системами за счет внедрения новых инструментов интеграции с ключевыми производственными системами (MES). Так, в сочетании с установленными беспроводными КИП (см. рис. 9), новый модуль IntelaTrac и его аналоги для нефтегазовой отрасли обеспечивают специальные удаленные вычисления объемных параметров резервуаров по преобразованию

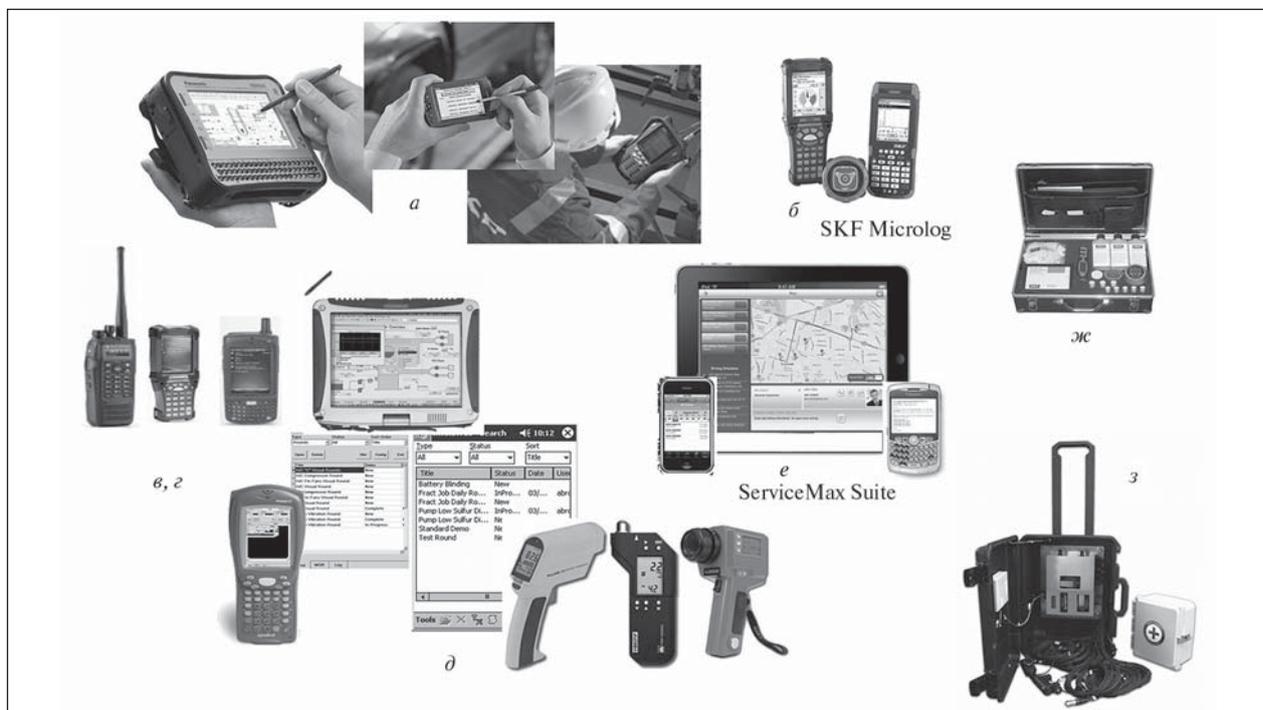


Рис. 8. Продуктовые линейки EAM-mobile/wireless компаний Emerson (а), SKF (б), Honeywell (в), Motorola (г), Wonderware IntelaTrac 4.0 (д) и ServiceMax (е), включающие широкий спектр переносных и периферийных мобильных устройств: коммуникаторы, коллекторы данных, анализаторы, диагностические наборы (ж, з) для поддержки производственных операций и обслуживания

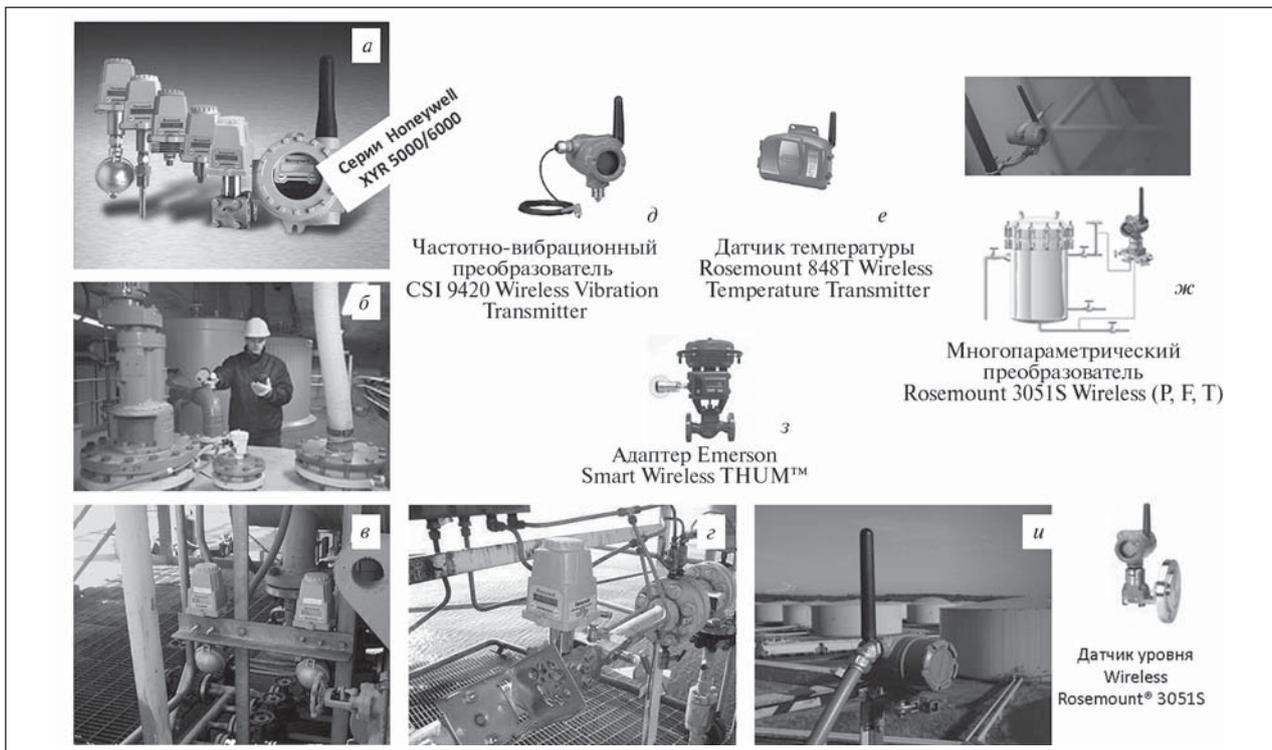


Рис. 9. Линейки беспроводной датчиковой аппаратуры (сенсоров) — базовых радиомодулей, wireless-преобразователей давления, температуры, расхода, параметров вибрации и др.: примеры приборов компаний Honeywell (а–г) и Emerson/Rosemount (д–и)

кривых/диаграмм давления и др. Имеются расширения для интеграции с ПО производственного учета (приложения Tieto Energy Components и др.), информационного обмена через мобильные станции с центральным пунктом обслуживания/ТОРО (рис. 11). Ряд сервисных организаций предлагает также комплексные переносные наборы и кейсы для первичной диагностики на месте, ремонта (см. рис. 8, ж, з).

Компаниями накоплен огромный опыт проектирования и применения новых разработок на заводах, полевых объектах, на месторождениях углеводородов. Этот опыт оформляется и распространяется в виде глобальных корпоративных стандартов. На предпроектной фазе полезен анализ 2D- и 3D-графического вида объекта/площадки для выявления любых потенциально проблемных мест (точек) и зональных препятствий в развертывании сети в виде сооружений для беспроводной передачи на значительные расстояния (рис. 12). Отметим, что фирмы Honeywell и Emerson чаще других выступают одновременно в роли главного подрядчика по автоматизации (IMAC) и провайдера wireless.

Приближение к онлайн-режиму управления полным циклическим процессом RCM в

тесном взаимодействии с обновляемыми пакетами, в том числе с мобильными приложениями EAM, позволяет получить четкую нацеленность на основные области выгод (цепочки роста прибыли) на производстве. Тем самым, открывается путь к оперативному проведению лучшего выбора среди различных задач и опций обслуживания. Динамически обновляемая рабочая программа (DRCM) становится интегральной частью формирования и оперативного исполнения общей стратегии УПФ/ТОРО бизнес-сегмента компании, поддерживающих операционную деятельность организации (конвергенция ИТ-систем управления производством и ПФ). Одним из важных сетевых устройств в некоторых интегральных решениях являются многоточечные узлы доступа к промышленным mesh-сетям типа OneWireless™ (Honeywell) [18, 20], разработанные для расширения сети управления процессом на полевой уровень. Такие мультиноды способны осуществлять маршрутизацию данных между Wi-Fi (IEEE 802.11 b/g), 802.11n клиентами, полевыми приборами ISA100.11a и устройствами в Ethernet/IP.

Некоторые примеры простых, рациональных и эффективных технических решений с применением мобильных и/или беспроводных технологий приведены в табл. 3 [16, 19, 22–28].

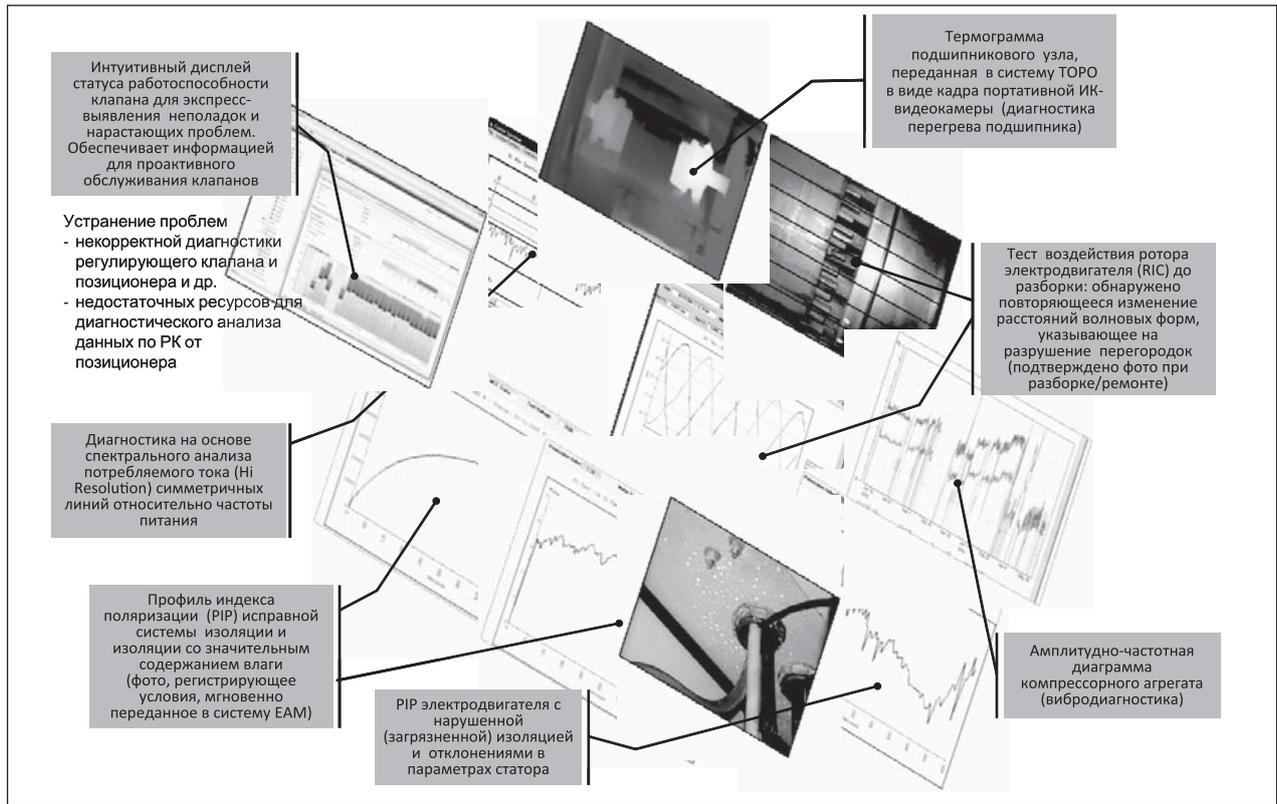


Рис. 10. Унифицированные графические интерфейсы в стандартных и мобильных EAM(PAM)/AMS-решениях обеспечивают одно- и двустороннюю передачу данных он/оффлайн диагностики и аутентичной визуализации объектов ТОРО (диаграммы, фото, графики, термограммы, и т. д.), расширение практик применения подходов RCM2/SixSigma



Рис. 11. Онлайн ввод и обмен данными о производственных объектах в беспроводной среде завода

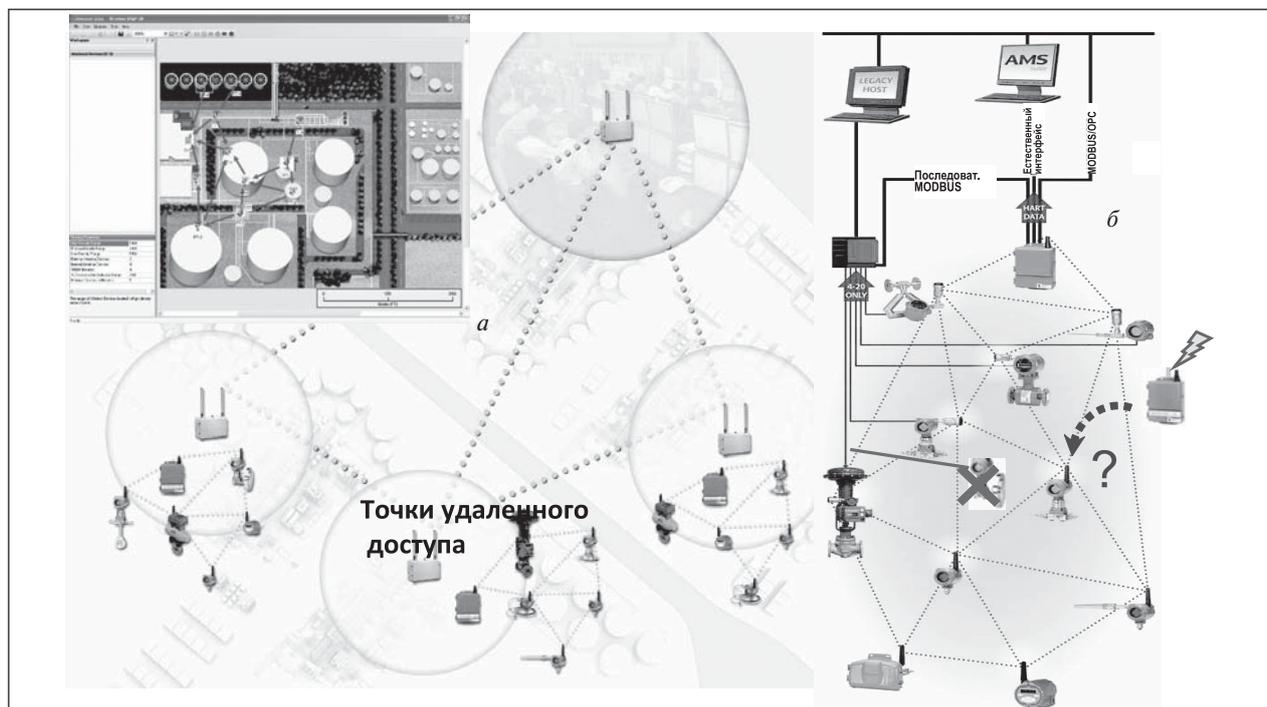


Рис. 12. Анализ: *а* — графического вида объекта для выявления любых потенциальных узких мест и радиопрепятствующих самоорганизующейся беспроводной сети; *б* — применимости вариантов топологии комбинированных сетей по расчетам коммуникационных возможностей, числа последовательных устройств и соответствующих *N* регистров полевой шины типа Modbus, параметров защищенности сериальных элементов БЛВС

Следует отметить, что основное количество таких решений направлено на мониторинг состояния оборудования (вибродиагностику), КИП и исполнительных механизмов, контроль трубопроводных систем и коррозии, мониторинг кустов скважин, объектов общезаводского хозяйства (резервуарных парков и др.) [19, 21, 22].

