

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Ивановский государственный химико-технологический университет

НАДЕЖНОСТЬ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Иваново 2007

УДК 338.45.66

Афанасьева Т.А. Надежность химико-технологических производств /
Афанасьева Т.А., Блиничев В.Н.;

Иван. гос. хим.-технол. ун-т: монография – Иваново, 2007. – 199с.

Рассмотрены основные проблемы надежности химико-технологических производств. Значительное внимание уделено представлению надежности производства, как комплексной системы, состоящей из трех базовых блоков: надежность химико-технологических процессов (ХТП), химико-технологического оборудования (ХТО), управления производством (организация, планирование, учет, контроль). Приведены методы расчета, прогнозирования, диагностики, идентификации надежности производства и его составляющих. Даны сведения по ГОСТам надежности в технике. Разработана классификация показателей надежности технологических процессов. Предложена методика повышения надежности конструкций ХТО, математические модели ХТП и ХТО.

Монография предназначена для специалистов в области химических производств, производства строительных материалов, пищевых продуктов, текстильной и других отраслях промышленности, а также для студентов химико-технологических вузов.

Рецензенты:

кафедра «Расчет и конструирование химических машин и аппаратов»
МГУ ИЭ (МИХМ).

А.Н. Чохонелидзе, профессор, заведующий кафедрой МАХП Тверского
Государственного Технического университета.

ISBN 5-9616-0214-1

© Ивановский государственный
химико-технологический
университет, 2007

Введение

В этой книге будет рассмотрена одна из актуальных проблем техники, технических систем – надежность. Проблемой надежности систем, отдельных ее элементов занимаются многие специалисты, ученые нашей и других стран. Ей посвящено много книг, статей, разработаны государственные стандарты. В то же время вопросам надежности химико-технологических производств, уделено не столь значительное внимание, а проблемы надежности химико-технологических процессов, зависящие от многих факторов, освещаются довольно редко [17, 19, 101, 103].

Цель книги – осветить круг проблем и вопросов современной теории надежности химико-технологических производств, показать общие подходы и методы решения задач, стоящих перед промышленными производствами, для повышения стабильности и эффективности их работы.

Любое химико-технологическое производство представляет собой сложную, иерархическую систему, которую с точки зрения его надежности удобно рассматривать как систему протекающих последовательных и последовательно-параллельных процессов, начиная от процессов дозирования исходных компонентов и заканчивая процессами затаривания готового продукта в упаковки и отгрузки его потребителю (рис.1).

Надежность химико-технологического производства зависит от надежности протекания вышеперечисленных процессов. Надежность реализации любого процесса зависит в свою очередь от надежности работы оборудования, в котором он осуществляется, а также от надежности управления данным процессом. Надежность работы каждой единицы оборудования, в свою очередь, зависит от надежности его эксплуатации, от качества или надежности его изготовления на машиностроительных заводах, а также от качества или надежности проектирования техники для реализации конкретного процесса (см. блок I, рис.1).

Из рис.1 наглядно видно, что надежность химико-технологического производства любого продукта зависит от надежности осуществления основных его технологических процессов.

Надежность реализации процессов, кроме надежности работы оборудования, в котором они протекают, очень сильно зависит от надежности управления ими, от поддержания в оптимальных режимах определяющих параметров процессов, особенно в тех случаях, когда диапазон устойчивого осуществления процесса достаточно узок и не может быть реализован методами ручного регулирования.

В этой связи мы видим, что надежность основных химико-технологических процессов является основой надежности химико-технологического производства:

$$J_{np-ва} = J_1 J_2 J_3 J_n, \quad (1)$$

где $J_{пр-ва}$ – надежность производства; J_1 – надежность химико-технологического процесса, J_2 – надежность химико-технологического оборудования, J_3 – надежность управления.

В данной монографии делается упор на рассмотрение надежности химико-технологических процессов, как основы надежности химико-технологического производства.

На основе социально-экономического развития России предстоит выйти на новые рубежи, что означает подъем народного хозяйства на принципиально новый научно-технический и организационно-экономический уровень, перевод его на рельсы интенсивного развития. Для ускоренного развития страны нужны сдвиги в технологическом содержании научно-технического прогресса. Одним из важнейших вопросов этой проблемы является обеспечение и управление качеством и надежностью промышленных производств. Понятие «обеспечение и управление надежностью» формулируется как целенаправленное воздействие на процессы формирования надежности, на отдельные его этапы, контроль и регулирование хода данного процесса. При этом образуют единую систему обеспечения и управления начальным качеством и надежностью как свойством сохранять начальные показатели во времени.