Такое положение связано с тем, что решения, отвечающие новым разнообразным требованиям ИТ-безопасности и физической целостности (устойчивость против кибер-вторжений, требования при сертификации по уровню SIL3, бесперебойность *in situ* питания передающих полевых устройств) и развертывания пока находятся на стадии широкой промышленной апробации. Продолжается также рассмотренное ниже развитие сетевых стандартов средне- и широкополосной передачи и решение вопросов интеграции стандартов IEC/PAS 62591(WirelessHART®), WIA-PA (IEC/PAS 62601) и ISA100.11a (100.12)⁴. Однако уже свыше половины всех потенциальных заказчиков бизнес-сегмента *downstream* намерены в ближайшие два года расширить область беспроводных систем и осуществить проекты их

внедрения, включая мониторинг теплообменного оборудования, целостности аппаратов (акустико-эмиссионный метод [29]), оптимизацию тепловых заводских потоков.

Развитие и стандартизация требований к инфраструктурным компонентам wireless и беспроводным сервисам (ИТ-составляющие). Фундаментом общей ИТ-инфраструктуры производства будущего десятилетия станет развитие интегрированной физической и логической архитектур, в том числе самонастраивающихся сетей или компонентов *wireless*, полевого уровня, охватывающего классические и интеллектуальные КИПиА и беспроводные коммуникации заводского уровня.

При рассмотрении беспроводных решений для управления процессами и контроля состояния производственного оборудования крайне важными аспектами становятся расширяемость систем и сохранение произведенных инвестиций. Общие требования к протоколам и параметрам организации и функционирования сетей широкополосного радиодоступа, беспроводным коммуникациям на уровне устройств и

⁴ Отдельные проблемы на территории России — выделение частотных диапазонов гражданского назначения против резервированных потребностей военно-космического комплекса, устойчивость функционирования промышленных беспроводных сетей.

Табл. 3. Практические примеры применения комбинации мобильных решений и беспроводных технологий на предприятиях с непрерывными процессами (циклом) производства

Проект или проблема объекта/предприятия	Поставщик системы	Описание проектного решения (компонентов)	Преимущества
1	2	3	4
Газовое месторождение Shah Gas (Абу-Даби). Проект WLAN в пределах промышленной площадки/подготовки и между промышленными объектами (скважинами), предназначенный для сбора и мониторинга данных о дебитах, ключевых показателях эффективности оборудования, персональных данных на стадиях строительства, эксплуатации и обслуживания	Система OneWireless (Honeywell)	OneWireless Network, объединяющая переносные компьютеры; беспроводные газовые детекторы для передачи в реальном времени и регистрации на устройствах Dolphin™ и Webpad Honeywell предупреждений о выбросах сероводорода в строгом соответствии с требованиями по безопасности заказчика (Abu Dhabi Gas Development Location and Safety Requirements)	Контроль ключевых эксплуатационных параметров, разработка графиков обхода; быстрое развертывание системы и получение результатов; точное местоположение и повышение производительности труда персонала
Проект беспроводной сети фирмы на морском месторождении у побережья Восточной Африки для передачи технологических данных	То же	Конфигурация и эксплуатационные характеристики: – применение мультиузловой конфигурации с подсоединениями «точка-точка» наряду с направленными антеннами для передачи данных между платформами; – 100%-ная надежность сигнала-strength между двумя множественными нодами при скорости передачи 14 Мбит/с и временем задержки до 2 мс	Полное соответствие требованиям Стандарта ISA 100; максимальное уменьшение времени сбора данных о процессе и оборудовании; автоматическая регистрация результатов и потребности в работах ТОПО; генерация отчетов
Установка замедленного коксования крупного НПЗ ведущей НГК. Обнаружение забивки фильтров установки критично для целостности насосов. Завод использовал устаревшие пневмопреобразователи, требующие визуального считывания показаний с большой погрешностью и интенсивного обслуживания. Требования заказчика: внедрение технологии надежного и точного измерения давления удаленно, как части системы раннего предупреждения по шести объектам НПЗ	Smart Wireless; беспроводные устройства (Emerson)	Заказчик не заинтересован в дорогостоящей проводной обвязке КИП и подводке линий энергообеспечения приборов на фильтрах. Электронные беспроводные преобразователи давления Rosemount 3051S Wireless установлены на установке коксования и контролируют всю зону фильтрации. Мосты передачи Smart Wireless Gateway для обратной коммуникации устройств с операторной	Эффективное по затратам решение Smart Wireless, обеспечивающее надежность и качественное обслуживание; экономия 81 тыс. дол. США на каждый фильтр; максимальная готовность оборудования установки коксования; обеспечение надежной сигнализации через Wireless pressure о прогрессирующей забивке фильтров насосов
Установка алкилирования на НПЗ (ENAP, Аргентина). Причина аварии компрессора — отказ подшипников. Наиболее точный способ своевременного выявления предаварийного состояния — постоянный мониторинг температуры подшипника во взрывоопасной зоне с применением программы предупредительного ТОПО	Система OneWireless; беспроводные устройства XYR 5000 (2008 г.)	Ввиду наличия опасных газов в зоне компрессора необходим класс 1 (подразд. 1) защиты проводных соединений между 32-мя преобразователями объекта и операторной, что невыгодно по экономическим соображениям. Выбор беспроводного проектного решения для DCS/CBM с применением преобразователей Honeywell XYR 5000 wireless (срок службы батарей — 3–5 лет, точность — ±0,1%)	Уменьшение времени и затрат на установку WNW (100 тыс. дол.), обслуживание, эксплуатационных расходов; удовлетворение требованиям по промышленной безопасности; устранение предаварийных состояний, дополнительно 30% времени непрерывной эксплуатации; гибкость ТОПО

Окончание табл. 3

1	2	3	4
Проект EAM/CMMS, (расширение установки каталитического крекинга) НПЗ ConocoPhillips	OneWireless Honeywell	Комбинация проводных и беспроводных решений для динамического оборудования. Быстрая загрузки данных СВМ и инспекций в подсистему EAM. Беспроводные средства диагностики	Своевременные профилактические мероприятия ТО в межремонтный период, уменьшение продолжительности капитального ремонта на 12–15 сут.; суммарная дополнительная прибыль в размере ~1,5 млн дол. США
Проект компании Atlas Pipeline Westex по передаче данных с нового и старого объектов при трубопроводе в новую операторную. Согласно технико-экономическому обоснованию, проводное решение экономически не реализуемо, т. е. wireless — единственный приемлемый путь к осуществлению проекта	EPC Smart Wireless technology AMS Suite: Intelligent Device Manager	Внедрение Smart Wireless, сокращение затрат на внедрение и СМР ~ \$725 000. Передача и интеграция данных при помощи самоорганизующихся (IEC 62591) беспроводных сетей по протоколу WirelessHART — 99 беспроводных интеллектуальных полевых устройств Emerson Rosemount и преобразователей КИП, объединенных 3-мя «умными» мостами SWG	Повышение производительности объектов Benedum переработки/транспортировки природного газа с 3-кратным уменьшением стоимости проекта; механическая готовность 97%; AMS Suite (Intelligent Device) Manager для активной диагностики и прогностического ТО
Два НПЗ компании Petrobras	Smart Wireless; беспроводные устройства (Emerson)	Свыше 200 беспроводных интеллектуальных передающих устройств/ КИП, в том числе 56 преобразователей давления, Rosemount 3051S Wireless, 61 датчик температуры Rosemount 648 Wireless, измерение параметров оборудования, потоков пара на турбинах, насосах, экономайзерах, нагревателях питающей воды и воздуха, бойлерах, генераторах и др.; 7 мостов Smart Wireless Gateways установлены на турбинных установках	Интеграция потоков данных из самоорганизующихся сетей в существующую систему ТОПО на основе ПО Ovation

т. д. изложены в требованиях IEEE и стандарте ISA 100 Международного общества по автоматизации [30]. Напомним, что в настоящее время существуют два основных протокола беспроводных коммуникаций: HART Communication Foundation's WirelessHART specification и стандарт ISA 100.11a. Практика показывает, что у организаций, опирающихся на последний стандарт, потенциально возможна обработка гораздо бóльших объемов данных о процессах/оборудовании. Эти организации обладают также возможностями межоперационного взаимодействия между беспроводными полевыми устройствами различных производителей.

WirelessHART (стандарт IEC 62591, часть спецификаций HART 7) является стандартом открытого протокола связи для преобразования сообщений формата HART по беспроводным каналам, в отличие от сред 4–20 мА или RS484, и использует такую же структуру команд, как и устройства на основе 4–20 мА/HART. В противоположность ему, стандарт

ISA100.11a представляет собой полноохватный индустриальный подход для непрерывных и дискретных производств, используемый при создании расширенной беспроводной сети для процессно-центричного предприятия [30, 31]. Эта технология разработана для аккумуляции различных спецификаций — FOUNDATION Fieldbus, Modbus, Profibus, HART, Common Industrial Protocol (CIP) и др. Она поддерживает беспроводные платформы по разнообразным, в том числе встречным операциям, на уровне технологических установок завода, формируя базис для среды приложений с открытым кодом. Технология характеризуется интероперабельностью в соответствии с основополагающим стандартом ISA 95.xx. Одновременно протокол обеспечивает лучшую частоту обновления представляемых данных (1 и 5 с в решениях Honeywell по состоянию на конец 2010 г.), удовлетворяет требованиям по созданию отказоустойчивой обратной связи в сетях Process Control Network (PCN). Это стало возможно благодаря эмуля-

ции слоев приложений для любых проводных полевых шин и интеграции с существующими распределенными системами управления и системами СВМ. Имеется также возможность повторного использования унаследованных средств и интерфейсов в действующих АСУТП для максимального уменьшения времени разработки и тестирования. Последнее обеспечивает ускоренное и не столь дорогостоящее внедрение системы в целом.

Пакеты разработки и управления беспроводными системами. Доступ к сетям «без границ». Крупные компании по автоматизации и беспроводным технологиям, частично упомянутые выше, опираются на передовые разработки компаний-лидеров в области телекоммуникационных приложений и оборудования и продвигаемые совместно с ними стандарты. В качестве примера ниже приведены разработки по бизнес/операционным приложениям (беспроводное видео, голосовые функции, мобильные средства и отслеживание фирмы Cisco — Wireless Control System (WCS). В настоящее время это одна из основных платформ для разработки, конфигурирования беспроводных локальных сетей, управления мобильными сервисами. С ее помощью ИТ-специалисты формируют, контролируют, отслеживают импорт различных объектов типа Google Earth, формируют карты охвата и иерархические виды, разрешают сетевые дефекты и сбои, проблемы интерфейсов и предупреждения по оборудованию; формируют функции управления оборудованием; определяют политику безопасности доступа посетителей и авторизованных пользователей (локальная и RADIUS-аутентификация и т. д.). WCS включает регулярно обновляемую систему предупреждения/регистрации вторжений (Integrated Intrusion Prevention & Detection System, IPS/IDS), интегрированную с управлением внешними сетями в целях упрощения и снижения полной стоимости владения.

Современную архитектуру с облегченным протоколом Lightweight Access Point Protocol (LWAPP) для крупных локальных сетей WLAN определяют, в том числе, беспроводные LAN-контроллеры. Сетевые менеджеры за счет автоматизации конфигурирования получают столь же простые контроль безопасности, дублирование и требуемую надежность для экономически рационального масштабирования, как и в случае управления/расширения проводных сетей. WLAN-контроллер работает в комбинации с прочими компонентами Cisco: Aironet® lightweight access points, WCS.

Другие продвинутое решения Cisco предоставляют компаниям функции идентификации и строгого управления политиками [32]. Cisco AnyConnect Secure Mobility (2010 г.) интегрирует функциональность безопасных клиентских мобильных устройств Cisco AnyConnect Secure Mobility Client, устройств веб-безопасности Cisco IronPort S-Series Web Security Appliance и многофункционального защитного устройства Cisco Adaptive Security Appliance (Cisco ASA 5500). Комплексный подход в части удаленного доступа нового поколения, современные функции веб-безопасности и встроенные в это решение «умные» функции борьбы с угрозами помогают предприятиям распространять политики безопасности на «междисциплинарных» мобильных пользователей MES-EAM-модулей.

Архитектура разумных беспроводных решений (РБР). Smart Wireless не является жесткой моделью построения «снизу-вверх» или «сверху-вниз». Архитектор РБР может начинать построение топологий, как минимум, двух типов [23] с любого уровня в зависимости от приоритетных потребностей (см. рис. 12, б). Отметим некоторые основные черты данного подхода.

- Свободная масштабируемость. Однотипное расширение данной архитектуры можно начинать либо с уровня полевых сетей/шин для мониторинга информации о технологических процессах и оборудовании, либо на уровне производственной сети (Plant Network) для контроля улучшения производительности труда технического персонала и управления производственным комплексом.

- Поддержка множественных и гибридных сетевых решений. Для надлежащего понимания того, где и когда работникам необходимо беспроводное связывание, к проектам необходимо подходить с предосторожностью и исчерпывающей предпроектной подготовкой. Мобильные решения, поддерживающие производственные беспроводные гетерогенные сети, должны обеспечивать:

- advanced-конфигурирование ПО для применения различных методов коммуникаций в зависимости от доступности, стоимости и технического удобства;

- добавление дополнительного уровня надежности в ИТ-решение, позволяющего устройствам следовать различным методам и схемам связи, если нарушается основной канал (схема) коммуникаций.

- Уменьшение продолжительности цикла обработки заданий путем мгновенных коммуникаций, резкого ускорения процедур/работ и захвата данных в ходе часто повторяющихся

и/или затратных по времени сервисных активностей: инспекции, замены, калибровки КИП, доставки ТМЦ.

Обобщая беспроводные решения, можно отметить следующие преимущества практического применения РБР для компаний-реципиентов технологий (РБТ):

- быстрое распространение опыта внедрения новейших промышленные технологий беспроводной связи и контроля;
- РБТ революционизируют процессы измерений и взаимодействия с объектом/персоналом;
- открываются новые возможности повышения эффективности (продуктивности), оптимизации производства, надежности и безопасности технологических объектов с одновременным снижением затрат на внедрение коммуникационного решения на 15–60%;
- обеспечиваются, в том числе посредством включения дополнительных беспроводных преобразователей и мостов, лучшие, наиболее рациональные и точные прикладные альтернативы: топология (см. рис. 11), супервизорный контроль, расширенные индикации, мониторинг и выявление «узких мест» ПФ;
- возможность эксплуатации в наиболее требовательной, с точки зрения условий, окружающей среде (взрывобезопасность и т. д.), поддерживаемая новейшими достижениями в радиотехнике/технологиях и усовершенствованиями коммуникационных протоколов;
- вклад самовосстанавливающихся беспроводных mesh-сетей в многочисленные промышленные прикладные разработки и сервисы в области производственной автоматизации (помимо собственно обычных полевых устройств с wireless-возможностями).

Для решения проблем защиты информации и выбора параметров при планировании описанных телекоммуникационных сетей (ТС) предлагается, среди прочих, использовать методы регуляризации некорректно поставленных задач [33], в частности — метод Тихонова, когда исходная постановка заменяется задачей поиска минимума функционала:

$$\Phi_{\alpha}(p) = \|Ap - f\|_F^2 + \alpha\Omega^2(p),$$

где $A: D(A) \rightarrow F$ — оператор, описывающий работу сети; $p = \{p_1, p_2, \dots, p_m\} \in M_p \subset U$ — параметры гетерогенной ТС; $f = \{f_1, f_2, \dots, f_n\} \in F$ — характеристики ТС; U, F — гильбертовы пространства; $\alpha > 0$ — параметр регуляризации; $W(p)$ — регуляризирующий функционал.

Дальнейшая интеграция: мониторинг состояния производственного оборудования + система

управления предупреждениями и реагирования на сигнализации (СУС или ARM, Alarm Response Management). Среднесрочным трендом является апгрейд существующих ПО и технических средств и выпуск, согласно заявленным планам производителей в данном сегменте рынка, новых инспекционных систем и специализированных модулей, ориентированных на использование мобильных средств и обеспечивающих функции:

- совместного сбора и проверки технологических данных и данных систем СВМ, обработки сигнализаций и сообщений (предупреждений);
- связывания данных и сообщений (сигнализаций) в потенциальные и свершившиеся события;
- согласования и балансировки событий для проактивного управления технологическими активами и ТОРО.

Общепринятой в настоящее время является многослойная концепция обеспечения производственной безопасности, поддерживаемая Консорциумом по управлению аномальными ситуациями (ASM). Ядром многоуровневой системы защиты служат технические проектные решения по процессу и характеристики систем управления. Часть из показанных на рис. 13, б слоев должна быть автоматизирована (некоторые из функций основаны на предотвращении аварийных ситуаций по степени риска, логиках блокировок). Другие функции предполагают интерпретации и меры по предупреждению/смягчению последствий отказов и нештатных ситуаций с вмешательством оператора согласно когнитивным моделям поведения и т. п.

Управление сигнализациями/тревогами является одной из наиболее сложных проблем эксплуатации РСУ и использования систем СВМ. Известно, что чрезмерно высокая интенсивность (частота) сигнализаций (рис. 14), в лучшем случае, может стать помехой и ухудшить производительность. Однако необычные сигнализации, требующие корректного неотложного реагирования, могут оказаться опасными и даже фатальными для производственных фондов. Не столь давняя техногенная катастрофа нефтехранилища Buncfield Oil Depot в США (переполнение резервуара и взрыв на нефтехранилище), унесшая десятки жизней и стоившая 1,5 млрд дол. демонстрирует, что может случиться, когда система тревожных сигнализаций и/или реакция оператора отказывают в качестве одного из первых уровней защиты технологического объекта перед ПАЗ.

Одним из основных принципов управления сигнализациями является надлежащая ответная реакция. Это означает, что если оператору не

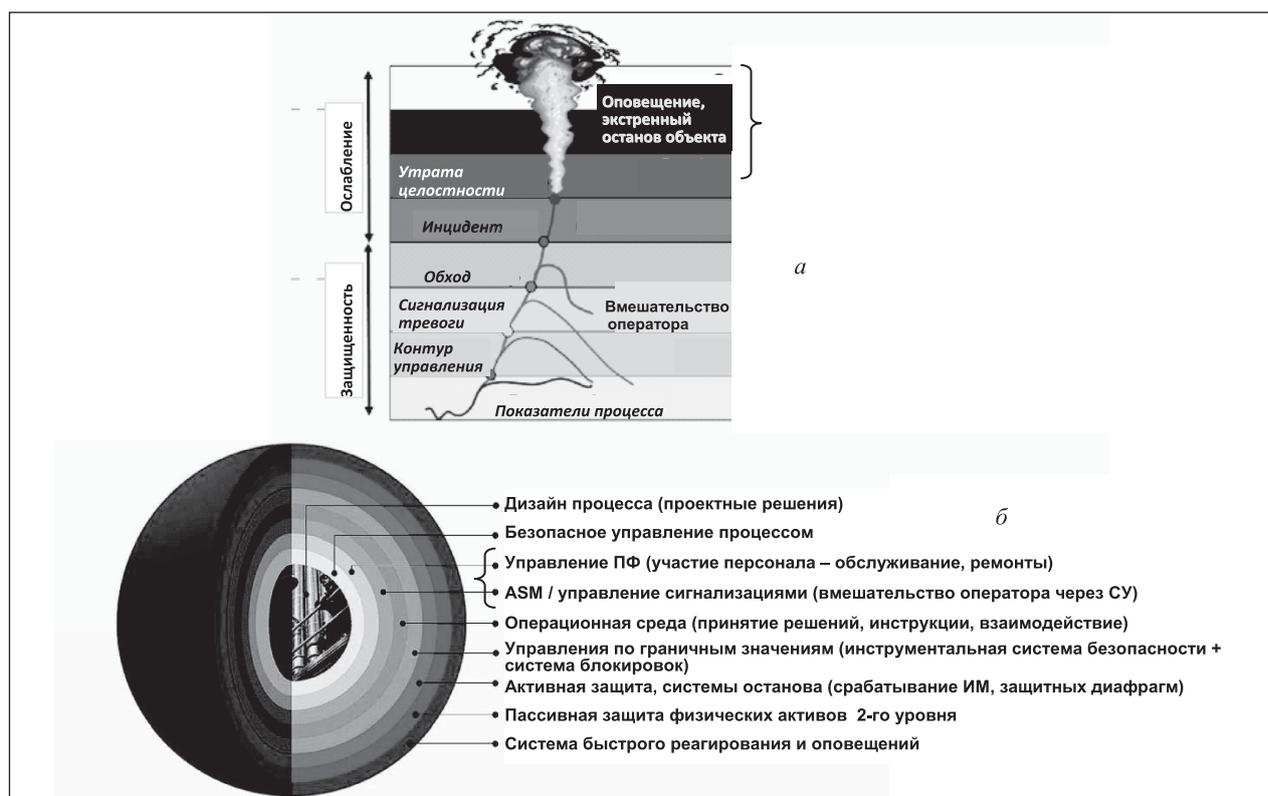


Рис. 13. Послойная структура технологической защиты и системы производственной безопасности (а), их влияние на процесс в интерпретации компании Honeywell и консорциума ASM (б)

требуется ответных действий по сигналу (в силу того, что неприемлемые последствия не возникают), эти точки не включаются в набор актуальных сигнализаций. Следование данному кардинальному правилу, а также оптимизация числа сигнализаций на одного оператора (см. рис. 14 и 15, б) позволяет исключить многочисленные потенциальные проблемы с предупреждениями/тревогами (табл. 4). Так называемые *chattering* и аналогичные помехосоздающие сигнализации делают выявление реального предупреждения гораздо более сложной задачей с большой вероятностью его потери. Это приводит к тому, что нежелательные эксплуатационные условия существенно ухудшаются или становятся недопустимо продолжительными. Пересмотренный набор рекомендаций в стандарте ANSI-ISA 18.2 Alarm Management Standard for Process Industry (2009) [34] дает основу для устранения или предупреждения проблем, подобных тем, которые приведены в таб. 4.

Подобно стандарту ANSI 84.00.01–2004, ч. 1 (IEC 61511-1 Mod)/ISA-84 по безопасности процесса, ISA-18.2 основывается на подходе жизненного цикла. При этом существует ряд фаз, где фазы смыкаются. Результат подпроцесса Safety Hazard and Risk Assessment можно

рассматривать как вход на фазе идентификации сигнализаций. Полный жизненный цикл управления сигнализациями [35, 36] представляет собой набор последовательных стадий, увязанных в итоге в мониторинг и управление изменениями в системе ARM, как показано на рис. 15, а.

Рационализация тревожных сигнализаций. Одной из ключевых («конструктивных») стадий является субцикл принятия решений Alarm Rationalization, включающий ряд активностей. Традиционно под термином «рационализация» специалистами понимались действия команды по обзору и принятию решений по использованию, приоритетам, уставкам и т. д. В новой версии стандарта ISA-18.2 для процессных отраслей это понятие расширено и указывает на комплекс следующих активностей, которые могут быть выполнены разными способами:

- подтверждение, что тревожные сигнализации удовлетворяют условиям, изначально зафиксированным на стадии 1 формирования аларм-философии;
- подтверждение производственно-технической потребности в типе сигнализаций;
- процедуры удаления несуществующих («фантомных») сигнализаций;
- определение наиболее подходящего типа

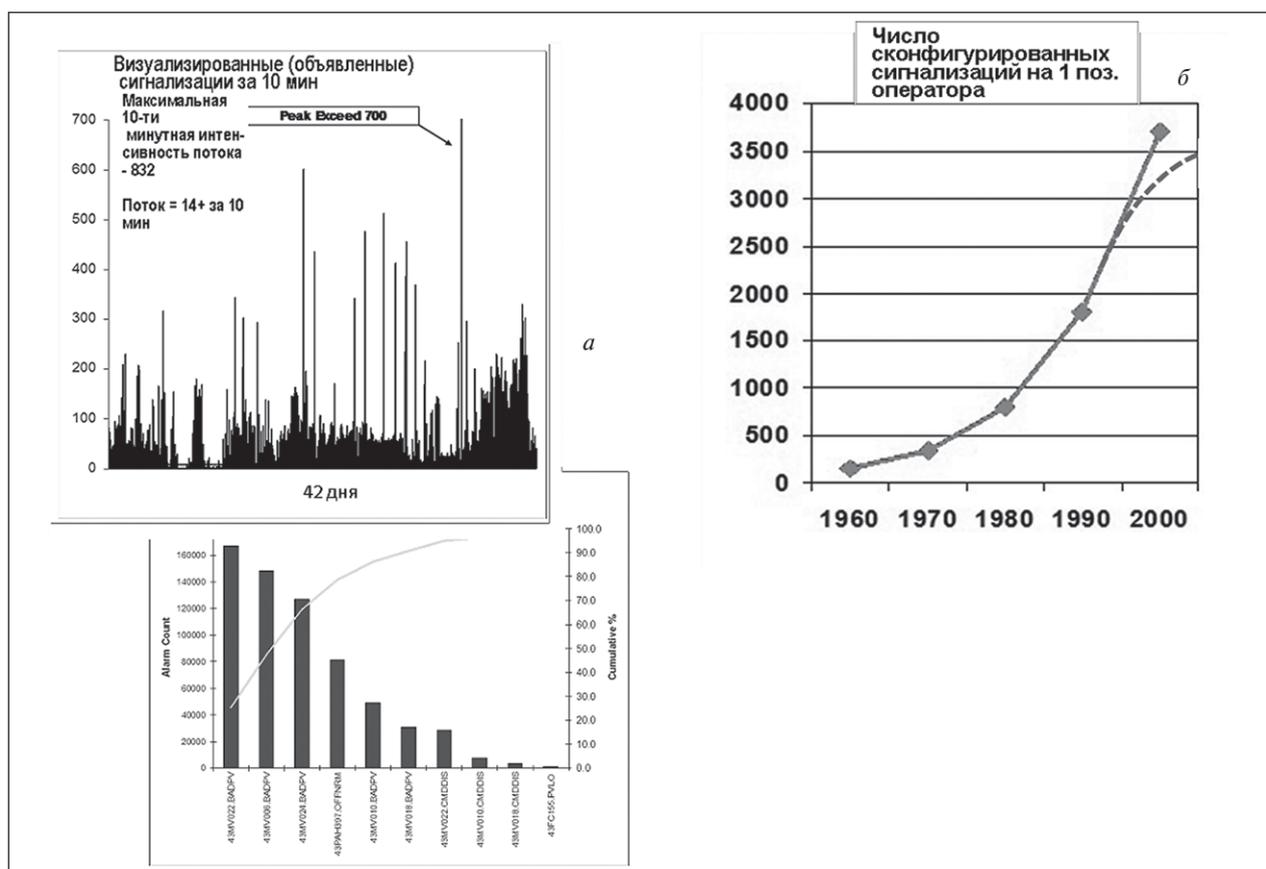


Рис. 14. Примеры сверхвысокой нагрузки сигнализаций на оператора 1990–2000-х гг.: а — скорость 10-минутного потока; б — увеличение среднего числа возникающих сигнализаций по процессным отраслями (нефтегазодобыча и нефтехимия)

Табл. 4. Типовые проблемы в организации системы сигнализаций

Проблемы управления сигнализациями	Причины
Генерация сигналов, игнорируемых оператором	«Помеховые», отвлекающие сигнализации («назойливые трещотки»/срабатывания, кратковременные тревожные сигнализации), неисправная аппаратура, дублирующие и каскадирующие сигналы; неправильная настройка сигнализаций, тревожные сигнализации не рационализированы
Оператор не знает, как реагировать на отдельные сигнализации	Отсутствие специальной подготовки и не полностью продуманные, неадекватные процедуры действий по сигналам
Незначительные сбои и отклонения на объекте вызывают большое число сигнализаций	Средняя интенсивность загрузки сигнализаций слишком велика. Дублирующие/повторные сигнализации, каскадные сигналы не рационализированы
Огромный поток сигнализаций. Мониторы СУС перенасыщены сигнализациями, даже в случае отсутствия ложных сигналов	«Отвлекающие», «плохие» сигнализации (кратковременные сигнализации); неисправная аппаратура, дублирующие и каскадирующие сигналы; неправильная настройка сигнализаций, тревожные сигнализации не рационализированы
Долговременное постоянное (свыше 24 ч) присутствие сигнализаций на дисплеях	Корректирующие действия не эффективны; поломка или вывод из эксплуатации оборудования, изменение эксплуатационных условий на установке
Во время сбоя оператор перегружен слишком большим числом сигнализаций и не в состоянии определить наиболее критические	Неправильная приоритезация сигнализаций и сообщений. Не используются усовершенствованные методики (фильтрации) сигнализаций (аларминг по состоянию и др.)
Уставки/настройки сигнализаций меняются операторами смен	Отсутствие четко регламентированного управления процедурами изменений

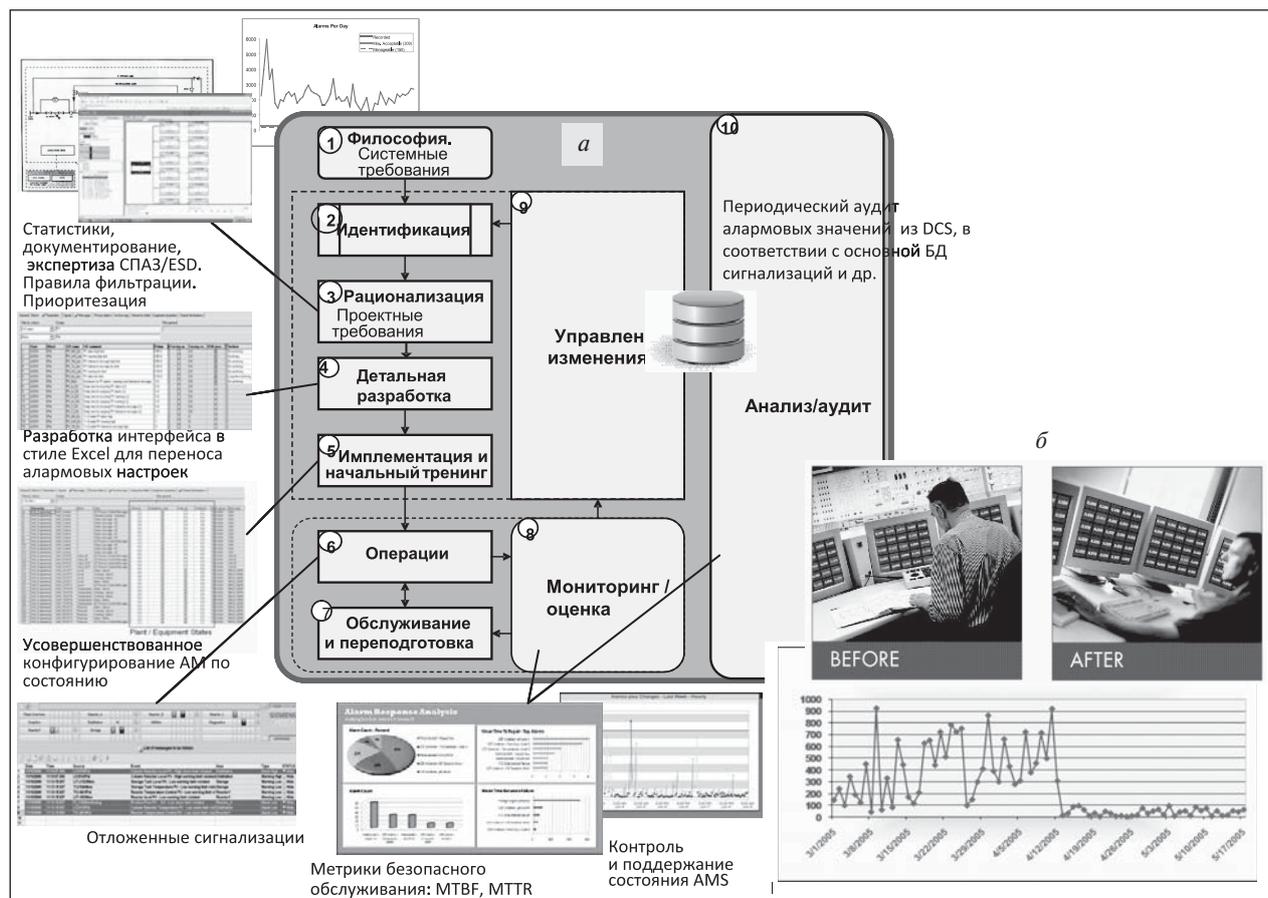


Рис. 15. Имплементация модели жизненного цикла тревожных сигнализаций (а) по стандарту ISA 18.2 (2007/2009) обеспечивает надежность, последовательный контроль и (9–14)-кратное уменьшение числа «висящих» и ложных (не принципиальных для безопасности) тревог (б)

сигнализаций;

- классификационные определения и спецификации по сигнализациям;
- установление требуемых уставок (уровней) сигнализаций или логических условий;
- определение надлежащей приоритезации;
- документирование любого рассмотрения проектного решения в отношении сигнала, причин, последствий и правил реагирования оператора;
- документирование улучшенных возможностей в отношении сигнализаций; правила и методы фильтрации сигнализаций;
- документирование релевантной, исторической информации, в частности, выполненных корректирующих действий, последствий и т. д.