В России действует государственная комплексная система управления качеством продукции (КС УКП), основной целью которой является обеспечение постоянных, высоких темпов эффективного улучшения качества всех видов выпускаемой продукции. В настоящее время отдельной системы по управлению надежностью нет и, поэтому имеется экономическая целесообразность создания комплексной системы управления и обеспечения надежности промышленного производства (КС УОНП). Такая система надежности, как системный подход, необходима для обеспечения надежности:

- технологии и оборудования на стадии проектирования;
- оборудования (или субъекта) в процессе изготовления;
- на стадии монтажа;
- на стадии эксплуатации, которая состоит из двух основных элементов (технологической надежности, устойчивости процессов и надежности оборудования в процессе эксплуатации).

КС УОНП должна быть подсистемой не только КС УКП, но и АСУП, поскольку речь идет не только о продукции, выпускаемой предприятием, но также и о надежности работы самого производства. КС УОНП должна представлять собой совокупность надежного функционирования всех производственных и служебных подразделений предприятия, а также разработку мероприятий, методов и средств, направленных на обеспечение необходимого уровня надежности технологического процесса и оборудования при их разработке, освоении (ХТП), изготовлении (ХТО) и эксплуатации.

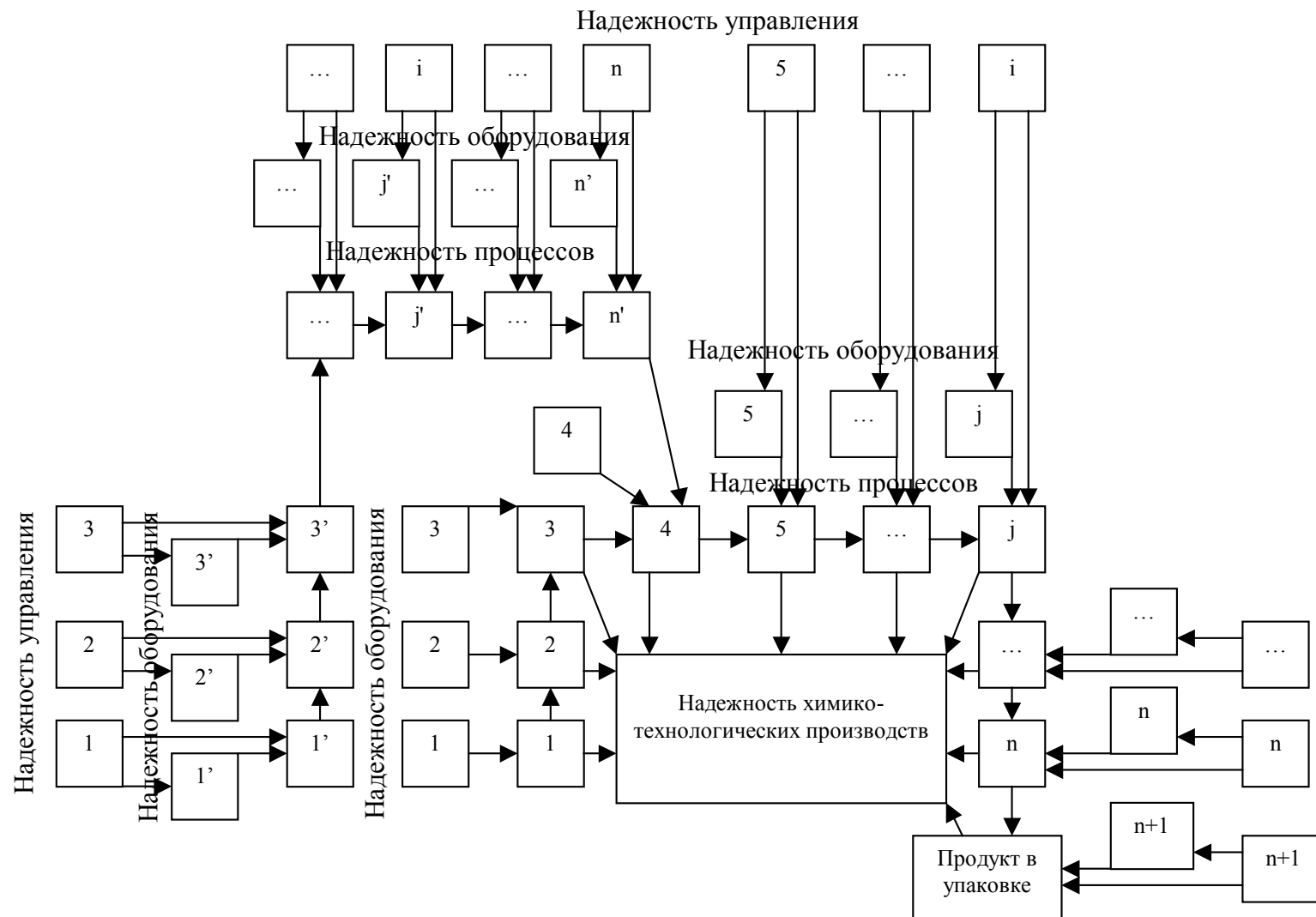


Рис. 1. Иерархия построения химико-технологического производства

Книга состоит из пяти глав и трех приложений. В I главе излагаются основные положения системного подхода к проблеме надежности химико-технологических производств, разработки комплексной системы управления и обеспечения надежности производства. Во II главе приводятся, во-первых, основы управления надежностью производства, во-вторых, показаны основные принципы разработки математических моделей надежности оборудования и различных видов химико-технологических процессов.

III и IV главы книги раскрывают вопросы обеспечения надежности химико-технологических процессов и оборудования. В V главе освещается сущность комплексной системы управления и обеспечения надежности производства, вопросы прогнозирования и диагностики надежности химико-технологических производств.

Авторы надеются, что эта книга внесет свой вклад в попытку осветить и в какой-то степени решить некоторые из проблем надежности химико-технологических производств.

Глава I

Системный подход к проблеме надежности химико-технологического производства

1.1. Основы надежности химико-технологического производства

1.1.1. Организация производства и его надежность