В большинстве стандартных сценариев, когда целью является улучшение соответствия сигнализаций (response) реальным условиям, критически важным становится измерение ответной реакции на каждый индивидуальный сигнал тревог с одновременным сопоставлением

реактивности по множественным сигнализациям. Здесь критической статистикой является MTTR (Mean Time To Repair), которая позволяет компаниям оценить, насколько продолжительны предпринимаемые корректирующие действия. Путем фильтрацией (величин) MTTR по участкам производства, либо по реакции операторов возможно быстрое определение тренда и аудита вида: «Почему ответные действия оператора Б быстрее/точнее остальных?», «Насколько они осведомлены о наборах корректирующих действий и их допустимых временных интервалах, которые должны быть включены в стандартные инструкции?».

Другой, диагностической метрикой является аналог MTBF (Mean Time Between Failure), позволяющий службам видеть, как часто возникает сигнализация. Если конкретный сигнал регистрируется регулярно, это с вероятностью $P = 0,6-0,95$ указывает на недостатки в системе, подлежащие устранению (включению утилиты временного подавления или вообще исключению сигнала из реестра приоритетов).

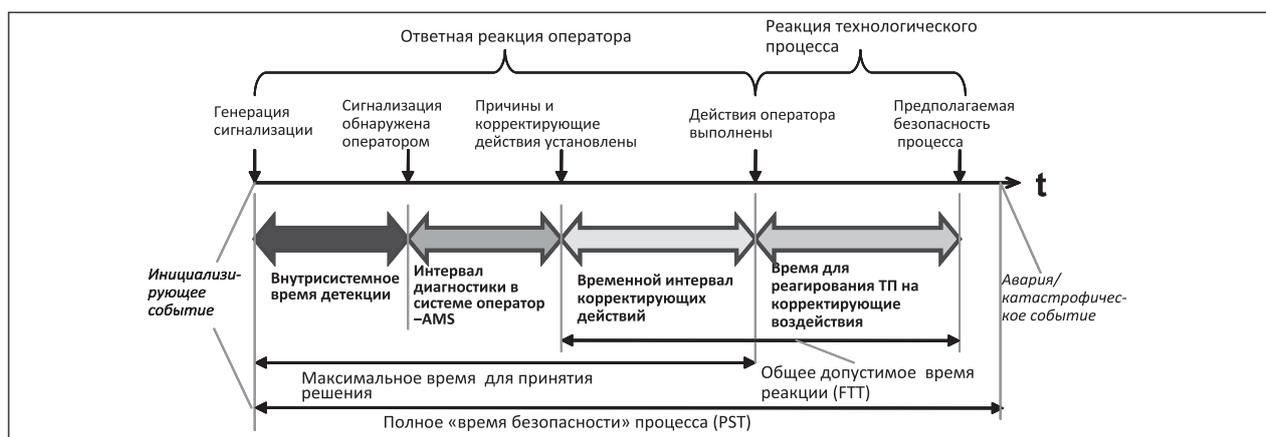


Рис. 16. Последовательность действий оператора в отношении сигнализаций и интервалы толерантности во временной шкале PST в соответствии со стандартами EEMUA 191 и ISA 18.2

Согласно стандарту, определяется maximum time to respond — временное окно, в пределах которого оператор в состоянии обнаружить, диагностировать и предпринять действия по сигналу. Это окно должно быть по возможности сжато с тем, чтобы отклик процесса на корректировки наступил до достижения последующего порогового значения (рис. 16). Соответственно, контролируется так называемое «суммарное время безопасности» (t_{PST} , Process Safety Time), представляющее собой временной промежуток между иницилирующим явлением и возникновением опасного события/аварии, с последующей системной эскалацией для формирования потребности в SIS, оперативного обхода объекта и/или исследования причины инцидента. По PTS должно выполняться внешне простое неравенство $t_{PST} \leq t_{el}$, где t_{el} — истекшее время до завершения ответной реакции процесса или аварии.

Упрощенная полуколичественная методика оценки возможности ответного реагирования оператора и соответствующие категории по SIL приведены в табл. 5.

Мониторинг и оценка (бенчмаркинг) [36]. Малоинформативная система AM нежизнеспособна. Мониторинг результативности и рациональности системы в сравнении с принятыми ключевыми метриками, аналогичными тем, которые установлены стандартом, является второй ключевой активностью в течение жизненного цикла. Одним из показателей является скорость, с которой сигналы представляются оператору. С этой целью в современных ARM в качестве двух ключевых предусматриваются функции:

- *Alarm Shelving*, временная автоматизированная фильтрация с контролируемой

продолжительностью периода откладывания; предполагает выбор строго авторизованным пользователем из меню причин селективного подавления;

- динамическое подавление потока сигнализаций (*Alarm Flood Suppression*) по предопределенным группам, основанная на триггерах событий. Считается, что для предоставления адекватного времени для качественного реагирования число отображаемых сигнализаций не должно превышать 2 в каждые 10 мин.

Метрикой, непосредственно привязанной к интенсивности, является частота появления (в %) каждого минутного интервала, за который оператор получает более 10 (15) сигнализаций/тревожных сообщений (т. е. наличие сигнализационного переполнения).

Систематизация действий по приоритетности сигнализаций (Alarm Activity Priority Distribution) — предполагаемое в некотором приближении распределение активностей согласно приоритетам. Для поддержания решения оператора о том, на какую из сигнализаций реагировать в первую очередь, стандарт ISA-18.2 рекомендует использовать в системе не более 3-х или 4-х уровней приоритетов сигнализаций, конфигурируя до 5% с наивысшим приоритетом (15% — со средним и 80% — с низким).

Примером комплексного *проактивного управления* событиями служит ПО Loop Scout™ и Asset Manager в комбинации с набором инструментов Profit Suit Early Detection (EED) Toolkit, разработанные совместно компаниями Honeywell и ASM в 2007–2008 гг. [37] (рис. 17). Функционал последнего программного решения (индикаторы и статистические методы раннего обнаружения, локализации) позволяет выявить до 2/3 неполадок/отклонений в работе оборудования или

процессе еще до момента генерации соответствующей сигнализации.

Одним из наилучших решений по реализации физической (аппаратной) интеграции систем PCSU, ARM, EAM (CMMS) можно считать включение устройств типа OPC Tunneller от компании MatrikonOPC (в настоящее время с шифрованием и узкополосным сжатием данных). Решение обеспечивает устранение традиционных пограничных проблем, связанных с DCOM (межсетевые тайм-ауты и др.), простые, надежные, независимо от типа/уровня надежности сетей, безопасные коммуникации между сетевыми рабочими станциями. OPC Tunneller поддерживает устойчивую передачу реальных сообщений в централизованную БД:

- с поддержкой простых, отслеживаемых кондиционных и каскадных событий;
- по механизму подписки и получения сигнализаций об отклонениях параметров (диагностика состояния); имеет возможность импорта шаблонов классификации регистрируемых событий.

Таким образом, комбинация систем EAM, PCSU и управления сигнализациями позволяет реализовать лучшие практики ТОРО в плане:

- своевременного обнаружения трендов по контрольным параметрам выявления проблем PCSU (см. рис. 16) и тревожных оповещений; эскалации информации на следующий уровень для непрерывного отслеживания готовности (доступности) оборудования, общая и полная эффективность оборудования (Overall Equipment Effectiveness and Total Effective Equipment Productivity) [38];

- представления в различных разрезах технико-технологической информации и анализ тенденций — достаточная осведомленность оператора о ситуации за счет функций drill down, представление данных в значимом контексте (например: «Температура в реакторе поднималась постепенно или наблюдался всплеск?»);

- включения интеллектуальных триггеров и выработки решений по изменению показаний контрольных точек;

- снятия избыточной информационной нагрузки на операторов — минимизация ошибок, коллективная (онлайн-) диагностика неисправностей и четкое выявление первопричин отказов.

Полное описание полученных на предприятиях перечисленных и других выгод от

Табл. 5. Упрощенная таблица для оценки ответных действий оператора

Категория	Описание	Вероятность успешной ответной реакции оператора, %	PFD	SIL
1	Нормальная реакция оператора в целях нормального, комфортного и адекватного реагирования на опасные ситуации, достоверными считаются следующие критерии: – возникает полнообъемная индикация того, что текущие условия требуют остановки объекта; – оператор обучен/обладает необходимой компетенцией по надлежащему реагированию; – оператор располагает достаточным временем (не менее 20 мин) для выполнения операций останова; – оператор непрерывно осуществляет мониторинг процесса (свободен от прерываний)	90	0,1	1
3	«Углубленная» ответная реакция — удовлетворены все условия для нормального вмешательства и регламентирована программа «углубленного» реагирования с выявлением первопричин: существуют углубленные ответные действия по детально описанной структуре процедур, также совершенствуемые в рамках инструкций, предполагающие возобновляемый тренинг операционного персонала; последовательность, (drilled)-набор для операций останова формирует небольшую часть сигнализаций, по которым практики реагирования настолько отработаны, что могут быть имплементированы автоматически; (эти условия редко достижимы на большинстве предприятий с процессным производством)	99	0,01	2
	Ответные действия маловероятны/ненадежны — ВСЕ условия для нормального вмешательства оператора, вероятно, не были удовлетворены	0	1	0

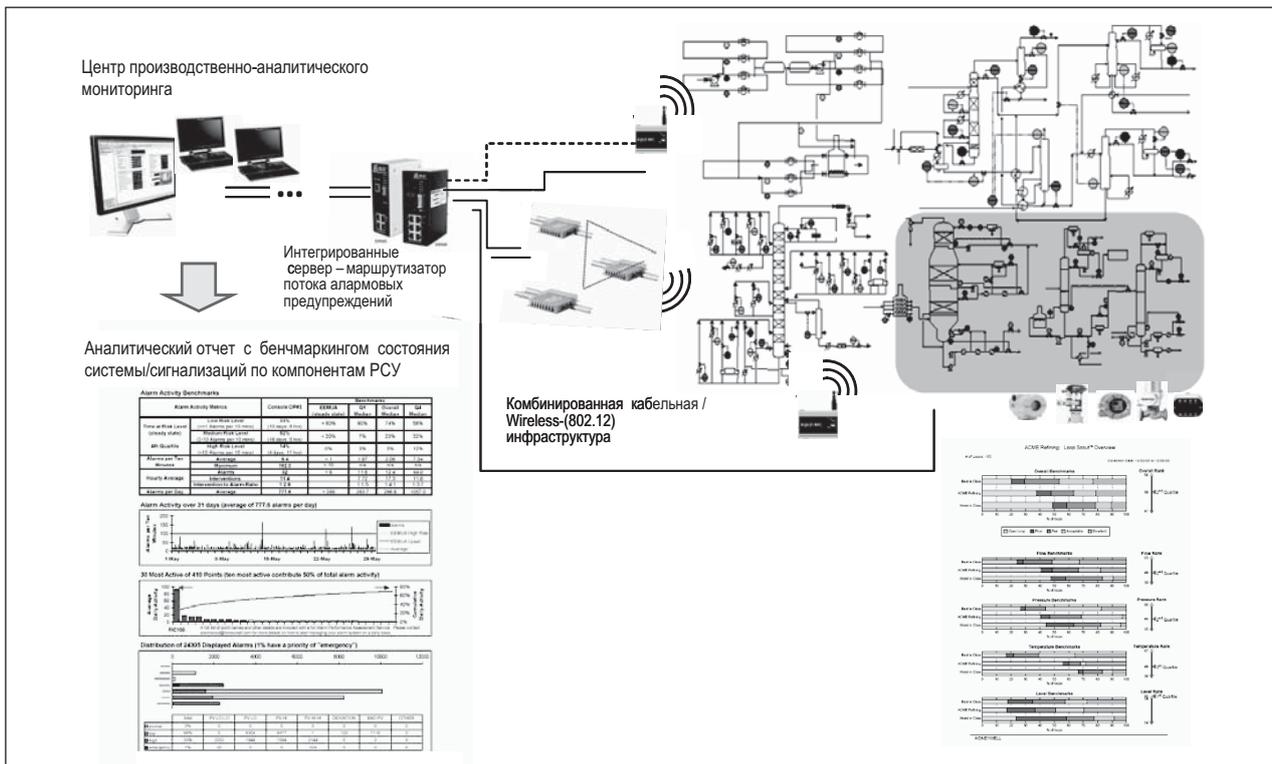


Рис. 17. Интегрированное решение Loop Scout/EED (Alarm-Asset Management) обеспечивает быстрое выявление проблемных областей АСУТП, приоритезацию неисправностей и бенчмаркинг оборудования производственного комплекса

ЕАМ (РАМ) в количественных показателях можно найти на сайте компании ПАКК и др. [38, 39].

Лучшие практики и системы поддержки сервисов по оптимизации энергопотребления,

эксплуатации промышленных активов с использованием систем «интеллектуальной» визуализации и инженерного 3D- и имитационного моделирования планируется рассмотреть в отдельной публикации данной серии.

Литература

1. *Америк А. Б.* Методология комплексного оптимизационного управления основным производством на принципах коллективного контроля эффективности и сервисно-ориентированной архитектуры интегрированных нефтегазовых компаний. 2. Современная методология и практика эффективного обслуживания в системах управления в системах управления основными фондами // Теоретические и прикладные проблемы сервиса. — 2010. — № 4. — С. 30–45.
2. *Америк А. Б., Пружинин А. В.* Комплексное оптимизационное управление основным производством на принципах коллективного контроля эффективности и сервисно-ориентированной архитектуры интегрированных нефтегазовых компаний. 3. Реализация эффективной модели процессов технического обслуживания и ремонта/RCM-PdM: архитектура и ИТ-сервисы системы управления основными фондами // Там же. — 2011. — № 1. — С. 26–47.
3. *Senor J.* Service-Oriented Architecture — A New Alternative to Traditional Technology Integration // iWay Software WP. — 2008. — P 16. — http://viewer.media.bitpipe.com/982593845_35/1213812372_247/2709_2538_2_37022_SOA_WP.pdf.
4. *Douglas F.* What You Need to Know About Forecasting and Planning Service Parts // Smart White Paper. — 2010. — P 6. — <http://www.smartcorp.com>.
5. *Митюшин В., Тарасов А.* Миф 5: Организация ремонтных и инженерно-технических служб предприятия, — нет путей для повышения эффективности // Интернет-ресурсы компании ПАКК. — 2008. — <http://www.pacc.ru/analytics/toro/toro6.html>.
6. *Гаджинский А. М.* Логистика. Учебник для высших и средних специальных учебных заведений. — М.: Маркетинг, 2001. — 396 с. (С. 232–240).

7. *Шехватов Д.* Управление основными фондами: как автоматизировать ремонты и техническое обслуживание // *СЮ.* — 2003. — № 2. — С. 32–33.
8. *Loshin D.* Three Fundamental Techniques to Maximize the Value of Your Enterprise Data // *Information Management.* — 2009. — October 218. — P.12–15.
9. *Plattner H., Zeier A.* In Memory Data Management. — Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, 2011. — P. 40–53, 178–209.
10. *Davison A. C., Hinkley D.* Bootstrap Methods and their Application. 8th ed. — Cambridge, 2006. — 218 p.
11. Bootstrapping Methods. — [http://en.wikipedia.org/wiki/Bootstrapping_\(statistics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Bootstrapping_(statistics)).
12. Решение IBM как платформа для управления активами предприятия всех типов // В кн.: Материалы конференции (CNews) «Управление промышленными активами в компаниях с непрерывным производственным циклом, Москва, Marriott Hotel, 2 октября 2008. — С 45.
13. *Mills S.* A new Standard for Condition Monitoring // *Maintenance & Engineering.* — 2011. — May/June. — P. 13–14.
14. *Nohynek P.* Realizing Benefits in Condition Monitoring // *Maintenance & Asset management.* — 2011. — V. 26. — N 3. — P. 40–43.
15. Mobilizing Enterprise Applications: Comparing MEAP with Point, Browser-based and Smart Client Solutions // *AT&T WP.* — 2010. — October. — <http://www.business.att.com/content/whitepaper/mobilizing-enterprise-applications.pdf>.
16. *Dutta S.* Trends In-Mobile Field Services // *Aberdeen Group Research Rep.* — 2009. — June. — P. 29.
17. Inspection System Manages Data Collection from Different Plant Operations. — <http://www.chemicalprocessing.com/vendors/products/2010/433.html>.
18. Oil & Gas Mobile Adoption Report / White Paper. — www.syclo.com. — 2010. — 14 p.
19. *Amidi S.* OneWireless Network — The Most-Preferred Choice // *Honeywell News.* — 2010. — http://www.thewirelessplant.com/tech_logs/?p=42.
20. Wireless Instrumentation Helps Pipeline Operator with Diagnostics // *Control Engineering.* — 2010. — October 20. — P 26–27.
21. OneWireless™ Multimode // <http://hpsweb.honeywell.com>.
22. *Gill S.* Is Wireless Ready for Process Control // *Control Engineering.* — 2010. — April. — P. 18–19.
23. *Haga P., Deakin Cr.* Transparent Wireless at Cano Petroleum // *Control Engineering.* — 2010. — November. — P. 31–32.
24. How Wireless Innovation Speeds at BP // *Wireless Now.* — 2008. — November. — N. 2. — P. 16.
25. Insight from Smart Wireless Solutions Prevents Shutdown at Major Refinery // www.EmersonProcess.com/SmartWireless.
26. *Hoske M. T.* Wireless Applications: Less Cost, More Productivity, Compliance // *Control Engineering.* — 2011. — June. — P. 18–22.
27. Offshore Wellhead Monitoring in West Africa. — http://www.thewirelessplant.com/tech_logs/?p=86.
28. Asset Protection in an Oil Refinery: Wirelessly Measuring the Compressor Motor Bearing Temperature in an Alki Unit. — <http://www.thewirelessplant.com/success-stories/oil-refineries.pdf>.
29. Repsol Deploys Honeywell Wireless Transmitters to Reduce Costs and Maintain Secure Monitoring. — <http://www.thewirelessplant.com/success-stories/repsol.pdf>.
30. On-line Asset Integrity Monitoring // *Mistras Group, Inc. Product Broch.* — www.mistrasgroup.com. — 2009.
31. *Forbes H.* ISA100 and Wireless Standards Convergence // *Arc Brief.* — 2010. — October. — P. 2–6.
32. http://www.thewirelessplant.com/control_ready_performance.html. — Protocols.
33. *Жилкина Н.* Доступ без границ // *СЮ.* — 2010. — № 4. — P.25–27.
34. *Пружинин А. В., Шелухин О. И., Осин А. В.* Оптимизация параметров телекоммуникационных сетей методом регуляризации Тихонова // *Информационно-измерительные и управляющие системы.* — 2006. — Т. 4. — № 6. — С. 62–72.
35. *Hollifield B., Habibi E.* The Alarm Management Handbook. 2nd Edition. — 2010. — 347 p.
36. *Hollifield B.* PHMSA Pipeline Alarm Management Regulations and Relevant ISA and API Standards and Practices: Understanding the New Regulatory Environment. — http://www.sea.siemens.com/us/internet-dms/ia/ProcessAutomationComm/ProcessAutomation/Docs2/AlarmManagement_WhitePaper_Jan2010.pdf.
37. *Stauffer T.* Alarm Management: Setting a New Standard for Performance, Safety, and Reliability with ISA-18.2 // *Canadian Process Equipment & Control News.* — 2009. — December. — P. 19–20.
38. Asset Performance and Alarm Management Handbook–2008 // *Hydrocarbon Processing.* — 2008. — V. 87. — April. — P. 123–151.
39. <http://www.pacc.ru/analytics/toro/>.
40. *De Leeum V.* Plant Asset Management Best Practice for Process Industries // *ARC Best Practice.* — 2007. — May. — 35 p. — [http://www.sea.siemens.com/us/internet-dms/ia/ProcessAutomationComm/ProcessAutomation/Docs/05-2007pam\[1\].pdf](http://www.sea.siemens.com/us/internet-dms/ia/ProcessAutomationComm/ProcessAutomation/Docs/05-2007pam[1].pdf).
41. *McKinnon D. L.* Case Studies in Online and Offline Motor Analysis // *PdMA Corp. Technical Paper.* — www.pdma.com. — 2008.

A. B. Amerik

Integrated Optimization Management of the Primary Enterprise on the Principles of Cooperative Performance Management and Service-oriented Architecture of Integrated Oil and Gas Companies.

4. Development Trends of Information Technologies in Enterprise Asset Management, Infrastructures of Mobile Integration with other Production and Business Systemse

The main technological development trends of software solutions for production assets life cycle management, technical maintenance and repair, that is purchasing systems and methods of material assets (replacement parts, component parts) forecasting and management are generalized. Problems of integration interaction with systems of manufacturing management are considered.

On the basis of modern standards/communication protocols highlights of evolution of mobile solutions in EAM, engineering software tools and wireless infrastructure of oil-and-gas development and processing enterprises are concerned. Up-to-date methods and practices of alarm management and alarm response reaction rationalization using new technological approach according to ISA 18.2 standard are described.

Keywords: reliability, development trends, production assets management, business applications, standards/ protocols of wireless communication, methods for material assets stocks forecasting and optimization, mobile devices, mobile stations, technical infrastructure, integration solutions, services of production assets management system, life cycle, alarm management, alarm annunciation rationalization, RCM 2, MTBF, MTTR.

Вниманию специалистов!

В. Е. Емельянов

ПРОИЗВОДСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ БЕНЗИНОВ

В книге изложены требования к качеству вырабатываемых и перспективных автомобильных бензинов.

Приведено краткое описание современных технологических процессов переработки нефти с целью получения бензиновых компонентов. Рассмотрено производство различных оксигенатов — высокооктановых кислородсодержащих соединений, применяемых в составе автобензинов.

Подробно охарактеризованы физические, химические и эксплуатационные свойства различных бензиновых компонентов, а также присадок и добавок для улучшения эксплуатационных свойств.

Рассмотрены вопросы контроля качества, транспортирования, хранения и применения автобензинов.

Монография предназначена для инженерно-технических работников предприятий нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, работников автотранспортных предприятий, а также бизнесменов, экономистов и менеджеров этих отраслей.

М.: Издательство «Техника», 2008. — 192 с.

В. Е. Емельянов, В. Н. Скворцов

**МОТОРНЫЕ ТОПЛИВА:
АНТИДЕТОНАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА И ВОСПЛАМЕНЯЕМОСТЬ**

Приведены сведения о требованиях к качеству и технологии производства моторных топлив, методах оценки их детонационной стойкости и воспламеняемости. Изложены основные теоретические и практические вопросы, относящиеся к определению детонационной стойкости и воспламеняемости моторных топлив на современных одноцилиндровых установках, их техническое обслуживание, а также новейшие достижения техники в области усовершенствования установок и методов испытаний.

Книга предназначена в качестве практического руководства для работников лабораторий нефтеперерабатывающих и нефтесбытовых предприятий, для работников автомобильного и воздушного транспорта и других отраслей, а также широкому кругу инженерно-технических работников, будет полезна аспирантам и студентам вузов и техникумов.

М.: Издательство «Техника», 2006. — 192 с.

Обеспечение безопасности ликвидированных скважин

В. Г. Мартынов, А. И. Ермолаев, В. М. Казаков, Е. В. Кондратенко
РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина,
ОАО «Газпром Промгаз»

Показаны негативные последствия нарушения герметичности ствола скважины. Кратко описаны возможные механизмы возникновения аварийных ситуаций на ликвидированных скважинах. Проведен анализ «Инструкции о порядке ликвидации, консервации скважин и оборудования их устьев и стволов», показаны недоработки и ошибочные формулировки некоторых положений. Серьезно рассмотрен вопрос о мониторинге ликвидированных скважин. Затронута проблема ответственности за ликвидацию скважин и мониторинг их состояния.

Даны конкретные предложения по закреплению ответственности за ликвидацию скважин, мониторингу территории завершенных эксплуатацией месторождений, а также по изменению законодательства в этой сфере.

Ключевые слова: скважины, ликвидация, межколонные перетоки, недропользователь, страховой фонд, мониторинг, газохимическая съемка.

Решение проблемы обеспечения безопасности ликвидированных скважин на законченных разработкой и находящихся в эксплуатации месторождениях нефти и газа имеет важное значение для экологического состояния территорий России, где проводились или ведутся работы по поиску, разведке и добыче углеводородов. Огромное количество скважин подвергает риску загрязнения как атмосферу, так и подземные водные ресурсы. Это приводит к ухудшению условий жизни людей и животных, загрязнению зоны питания растений и их гибели. Особого внимания требует фонд выведенных из производства, ликвидированных скважин, о чем уже сообщалось в работе [1]. По причине отсутствия должного внимания со стороны прежних и настоящих владельцев этих скважин, отсутствия достаточно четких нормативных документов и системы контроля, скважины становятся постоянной угрозой и причиной серьезных загрязнений. На всех уровнях производства и государственного управления сложилось четкое мнение, что ликвидированная скважина не несет никакой угрозы. Действительно, пласт выработан, скважина залита цементом, что может случиться? Но случиться может многое.

Во-первых, по межколонным и заколонным перетокам возможно проникновение газа, нефти, агрессивных минерализованных вод в горизонты, в которых их быть не должно (горизонты питьевого водоснабжения и горизонты, обеспечивающие питание растений).

Во-вторых, за счет заколонных перетоков возможен выход на дневную поверхность пластовых флюидов и газа, причем путь их миграции заранее определить почти невозможно. Это

ведет к загрязнению окружающей среды, засолению почв.

В-третьих, в результате возможного накопления углеводородного газа, проникшего по потерявшему свои свойства цементному камню, в естественных ловушках вблизи дневной поверхности возможно формирование техногенных залежей, поведение которых непредсказуемо. Примеров тому достаточно много.

В работе [1] подробно описан механизм возникновения нарушений герметичности колонны. Причинами потери цементным камнем герметизирующей способности могут быть:

- изнашивание и старение межколонного и заколонного цементного камня во время эксплуатации в связи с разнонаправленными температурными градиентами и, соответственно, напряжениями, вызванными различными режимами работы скважин;

- коррозионные разрушения колонны и заколонного цементного камня в зоне пропластков, содержащих агрессивные минерализованные воды, а также в результате электрохимической коррозии металла колонны;

- низкая эффективность существующих технологий крепления скважин;

- вскрытие больших интервалов продуктивного горизонта в обсаженной колонне при производстве работ стреляющими перфораторами, что приводит к многократным встряхиваниям эксплуатационной колонны и разрушению цементного кольца за ней;

- многократные опрессовки эксплуатационной колонны, цементных мостов, солянокислотные обработки вскрытого горизонта и резкое стравливание избыточного давления приводят к разрушению цементного кольца, об-

разованию в нем трещин и «отлипанию» цемента от породы и колонны;

– разрушение колонны со смещением, вызванное проседанием пород, слагающих разрез, в связи с техногенными тектоническими явлениями при добыче нефти и газа в больших объемах, при проскальзывании крутопадающих солевых, глинистых пластов.

Современными методами мониторинга, о котором говорится в РД 08-492–02 «Инструкция о порядке ликвидации, консервации скважин и оборудования их устьев и стволов» [2] предусмотрено только проводить учет, ежегодный контроль за состоянием устьев ликвидированных скважин и необходимые ремонтные работы при обнаружении неисправностей и нарушений требований охраны недр, которые осуществляет пользователь недр (пп. 2.3.7). Однако нет никакого разъяснения по объему контроля. Указана только его периодичность — ежегодный. А каково содержание контроля? Что там можно контролировать? Ниже приведена выдержка из инструкции:

«2.2.2.7. При аварии с бурильным инструментом, когда его верхняя часть осталась в интервале ствола, перекрытого технической колонной, необходимо произвести его торпедирование или отворот на уровне башмака колонны и цементирование под давлением с установкой цементного моста на уровне не менее 100 м над башмаком технической колонны. Дальнейшее оборудование ствола производить аналогично пп. 2.2.2.4, 2.2.2.5 настоящей Инструкции.

Устье скважины необходимо оборудовать заглушкой (или глухим фланцем с вваренным патрубком и вентилем), установленной на кондукторе (технической колонне).

2.2.2.8. На устье скважины устанавливается бетонная тумба размером 1×1×1 м с репером высотой не менее 0,5 м и металлической таблицей (именуемой далее по тексту «таблицей»), на которой электросваркой указывается номер скважины, месторождение (площадь), предприятие-пользователь недр, дата ее ликвидации».

Интересно, второй абзац об установлении патрубка с вентилем (вероятно для подсоединения манометра и отбора проб) относится к пп. 2.2.2.7 или к пп. 2.2.2.8? Если к пп. 2.2.2.7, то не понятно, почему так выделили именно этот случай. Если к 2.2.2.8, то не будет ли залит патрубок бетоном при создании бетонной тумбы? Допустим, что патрубок не будет залит бетоном, а будет выведен на поверхность и разместится где-то рядом с репером. В таком случае, по всей вероятности, предполагается визуальный контроль с замером давления на том самом

патрубке, что абсолютно бессмысленно, так как перетоки совершаются в местах разрушений цемента и колонны и в редких случаях доходят до устья. Манометр на устье реагирует только на сезонные тепловые расширения сальфона и в тех редчайших случаях, когда на устье создается давление, связанное с нефтяными, газовыми или водоносными пластами, для получения квалифицированного заключения необходимо провести химический анализ продукции, полученной на установленном патрубке.

На случай, если патрубков все же будет забетонирован или его вообще не будет, что предполагает визуальный контроль — осмотр состояния бетонного куба?

Ни о каком контроле скважин, расположенных на сельскохозяйственных угодьях, речи быть не может»: «пп. 2.2.2.9. При расположении скважины на землях, используемых для сельскохозяйственных целей, устья скважины углубляются не менее чем на 2 м от поверхности, оборудуются заглушкой, установленной на кондукторе (технической колонне), и таблицей с указанием номера скважины, месторождения (площади), предприятия-пользователя недр и даты ее ликвидации.

Заглушка покрывается материалом, предотвращающим ее коррозию, и устье скважины засыпается землей» [2]. В этом случае проблема хоронится окончательно.

Интересна судьба ликвидированных скважин в части ответственности за их состояние: «пп. 2.3.7. Учет, ежегодный контроль за состоянием устьев ликвидированных скважин и необходимые ремонтные работы при обнаружении неисправностей и нарушений требований охраны недр осуществляет пользователь недр» [2]. Пользователь недр является пользователем на основании имеющейся лицензии, которая выдается максимум на 20 лет и может быть несколько продлена. А что дальше? Закончен срок лицензии — кто отвечает за скважину? Ведь пользователя недр юридически (а чаще всего и фактически) уже не существует, и с баланса скважина давно списана, как ликвидированная.

Необходимо отметить, что, по мнению многих специалистов, большую часть таких скважин, ликвидированных до конца XX века, а, вероятно, и в наше время, найти уже невозможно. Основными причинами этого являются отсутствие реальных владельцев многих ликвидированных скважин и четкого научного обоснования важности и необходимости отношения к ликвидированным скважинам как к потенциально опасным объектам.

Отсутствие реального владельца — проблема не вымышленная. В России в настоящее время, по разным оценкам, существует от 5 до 10 тыс. бесхозных скважин [3–5]. Проблема тянется с начала 1990-х гг., а сейчас может усложниться в связи с окончанием сроков действия лицензий, выданных в начале 1990-х гг. Многие небольшие недобросовестные недропользователи предпочитают закрыть или переоформить предприятие и уйти от необходимости расходования средств на надлежащую консервацию. В этом случае у государства нет механизмов воздействия, либо они настолько сложны и неопределенны, что практически не действуют. В настоящее время Российская Федерация приближается к такому периоду функционирования нефтегазового комплекса, когда перед отраслью встают (и решать их придется в недалекой перспективе) принципиально новые проблемы, связанные с консервацией (ликвидацией) отработанных месторождений с огромной развитой инфраструктурой. Важнейшими задачами, подлежащими решению, являются:

- разработка способов консервации (ликвидации) скважин различного назначения с гарантированными средствами контроля их дальнейшего состояния и воздействия на окружающую среду (непрерывный мониторинг);
- создание самой системы постоянного мониторинга подземных объектов и скважин во избежание серьезных техногенных катастроф;
- разработка методологии построения различных моделей ликвидируемых объектов (геологических, гидродинамических, поведенческих и др.) [6].

Указанная серьезнейшая проблема требует незамедлительного принятия законодательных, организационных и технических мер к исправлению ситуации.

Предлагаются законодательные мероприятия:

- ужесточить, вплоть до уголовной, ответственность за уклонение от надлежащей ликвидации скважин, в том числе по завершении срока действия лицензии на недропользование;
- принять законодательное решение о закреплении ликвидированных скважин за государством, определив источники финансирования содержания и мониторинга за счет бывших владельцев при помощи создания специального фонда.

Организационные мероприятия могут быть следующими:

- проведение геохимического и гидрогеологического мониторинга специализированными

учреждениями Министерства природных ресурсов по всей площади месторождения;

- узаконить до составления проекта на ликвидацию проведение полной дефектоскопии ствола скважин и цементного камня, определение зон перетоков; составить перечень необходимых мероприятий по повышению надежности ликвидации;

- создание за счет недропользователей специального страхового фонда для ликвидации и мониторинга скважин, брошенных недобросовестными владельцами;

- пересмотреть РД 08-492–02 в части более серьезного и современного отношения к проблеме ликвидации скважин.