Новая экономическая стратегия ускорения развития страны обусловлена переходом к рыночным отношениям, особенности которого состоят в усложнении процесса совершенствования техники и технологии, в комплексном характере изменения взаимоотношений техники и людей, в реорганизации системы управления. Интенсивный тип экономики связан не только с всемерным развитием средств труда, но и с улучшением использования действующих основных фондов. Таким образом, экономический рост страны обеспечивается двумя группами факторов: 1-я группа – повышение качества продукции, надежности, технологического уровня производства, доведение его до уровня лучших мировых аналогов;

2-я группа – совершенствование организации труда и производства, повышение степени использования имеющегося оборудования, рост культуры и порядка, улучшение организации системы управления.

Для функционирования организации производства следует обеспечить соблюдение следующих принципов: целевая специализация, наличие программы (плана) функционирования, обеспечение целостности системы.

Надежность объекта может быть обеспечена также путем резервирования. Виды резервирования рассматриваются, например, в справочнике [1] под редакцией И.А.Ушакова, способы резервирования рекомендуются в соответствующих тем или иным объектам специализированных источниках. Довольно основательно излагается точка зрения на этот вопрос Зубовой А.Ф. [2, 3], где указывается, что вопросы резервирования следует решать не только при эксплуатации техники, но и при ее создании и конструировании. Резерв – это не только понятие «запас» чего-либо, но и средство повышения и обеспечения надежности, эффективный результат действия которого должен предусматриваться изначально в процессе прогнозирования и планирования химико-технологической системы (ХТС).

При решении задач резервирования необходимо более экономично, с наименьшими затратами обеспечить заданные показатели надежности. Обычно в задачах оптимального резервирования предполагается, что стоимость резерва в целом определяется: $C(x_1, \dots, x_m) = \sum_{i=1}^m c_i(x_i)$, где $x_1 \dots x_m$ – составляющие (элементы, участки) химико-технологической системы в количестве от i до m . Стоимость резервного элемента $c_i(x_i) = c_i x_i$ [72]. Оптимальное резервирование определяет задачи и организацию системы обеспечения технических объектов запасными

элементами, а также является составной частью ремонтных служб предприятий. А.Ф.Зубова [2] проводит технико-экономическое обоснование целесообразности резервирования для повышения и обеспечения надежности машин и аппаратов химических производств.