Из технических средств можно рекомендовать:

- применение на стадии строительства скважины специальных цементных смесей, обеспечивающих максимально долгий срок сохранения тампонирующих качеств при реверсивных температурных нагрузках на колонну;

- при бурении скважин при прохождении горизонтов с агрессивными водами превентивно проводить РИР¹ с применением полимеров, чтобы в дальнейшем устранить вероятность контактирования агрессивных вод с обсадной колонной и заколонным цементным кольцом;

- при проектировании скважин учитывать тектонику места заложения скважины, наличие крутопадающих пластов, способных к смещению во времени и при изменении нагрузки на пласт, связанной с добычей продукции. В случае необходимости повышать запас прочности колонны, предусматривать дополнительную колонну.

Понятно, что все эти мероприятия удорожают стоимость скважины, но не следует забывать, что скважина является наиболее важным и основным фондом добывающего предприятия, а после использования может стать потенциальной угрозой для окружающей среды.

На наш взгляд, сама ликвидация и мониторинг состояния ликвидированных скважин должны начаться еще до начала бурения. Во-первых, необходимо снять геохимический фон на месторождении и на научно обоснованном удалении от его границ. Иначе будет невозможно оценить утечки как при эксплуатации, так и после ее окончания. Сеть контрольных точек должна обеспечивать возможность районирования опасных зон. Во-вторых, до начала бурения эксплуатационных скважин должна быть создана сеть наблюдательных гидрогеологических скважин и проведено снятие фона химического

¹ РИР — ремонтно-изоляционные работы для предотвращения поступления воды в пласт при добыче нефти и газа.

состава вод. Эта сеть также должна обеспечить районирование источника загрязнений.

Совместные геохимический и гидрогеологический мониторинги изменения химического состава приземного слоя воздуха и воды помогут вовремя выявить наличие загрязнений верхнего слоя земной коры, что важно для принятия оперативных решений. Районирование повышенного уровня загрязнений позволит определить их источники.

Проведение указанных видов мониторинга необходимо внести в лицензионные соглашения, в РД 08-492-02, в правила разработки. Также в РД 08-492-02 и правилах разработки необходимо предусмотреть полное обследование стволов скважин на герметичность, сохранность цементного камня за колонной еще до составления проекта на ликвидацию скважины и разработку в проекте мероприятий по устранению выявленных дефектов.

На старых месторождениях, эксплуатирующихся или завершающих эксплуатацию, необходимо наладить гидрогеологический мониторинг с учетом того, что фоновых замеров могло и не быть, либо они были утеряны. Сравнение химического состава вод на месторождении и на удалении от него может дать представление о происходящих там процессах, хотя локализация аварийных зон может быть затруднена. В этом

случае потребуются тщательное изучение истории пробуренных скважин, а зачастую и поиск этих скважин на местности, поиск и восстановление документации. Газохимическая съемка, из-за своей инертности, не даст ожидаемого результата в короткое время, а вот гидрогеологическую сеть необходимо создать или восстановить и проводить тщательный мониторинг состава вод.

Безусловно, эта сложная и достаточно дорогая работа может быть выполнена только государством, поскольку за давностью лет и в связи с существующим законодательством бывших недропользователей обязать заниматься этим вопросом невозможно. Кроме того, многих бывших недропользователей уже не существует. Но только с помощью такого мониторинга можно найти опасные скважины и в дальнейшем исправить ситуацию.

Рекомендации в этой работе, конечно, не исчерпывают всех вопросов, связанных с ликвидацией скважин и мониторингом их состояния. Здесь необходима серьезная и вдумчивая работа по изучению проблемы, классификации причин и способов борьбы с негативными явлениями в ликвидированных скважинах, по разработке методики мониторинга и выявлению очагов нарушений и их устранению. Научная основа решения этой проблемы еще не создана, но актуальность задачи не вызывает сомнения.

Литература

1. Кондратенко Е. В., Казаков В. М., Ермолаев А. И. О ликвидации и консервации скважин // Нефть, газ и бизнес. — 2011. — № 5. — С. 17–21.
2. РД 08-492-02 «Инструкция о порядке ликвидации, консервации скважин и оборудования их устьев и стволов».
3. Попова Н. — Аргументы Недели. — 26.11.2008 (<http://www.argumenti.ru/toptheme/n161/39313>).
4. Оценка и проблемы экологического состояния глубоких геологоразведочных скважин на нефть и газ, пробуренных 50 лет назад. — М.: НПО «Геоэкология», 2002 (<http://promeco.h1.ru/tezis/2002monitoring-geoecologia.shtml>).
5. В России растет количество законсервированных и ликвидированных скважин на нефть и газ. — По материалам ИА «Финмаркет». — 4 сентября 2007 (<http://www.wn.ru/today/BusinessNews/04.09.2007/4.html>).
6. Мартынов В. Г., Мищенко И. Т. О некоторых проблемах, которые предстоит решать российскому нефтегазовому комплексу // Нефть, газ и бизнес. — 2011. — № 4. — С. 4–5.

A. I. Ermolaev, V. M. Kazakov, and E. V. Kondratenko
Safety Assurance of Abandoned Wells

Negative effects of seal failure of well bore are demonstrated. Possible mechanisms of emergency initiation at abandoned wells are briefly described.

Analysis of Instruction for liquidation procedure, wells suspension and equipment of their slots and bores is performed. Mistakes and mistaken formulations of some aspects of the Instruction concerned are demonstrated. The problem of abandoned wells monitoring is considered seriously. The problem of liability for well abandonment and their condition monitoring is concerned.

Specific proposals on liability fixing for well abandonment, monitoring of abandoned fields territory, and also on change of legislation in this area are given.

Keywords: wells, abandonment, annulars crossflow, subsurface user, contingency fund, monitoring, gas chemical prospecting.

К вопросу определения эффективности переработки нефти

И. М. Колесников
РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина

В статье обсуждаются различные подходы к определению эффективности и анализируются возможные критерии оценки переработки нефти, газового конденсата и их смесей.

Ключевые слова: эффективность и глубина переработки, критерий Туманяна.

Эффективность переработки нефтей, газовых конденсатов и их смесей, прежде всего, оценивается массой целевых продуктов, которые могут быть получены из единицы массы сырья. Все многообразие способов переработки нефтей, газовых конденсатов и их смесей можно рассматривать в виде физических и химических процессов. С формальной точки зрения это правомерно. Однако подобный подход не позволяет оценивать полноту переработки углеводородного газообразного и жидкого сырья. При осуществлении физических процессов химический состав, структура и состояние вещества не меняются: не происходит разрыв связей в одних молекулах и образование связей в других. К физическим процессам переработки углеводородного сырья относятся первичная перегонка при атмосферном давлении и под вакуумом, абсорбция и адсорбция, экстракция и кристаллизация, сжижение и низкотемпературная ректификация газов, хроматография, термодиффузионное разделение и др.

Термические и термодиффузионные процессы проводят для принципиального изменения химического состава и структуры углеводородного сырья. К термическим относят процессы, в которых превращение углеводородов или соединений на их основе осуществляется в результате термического воздействия на молекулы сырья: пиролиз, термоокисление, термохлорирование, термический крекинг и др. В термодиффузионных процессах молекулы углеводородов превращаются при одновременном воздействии на них температуры, давления, катализаторов и, в некоторых случаях, облучения, механических, электромагнитных и других воздействий.

Для определения эффективности первичных и вторичных методов переработки углеводородного сырья и промышленных процессов, разработанных на основе совокупности этих методов, предлагаются различные подходы к количественной оценке переработки сырья в товарные продукты и несколько терминов. Широко распространено понятие «глубина переработки

нефти», которое отражает суммарное количество выделенных из нефти светлых фракций: бензиновой, керосиновой, дизельной и газа. Однако этот показатель не учитывает наличие в схеме переработки физических или химических процессов, и, соответственно, все разнообразие получаемых продуктов, в частности, производство вакуумного газойля, селективную очистку масляных дистиллятов, адсорбционное разделение углеводородов и др. Часть светлых продуктов может оставаться после атмосферной перегонки нефти в остатке — мазуте.

В промышленной практике «глубина переработки нефти» (ГПН) рассчитывается по формуле [1]:

$$\text{ГПН} = (\text{НП} - \text{ТМ} - \text{П})100/\text{Н},$$

где НП, ТМ — соответственно количество вырабатываемых на НПЗ товарных нефтепродуктов (без топочного мазута) и топочного мазута, тыс. т/год; П — безвозвратные потери, тыс. т/год; Н — производительность НПЗ, тыс. т/год.

Этот параметр по своему содержанию является технико-экономической оценкой НПЗ, так как он отражает эффективность работы НПЗ без раскрытия соотношения первичных и вторичных процессов переработки сырья. Его можно использовать только для сравнительной оценки эффективности работы НПЗ.

Суммарный выход светлых продуктов, выделяемых из нефти и ее смесей с газовыми конденсатами, называется потенциальным содержанием светлых дистиллятов в нефти. Однако вакуумный газойль и масла, получаемые физическими методами переработки нефтяных остатков, также являются дистиллятными продуктами. В этой связи глубиной отбора целевых продуктов первичной переработки нефти (ГОЦП) более корректно считать суммарный выход атмосферных и вакуумных дистиллятов. Глубину отбора светлых продуктов или потенциальное содержание светлых в нефти (ПССН) можно рассчитать по формуле:

$$\text{ПССН} = g_{\text{св}}/g_{\text{н}},$$

где $g_{св}$, $g_{н}$ — соответственно суммарный массовый отбор светлых дистиллятов из нефти и масса исходной нефти.

Суммарный выход остатка атмосферной и вакуумной перегонки нефти (ВО) рассчитывается по формуле:

$$ВО = g_{н} - g_{св}.$$

Глубину отбора целевых продуктов можно рассчитать по формуле:

$$ГОЦП = g_{св} + g_{вцп}/g_{н},$$

где $g_{вцп}$ — отбор вторичных целевых продуктов (вакуумного газойля, масел).

Долю остатков перегонки G_o (полугудронов или гудронов) можно рассчитать по формуле:

$$G_o = 1 - g_{св}/g_{н} - g_{вцп}/g_{н}.$$

Потенциальное содержание светлых в нефти определяют разгонкой на аппарате АРН-2 или с помощью хроматографического анализа. ПССН можно рассчитать с помощью полуэмпирических уравнений [2], представленных ниже:

$$M_{ср} = 92,68/(1 + 0,2858v_{20});$$

$$T_{ср} = (303 + M_{ср}/2,1)(1 - \exp(-0,0074M_{ср}));$$

$$\rho_4^{20} = 0,742 + 0,000325T_{ср};$$

$$\Delta H_{исп} = 5 \cdot 10^{17} \cdot \exp(-38,98/\rho_4^{20});$$

$$P_{311} = 274 \exp(-0,0000844\Delta H_{исп});$$

$$P_{321} = 7,481 P_{311}^{0,68};$$

$$X_{ПССН} = -0,761 + 0,0789 \sqrt{P_{323}};$$

$$X_{н.к.-200} = -0,414 + 0,0611 \sqrt{P_{323}},$$

где $M_{ср}$, v_{20} , $T_{ср}$, ρ_4^{20} , $\Delta H_{исп}$, P_{311} , P_{321} — соответственно средняя молекулярная масса, вязкость, средняя температура кипения, плотность, энтальпия испарения и давление паров при температуре 311 и 321 К.

ПССН является важным, но недостаточным критерием для определения эффективности первичной переработки нефти, газового конденсата и их смесей.

В работе [3] предлагается несколько формулировок для оценки эффективности работы НПЗ. Одно из понятий — «глубина переработки нефти» отражает количество выделяемых из нефти светлых продуктов. По содержанию это понятие близко к ПССН. Второе понятие — «глубокая переработка нефти» отражает производство светлых нефтепродуктов при первичной переработке нефти и вторичной переработке нефтяных фракций.

В действительности, как отмечено работах [3, 4], необходимо разработать критерий оценки эффективности переработки нефти, который бы с большей полнотой отражал во взаимосвязи качество сырья и ассортимент нефтепродуктов, получаемых из нефти с помощью первичных и вторичных процессов. Таким критерием можно с полным основанием назвать «коэффициент эффективности переработки сырья» или «сырьевой индекс». Этот критерий косвенно связан с комплексом физических и химических процессов, используемых в переработке, и с показателями качества сырья, ассортиментом, качественными и функциональными характеристиками получаемой продукции. Подобный коэффициент, который можно назвать «Обобщенным критерием $K_{ТМ}$ Туманяна», в аналитической форме должен иметь вид:

$$K_{ТМ} = (ПП (f(K_1)) + ВТП (f(K_2)) - П)/Н,$$

где ПП, ВТП — производительность первичных и вторичных процессов переработки нефти, газового конденсата и их смесей, тыс. т/год; $f(K_1)$ и $f(K_2)$ — показатели качества получаемых продуктов в процессах первичной (K_1) и вторичной переработки (K_2) нефти; П — потери; Н — производительность предприятия по сырью, тыс. т/год.

В этот критерий могут входить термодинамические и кинетические параметры, материальные балансы и потоки сырья и продуктов, расходные энергетические показатели, качество сырья и производимых продуктов (октанотонны и цетанотонны), количество присадок, углеводородных и неуглеводородных компонентов топлив и т. д. Для сравнения эффективности работы предприятий данный критерий необходимо дополнить экономическими показателями. Математическое описание во взаимосвязи параметров ПП, ВТП, $f(K_1)$, $f(K_2)$ и П позволит по-новому подойти к оценке работы нефтеперерабатывающих предприятий, планировать варианты их усовершенствования с целью повышения качества и выхода продукции. Такой параметр важен при организации и проведении теоретических и практических разработок в области переработки углеводородного сырья, а также для достоверного сравнения эффективности переработки нефти на различных нефтеперерабатывающих предприятиях.

Работа выполнена в соответствии с Федеральной целевой программой «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы».

Литература

1. Каминский Э. Ф., Хавкин В. А. Глубокая переработка нефти: технологический и экологический аспекты. — М.: Техника, 2001. — 384 с.
2. Колесников С. И. Научные основы производства высокооктановых бензинов с присадками и каталитическими процессами. — М.: Нефть и газ, 2007. — 540 с.
3. Туманян Б. П. Об оценке эффективности функционирования нефтеперерабатывающих предприятий // Химия и технология топлив и масел. — 2009. — № 3. — С. 4–6.
4. Туманян Б. П., Петрухина Н. Н. Новый подход к оценке эффективности переработки нефтяного сырья // Теоретические и прикладные проблемы сервиса. — 2011. — № 1. — С. 15–25

I. M. Kolesnikov

Towards Refining Efficiency Determination

Different approach to refining efficiency determination is discussed in the article. Possible criteria of assessment of oil, gas condensate and their mixtures processing are analyzed.

Keywords: efficiency and refining depth, Tumanyan criterion.

Вниманию авторов!

Требования к оформлению и представлению материалов для публикации

1. К статье должны быть приложены реферат (не более 10 строк) и список ключевых слов на русском и английском языках.
2. Объем статьи не должен превышать 15 страниц, включая таблицы, список литературы и подрисуночные подписи.
3. Материалы для публикации должны быть представлены в двух видах: текст, набранный в программе Microsoft Word на листах формата А4, распечатанный на принтере; дискета или компакт-диск с тем же текстом (файлы формата DOC или RTF), можно также прислать статью по электронной почте. Рисунки представляются в формате EPS или TIFF (300 dpi, CMYK или grayscale), за исключением рисунков, сделанных в программах Microsoft Office (Excel, Visio, PowerPoint и т. д.), которые представляются в оригинале.
4. Текст статьи должен быть распечатан в двух экземплярах через два интервала на белой бумаге формата А4. Слева необходимо оставлять поля шириной 4–5 см. Страницы должны быть пронумерованы.
5. Графическая информация представляется в черно-белом виде (за исключением фотографий). Дублирование данных в тексте, таблицах и графиках недопустимо.
6. Графический материал должен быть выполнен четко, в формате, обеспечивающем ясность всех деталей. Обозначение осей координат, цифры и буквы должны быть ясными и четкими. Необходимо обеспечить полное соответствие текста, подписей к рисункам и надписей на них.
7. Простые формулы следует набирать как обычный текст, более сложные — с использованием редактора формул программы MS Word. Нумеровать нужно формулы, на которые имеются ссылки в тексте. В то же время нежелательно набирать формулы или величины, располагающиеся среди текста, с помощью редактора формул.
8. При выборе единиц измерения необходимо придерживаться Международной системы единиц СИ.
9. Список литературы приводится в конце рукописи на отдельном листе, в тексте указываются только номера ссылок в квадратных скобках, например [2]. Оформление библиографии должно соответствовать ГОСТ 7.1–76.
10. В начале статьи нужно указать полное название учреждения, в котором выполнена работа. Статья должна быть подписана всеми авторами.
11. К статье должны быть приложены следующие сведения: фамилия, имя и отчество (полностью), место работы, а также полный почтовый адрес (с индексом), адрес e-mail и номера телефонов каждого автора, нужно указать также адрес для переписки и контактный телефон.

Цели и практические аспекты разработки современных технических средств обучения

Ф. Ш. Хафизов, Д. И. Шевченко, А. А. Кудрявцев, А. Р. Арсланов
Уфимский государственный нефтяной технический университет

Сформулированы требования к современным системам обучения специалистов. Описан созданный обучающий комплекс, отличительной особенностью которого является представление динамики технологического процесса во всей полноте — внешний вид, взаимное расположение и текущее состояние оборудования совмещаются с мнемосхемами диспетчерских автоматизированных рабочих мест, мультимедийными справочниками автоматизированной обучающей системы, а также 3D-моделями повышенной детализации.

Ключевые слова: обучающие системы, тренажеры, требования к средствам обучения.

В современных условиях энергетический сектор играет фактически ключевую роль в экономике России, поэтому снижение темпов развития в этой отрасли отрицательно скажется на экономике в целом. Общее техническое состояние отрасли характеризуется большим износом оборудования и недостаточными темпами обновления основных фондов, вследствие чего риск возникновения аварийных ситуаций возрастает.

Средства автоматизации, широко внедряемые в последние годы, позволяют потенциально уменьшить риск возникновения аварий и значительно локализовать последствия нештатных ситуаций. Однако эти средства предъявляют повышенные требования к уровню квалификации персонала, обслуживающего агрегаты, датчики, контроллеры и средства связи и обрабатывающего всю поступающую на диспетчерский пункт информацию. В этих условиях особое значение приобретает подготовка квалифицированных кадров, способных грамотно и безопасно проектировать, обслуживать оборудование и управлять сложной современной техникой, насыщенной средствами автоматизации и компьютерами. Согласно исследованиям, профессиональное обучение и переподготовка кадров в топливно-энергетическом комплексе проводится и будет проводиться при существенном дефиците ресурсов. Можно отметить прогнозируемое сокращение числа соискателей и уровня их образования, дефицит времени подготовки, финансовые ограничения.

В настоящее время большинством специалистов признан тот факт, что использование тренажеров при обучении специалистов безусловно полезно. Шесть–восемь недель компьютерного тренинга эквивалентны одному году обучения на реальном объекте; компьютерные тренажеры могут окупиться за полгода. Однако строгих

методик оценки эффективности тренажеров для подготовки специалистов в области трубопроводного транспорта нефти и целесообразности тех или иных функций тренинга пока нет. Не учитывается и ограниченность ресурсов для тренингов по времени и финансам. Поэтому задача снижения риска аварийности и травматизма на предприятиях нефтегазовой отрасли путем использования оптимизационного подхода к тренингу специалистов является важной и актуальной.

Сформулируем подробнее требования к техническим средствам обучения, выполнение которых возможно с учетом уровня развития современных технологий.

Полнота представления. Современная обучающая система или тренажер должны обладать возможностью проработки всех возможных штатных режимов, переключений и аварийных ситуаций.

Восприимчивость, доходчивость информации. Проведенные в США в 1980-х гг. исследования (National Training Laboratories in Bethel, Maine) позволили обобщить данные относительно эффективности (средний процент усвоения знаний) различных методов обучения взрослых [1]. Эти результаты представлены на рис. 1.

Современная обучающая система для подготовки специалистов должна предусматривать дополнительно интеграцию, одновременное совмещение разных уровней «пирамиды обучения», чем достигается наибольшая восприимчивость информации.

Глубина и адекватность представления. Физические параметры, одинаково важные для математического представления технологического процесса, совершенно неравнозначны с точки зрения подхода к их представлению и визуализации (презентации).



Рис. 1. Пирамида обучения

Универсальность представления. Для сокращения различий в качестве подготовки и, соответственно, в надежности персонала разных специальностей и разного уровня подготовки, универсальная система «Комплексная модель – тренажер – приборные стенды – автоматизированные обучающие системы (АОС)», фактически имитирующая реальный объект с максимальной достоверностью при ограничении на пространство аудитории и стоимость, не должна иметь недостатков в качестве проработки тех или иных элементов тренинга. Специалист по автоматике должен проходить не менее качественную подготовку, чем оператор сложного комплекса.

Гибкость и сравнительная простота перенастройки — важнейшее свойство системы, обеспечивающее возможность реализации эффективного множества тренингов.

Максимальная удельная дешевизна. Представление информации в виде обучающих комплексов, совмещающих автоматизированные обучающие системы для различных специальностей, тренажерные комплексы и стенды, ядром которых служат полные математические модели процессов, включая 3D-модели или действующие макеты, обеспечивает гораздо меньшую удельную стоимость обучения в сравнении с набором разрозненных обучающих систем, стендов и тренажеров для специалистов разных специальностей и категорий.

Адаптивность. Современная обучающая система должна иметь выраженную целевую направленность и одновременно гибкость, отвечать всем требованиям учебного процесса и

передавать обучаемым конкретные знания и навыки. Для выполнения данного условия прежде всего необходимо перевести абстрактные общие требования в форму конкретных тренингов. Как один из вариантов решения указанной проблемы предлагается так называемый «комплексный генератор аварийных событий» (ГАС). Составляющий элемент ГАС — «генератор тренингов» — позволяет сформировать оптимальное множество тренингов, обеспечивающее максимальную эффективность, т. е. максимальное снижение количества и удельного веса ошибок персонала и их влияния на общий уровень промышленной безопасности при ограничении общего времени проведения тренингов и финансовых затрат.

Концепция исполнения данного модуля базируется на использовании инструментария так называемого «дерева отказов». Основными элементами для построения являются внутренние события системы (внезапные отказы, постепенное изменение параметра до сигнального уровня), внешние события (указания на смену режима, внешние воздействия) и действия самого обучаемого (правильные и своевременные или нет).

Построение системы тренингов начинается с построения многоуровневого дерева отказов для каждого типа значимых событий — от смены штатных режимов до локализации аварийных ситуаций (этап «Построение множества карт тренингов»). Отметим, что генератор событий реализуется в виде программного модуля, и разработка карт тренинга может производиться как разработчиками, так и преподавателями.

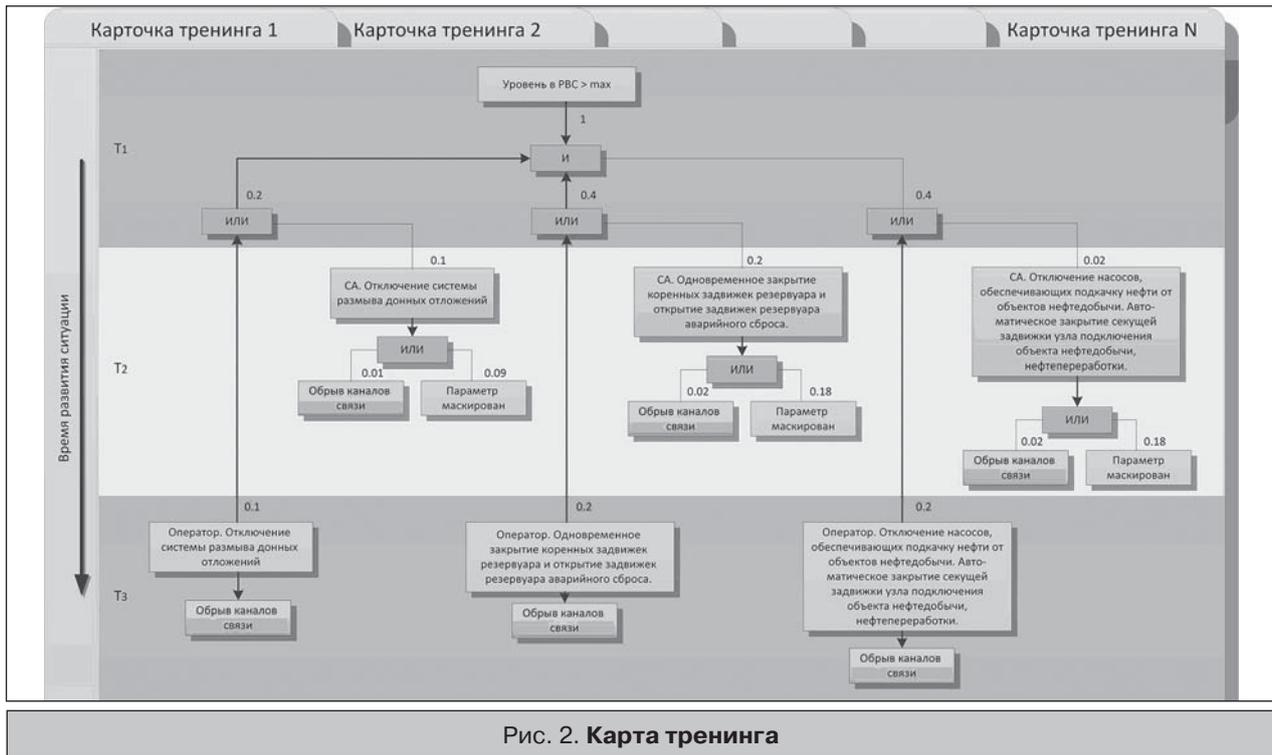


Рис. 2. Карта тренинга

На рис. 2 показан общий вид карты тренинга с множеством возможных исходных ситуаций, наступающих событий, весовых коэффициентов и логических элементов. Различают события, независимые от действий обучаемого, закладываемые в алгоритм карты тренинга (например события, срабатывающие в определенное время и в определенном порядке), и зависимые события, итог которых зависит от правильности действий обучаемого в пределах выделенного лимита времени.

Каждой ветке «дерева» (графа) может быть присвоен весовой коэффициент (например, вероятность наступления события), позволяющий распределить оценку общего ущерба (штрафной функции) от возможного наступления итогового события или риска по веткам и, соответственно, по отдельным действиям обучаемого.

После этапа построения карт тренинга проводится этап обучения «генератора событий». Тестовая группа обучаемых, прошедших предварительное теоретическое обучение, проходит тренинги. Итоги этой работы фиксируются на графике (рис. 3).

Пусть формализованная цель занятия (тренинга) вида X_i — это предотвращение происшествий (итоговых событий) вида Y_i при тренинге группы из M операторов, впоследствии работающих на N объектах. Соотнесем выбранную интегральную оценку, например, оценку предотвращенного ущерба S_i от происшествия

вида Y_i , со стоимостью обучения L_i . Оценка предотвращенного ущерба S_i может быть произведена, например, методом экспертных оценок. Для оценки S_i средняя величина ущерба от происшествия вида Y_i умножается на количество объектов N . Стоимость обучения L_i представляет собой сумму стоимости отсутствия обучаемого на рабочем месте во время учебного процесса, средней стоимости учебного процесса без учета технических средств и стоимости использования учебных технических средств. Оценки S_i и L_i , отнесенные к продолжительности обучения T_{cp} , превращаются в удельные величины.

Общая эффективность процесса обучения при таком подходе приобретает вполне объективную оценку в виде разности удельного предотвращенного ущерба и удельной стои-

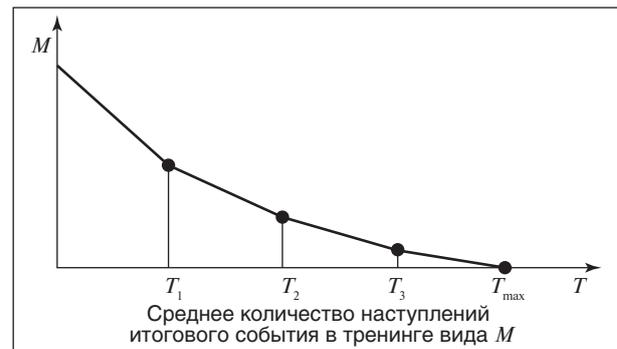
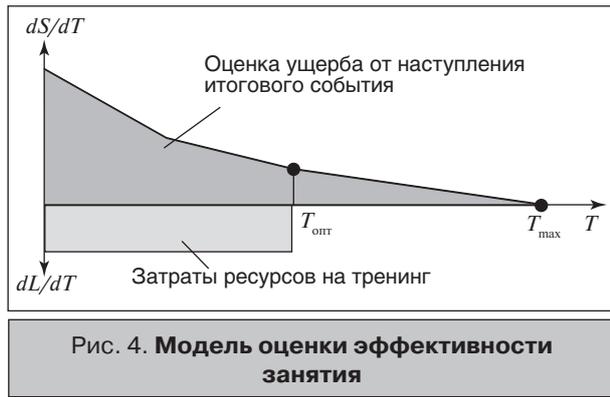


Рис. 3. Результаты тестового тренинга



мости обучения. Эффективность учебного процесса отличается неоднородностью во времени. Генератор событий производит взвешенную оценку длительности курса и удельной оценки ущерба, при которой общая оценка ущерба распределяется (взвешивается) согласно графику, показанному на рис. 3, и равномерно снижается до нуля при максимальной продолжительности курсов, когда наиболее отстающий обучаемый прекращает допускать ошибки (рис. 4). Дальше обучать не имеет смысла, так как средства расходуются впустую. При этом оптимальная продолжительность курса $T_{\text{опт}}$ может быть оценена как время, при котором удельный ущерб равняется удельной стоимости обучения.

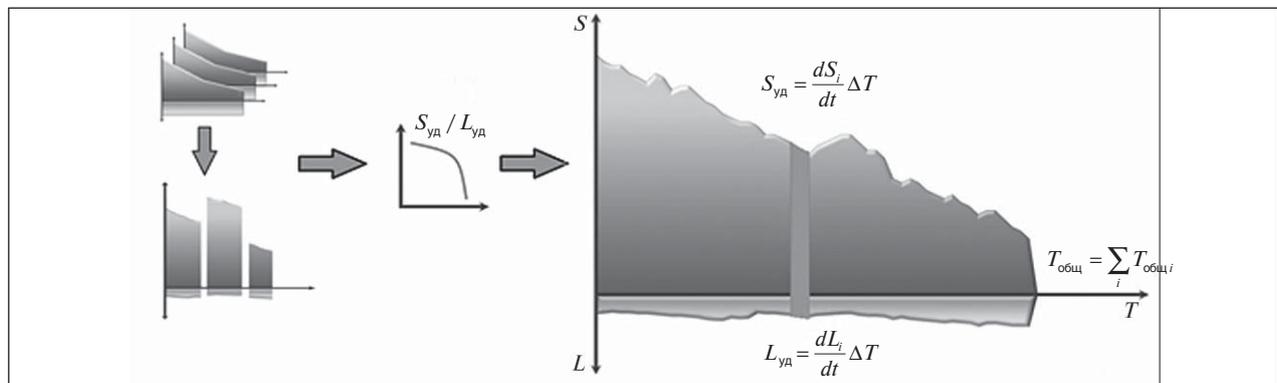
Отметим, что эффективность конкретного тренинга зависит прежде всего от времени $T_{\text{опт}}$, так как оценка предотвращенного ущерба (как некая функция штрафа) является исходной информацией и коррекции не подлежит, т. е. площадь «треугольника» на рис. 4 остается неизменной. При этом значение удельного ущерба dS/dT при $T = T_{\text{max}}$ равно нулю, а при $T = 0$ значение dS/dT фактически является функцией T_{max} .

Разработаем методику распределения учебного времени и средств, оптимальную по предложенному критерию эффективности. Построим интервальные оценки для всего множества i

возможных видов занятий, включая теоретические занятия, практику и тренинги, оценивая возможный предотвращенный ущерб и удельную стоимость занятий, по методике, описанной выше. Разбив множества i на временные отрезки, получим множество некоторых численных величин. Введем понятие селектора максимума как алгоритма, последовательно на каждом шаге j отбирая из всего множества графиков пару $S_{yd i}$ (dS/dT для точки T) и $L_{yd i}$ (dL/dT для точки T) с наибольшим отношением $S_{yd i}/L_{yd i}$, начиная с максимальной величины. Добавив эту пару к оптимальному множеству под номером j и изъяв ее из общего множества графиков, повторяем процедуру для шага $j+1$ до полного исчерпания множества интегральных оценок. Получаем оптимальное множество для всех видов занятий X_i (рис. 5). Итоговое время занятий на таком графике, очевидно, является суммой всех $T_{\text{опт}}$ для всех графиков вида, показанного на рис. 4.

Теперь приступаем к процедуре ограничения справа этого множества по критерию максимальной допустимой длительности учебных курсов T_{max} или по максимально допустимой общей стоимости обучения. В результате получается подробный план, в котором описано общее количество часов занятий каждого вида X_i . Если при построении практических планов по какому-либо виду занятий количество часов меньше T_{min} , то необходимо либо убрать эти часы вообще, либо иным образом скорректировать планы за счет допустимого сокращения часов занятий другого вида.

Имея такие оптимальные планы, можно оценивать эффективность использования тех или иных технических средств и тренажеров, а также целесообразность их реконструкции и разработки новых средств. Если в совокупности оптимальных планов общее количество часов с использованием этих средств недостаточно, средство используется неэффективно.



При практической реализации ГАС были выработаны следующие рекомендации для процесса построения оптимального множества тренингов.

1. Агрегирование видов отказов. Развертывание сценариев «дерева отказов» с детализацией аварийных событий приведет к увеличению числа тренингов до многих тысяч и времени отработки до тысяч часов, причем при прохождении последнего тренинга обучаемый уже забудет первый.

2. Концепция «дерева отказов» подразумевает присваивание ветвям некоторой вероятности возникновения событий. Анализ происшествий на объектах трубопроводного транспорта нефти показывает, что разнообразие причин конкретных отказов и редкая, а порой и уникальная цепочка развития событий не позволяют корректно ставить вопрос о расчете априорной вероятности из-за недостаточности статистических данных. Более правильным является придание ветвям некоторых весовых коэффициентов, оценки которых производятся по методу экспертных оценок. Так же метод экспертных оценок следует использовать при априорной оценке ущерба (функции штрафа) от того или иного события.

3. Оценка финансовых затрат на проведение тренингов должна учитывать не только стоимость тренажеров, но и стоимостную составляющую самой инфраструктуры процесса обучения (здания, помещения, электроэнергия, отопление, административные работники, преподаватели и т. д.), а также стоимость отрыва от производства с сохранением заработной платы обучаемых. При этом становится очевидной ошибочность экономии на тренажерах.

4. Оценка времени тренингов должна производиться на основе эмпирических данных по результатам анализа тренингов групп обучаемых.

5. Предварительный профессиональный отбор и тренинг профессионально значимых качеств, важность которых показана в ряде работ, например [2], являются критически важными мероприятиями, так как непосредственно влияют на длительность тренинга T_{\max} , стоимость и, следовательно, количество тренингов, которые можно провести в ограниченный промежуток времени. Следовательно, в рамках концепции использования ГАС это непосредственно влияет на общий уровень промышленной безопасности.

6. Возможности кадрового отбора ограничены проблемой фактического дефицита кадров и общего уровня их образованности. Возможным решением является интенсификация процесса

обучения с использованием всех возможностей современных технологий. В рамках предлагаемой концепции экспериментально показано, что серьезным ресурсом сокращения времени тренинга T_{\max} , а следовательно, и повышения эффективности всего курса обучения, является степень реализации в реальном тренажерном комплексе элементов концепции интегрированной обучающей системы.

Интегрированная обучающая система подразумевает интеграцию и взаимное проникновение подсистем, отвечающих как за внутреннее содержание процесса обучения, удовлетворяющее требованиям полноты, адекватности, гибкости и т. д., так и за внешние средства представления информации обучаемому, среди которых отметим стенды, действующие макеты, мнемосхемы автоматизированных рабочих мест (АРМ), автоматизированные системы обучения, тесты и др.

Рассмотрим ядро интегрированной обучающей системы более подробно на примере интегрированной обучающей системы для специалистов области трубопроводного транспорта нефти, реализованной в Самарском государственном техническом университете. Основой системы является модуль ГАС, методика построения которого была подробно рассмотрена выше. В системе трубопроводного транспорта количество возможных действий оператора по управлению оборудованием очень велико, к тому же, для получения одного и того же результата зачастую можно действовать по-разному. В случае аварии действия оператора могут привести к разным последствиям и различным вариантам развития этих последствий.

Основой расчетной части системы является модель технологических процессов, определяющая основные исходные данные и взаимосвязь между ними. Для опасных объектов трубопроводного транспорта нефти такими данными являются прежде всего математические модели гидродинамики процессов в разветвленных трубопроводах, модели агрегатов, регуляторов и систем управления.

Отличительной особенностью такого обучающего комплекса является представление динамики технологического процесса трубопроводного транспорта нефти во всей полноте — внешний вид, взаимное расположение и текущее состояние оборудования совмещаются с мнемосхемами диспетчерских АРМ и мультимедийными справочниками автоматизированных обучающих систем, созданными с использованием средств 3D-моделирования.

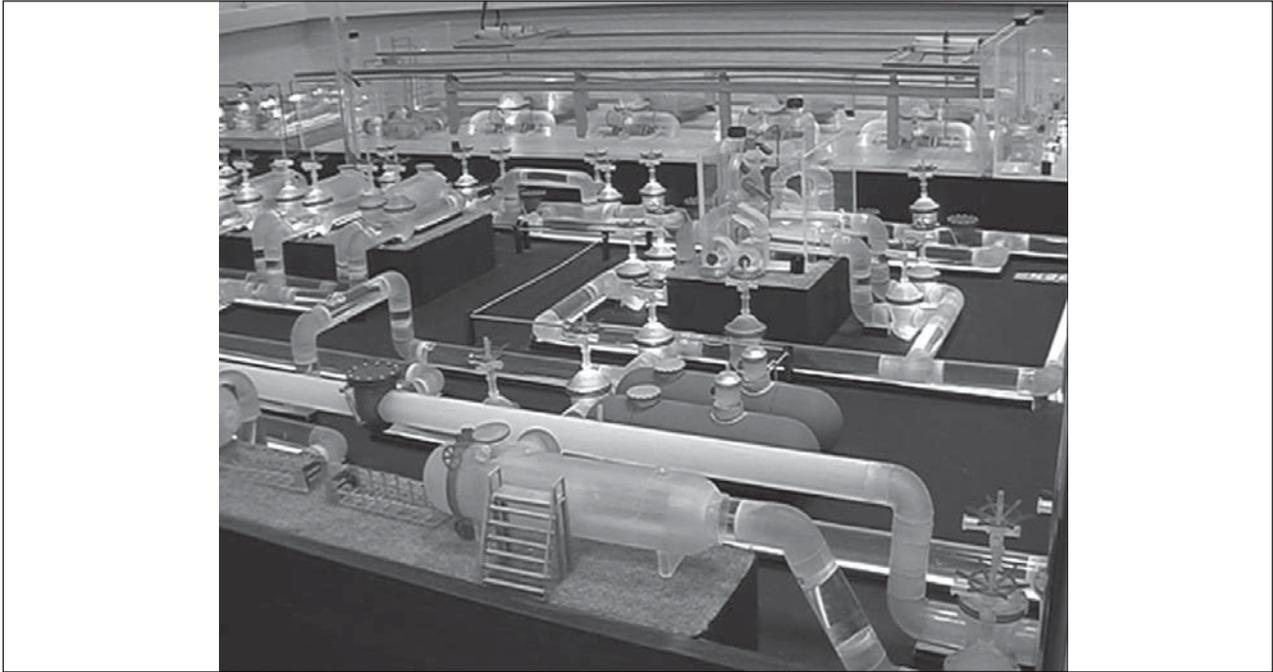


Рис. 6. Отображение процесса работы насосно-перекачивающей станции

В основе всего комплекса заложена подробная математическая модель технологического процесса и его развернутая пространственная картина. Состояние оборудования на действующем макете постоянно изменяется, что отражается цветом подсветки. В прозрачных трубах течет вода, имитируя реальное движение нефти. Контуры, в которых в данный момент движется жидкость, подсвечиваются, в буквальном смысле показывая процесс перекачки нефти (рис. 6). Технологическая схема реализует движение нефти по участку магистрального нефтепровода от резервуаров к резервуарам с одной головной и двумя промежуточными станциями.

На схеме показаны резервуары различных видов, в частности, наряду с резервуарами с обычным исполнением реализована модель резервуаров с плавающим понтоном и плавающей крышей. Уровень жидкости в резервуарах постоянно меняется и в целом соответствует показаниям на индикаторах.

Из резервуаров нефть перекачивается по линии подпорных и магистральных насосов на выход головной насосной станции. Показано все основное оборудование — фильтры, узел учета нефти, насосные агрегаты, контуры регулирования давления, камеры пуска, пропуска и приема средств очистки и диагностики, сами средства очистки и диагностики (СОД, например скрепки), вспомогательные системы и другое оборудование. Все это оборудование находится в работе (рис. 7).

На таком комплексе учащийся с самого начала вовлечен в производственный процесс, знакомится с разнообразным оборудованием и имеет возможность вмешаться в процесс с совершенно реального рабочего места оператора, которое для полноты представления вынесено непосредственно к макету для того, чтобы обучаемый мог наблюдать результат своего вмешательства (рис. 8). Такое обучение приносит наибольшую отдачу, так как обучаемый находится в реалистичном информационном поле, где каждый физический параметр правильно представлен как сам по себе, так и во взаимосвязи с другими параметрами.

Кроме визуальных эффектов, обучаемый получает важнейшую образную информацию о том, как осуществляется процесс, как расположено оборудование в пространстве и как это связано с динамикой процессов. Ненаблюдаемые визуальными параметрами отображаются на разнообразных графиках и диаграммах, демонстрируемых как на внешних экранах, так и на рабочем месте обучаемого.

Таким образом, обучение осуществляется от простого к сложному — от общего знакомства с особенностями технологии и оборудования к принципам управления процессом и работы автоматики, вплоть до участия в сложных операциях по парированию нештатной ситуации.

На таком интегрированном комплексе реализуется принцип отсутствия «узких» мест в уровне подготовки разных специалистов, поскольку

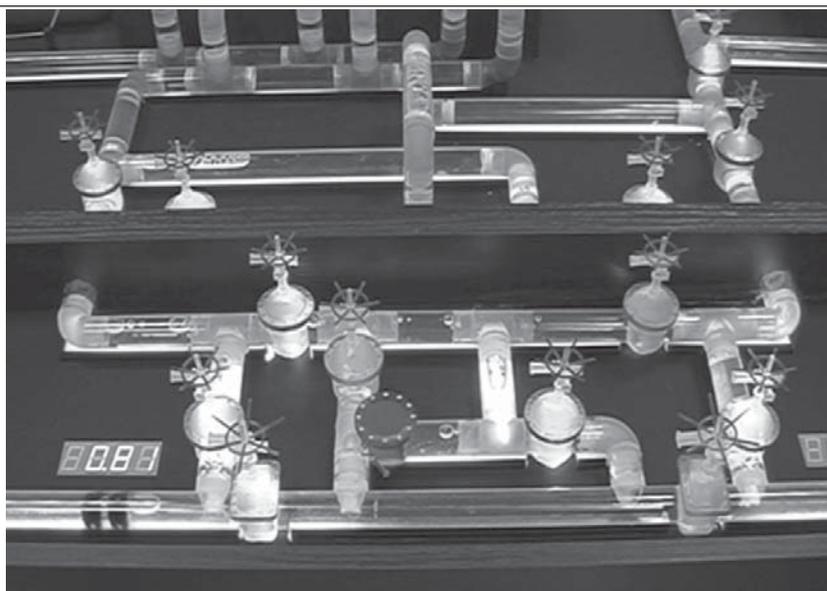


Рис. 7. Пропуск скребка

физические параметры можно непосредственно измерить реальными датчиками, конкретное оборудование можно исследовать на стенде (рис. 9) вплоть до реализации реальных алгоритмов автоматизации на реальных контроллерах.

Таким образом, в одной аудитории можно проводить общие обзорные лекции для всех специальностей, связанных с транспортировкой углеводородов, пользуясь макетом и экраном для иллюстрации той или иной информации. Те или иные элементы можно выделять на макете

с помощью лазерной указки, запуская на панели вспомогательную страницу с 3D-роликом или страницей обучающей системы. Благодаря этому комплекс приобретает преимущество 3D-моделей — масштабируемость. Например, устройство и функциональное назначение сложного оборудования, в частности, системы сглаживания волн давления, с помощью действующего макета может быть рассмотрено только до определенного уровня из-за того, что эта система, представленная на макете, не-



Рис. 8. АРМ ученика на базе АРМ оператора и диспетчера

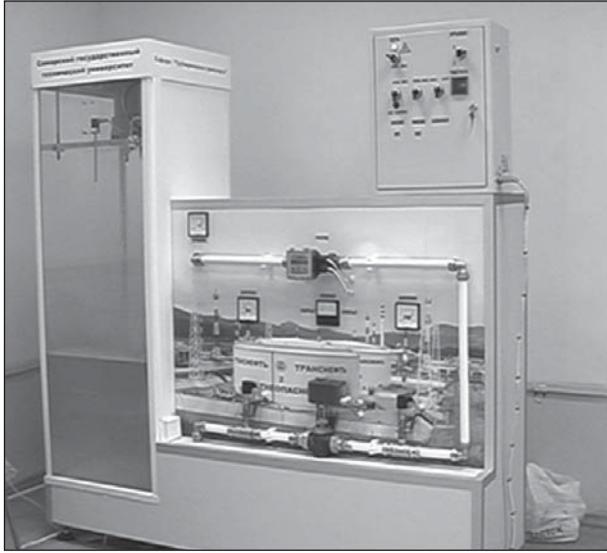


Рис. 9. Стенд приборного оборудования и автоматики

лика. 3D-ролик на плазменной панели поможет подробно рассмотреть устройство системы и результат ее использования.

В этой же аудитории можно проводить углубленные практические занятия для специалистов, обслуживающих сложные технические средства измерений и автоматики. Можно программировать контроллеры, изменять алгоритмы работы автоматики и сразу видеть результаты работы на действующем макете, поскольку он работает в том же информационном пространстве под управлением единой математической модели.

Можно обучать будущих инженеров и диспетчеров управлению сложными технологическими процессами в реальном времени как в типовых, штатных ситуациях, так и в условиях искусственного стресса в нештатных ситуациях вплоть до исследования разных алгоритмов работы систем и эргономического влияния того или иного интерфейса на восприятие и быстроту принятия решений.

Сами учащиеся могут принимать участие в проектировании прикладного программного

обеспечения, менять алгоритмы и интерфейсы, а также расширять технологическую схему, менять рельеф трассы, или даже исследовать совершенно другую систему за пределами резервуаров, так как конструктор математических моделей открыт для пользователей. Для усложнения ситуаций специально разработан динамический генератор аварийных ситуаций, компилирующий единичные отказы в динамические цепочки с развитием сложной нештатной ситуации в пространстве и времени.

Имеется возможность исследовать те или иные ситуации, используя данные из архива. Возможно проведение тестирования обучаемых, для этого существуют и постоянно совершенствуются средства и программы тестирования, модули записи последовательности действий обучаемого при работе на тренажере с последующей автоматической оценкой этих действий.

Указанный комплекс эффективно используется в обучении благодаря тому, что процесс обучения является более естественным для человека, поскольку в нем задействованы визуальные, аудиальные, пространственные и знако-символьные способы восприятия информации. Обучаемый может сам выбрать способ достижения лучшего восприятия информации и, что самое главное, поучаствовать в рабочих ситуациях и решать задачи, для осознания которых без такого обучения ему потребовались бы годы работы на реальном объекте. При этом имеется возможность совершать ошибки, которые на реальном объекте недопустимы. Предотвращение подобных ошибок в будущей работе и является основным назначением разработанного комплекса.

Указанные принципы работы, технические решения и программное обеспечение могут использоваться для разработки таких комплексных моделирующих систем для обучения специалистов в области разработки, обслуживания и управления оборудованием для добычи и транспорта нефти и газа, электроэнергетики, городского коммунального хозяйства, транспортной инфраструктуры и в других областях.

Литература

1. Базарова Г. Т. Особенности обучения взрослых // Менеджер по персоналу. — 2007. — № 2. — С. 42–48.
2. Глебова Е. В., Грудина С. А. Влияние «человеческого фактора» на уровень аварийности и травматизма на объектах газоснабжения // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. — 2005. — № 4. — С. 51–52.

F. S. Hafizov, D. I. Shevchenko, A. A. Kudryavtsev, and A. R. Arslanov

The Purposes and Practical Aspects of the Modern Training Facilities Design

The modern facilities requirements for specialist's training are described. The developed training complex is described. A distinctive feature of the training complex is the representation of the dynamics of the process in its entirety — the appearance, relative position and the current state of the equipment combined with a mimic panel dispatcher workstations, multimedia directories of Automated Training System, as well as 3D-models of high detail.

Keywords: training systems, simulator, training aids requirement.