Надежность химико-технологического производства в первую очередь определяется прогрессивной технологией (рис.2). С утверждения технологического процесса начинается работа по организации любого промышленного производства (создание рабочих мест, подбор оборудования, его разработка, конструирование, набор кадров и т.д.)

Изначально, именно надежность технологического процесса создает надежность всей производственной системы. Структура химико-технологических процессов (рис.2) отражает не только многообразие

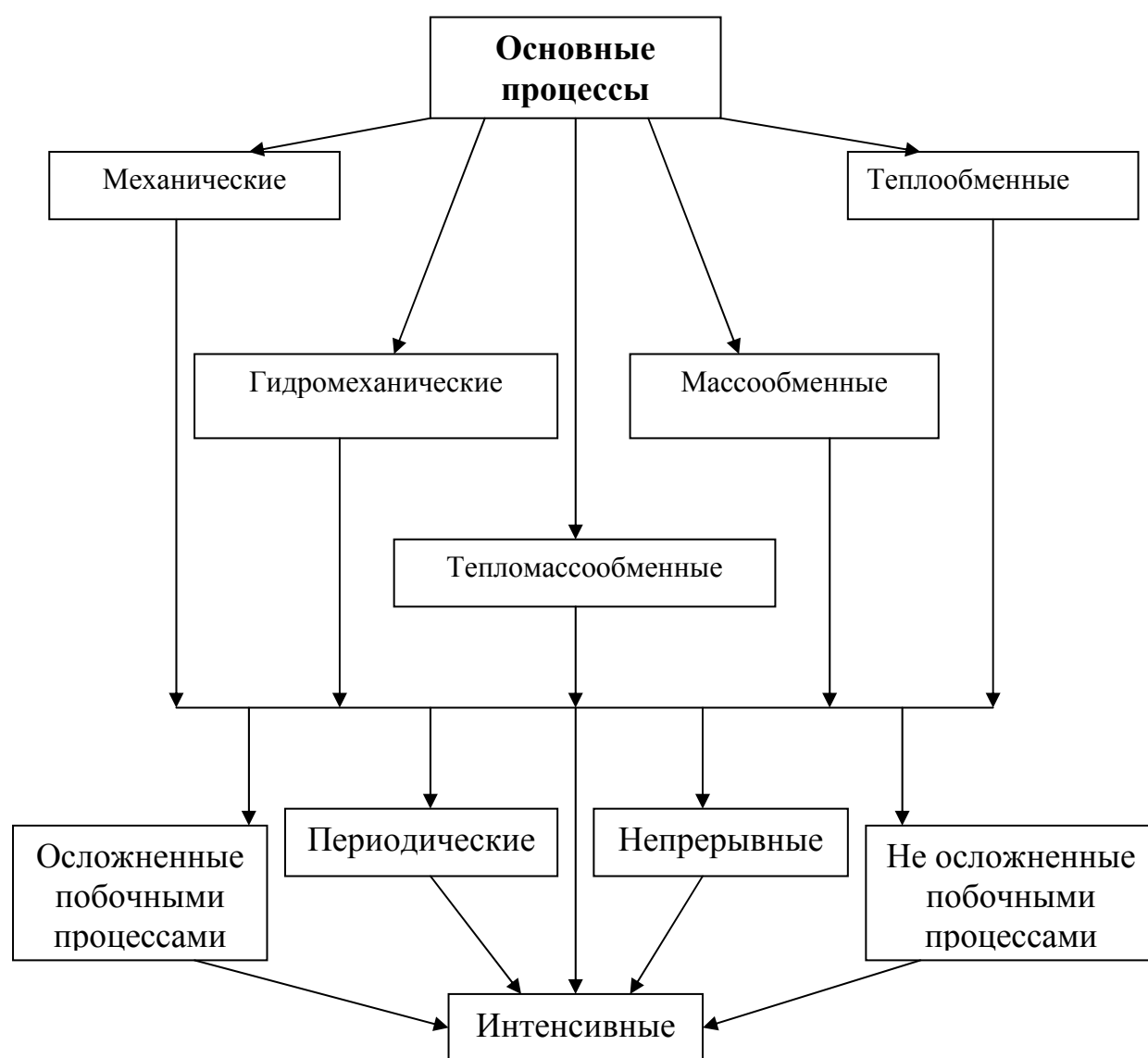


Рис.2. Структура химико-технологических производственных процессов

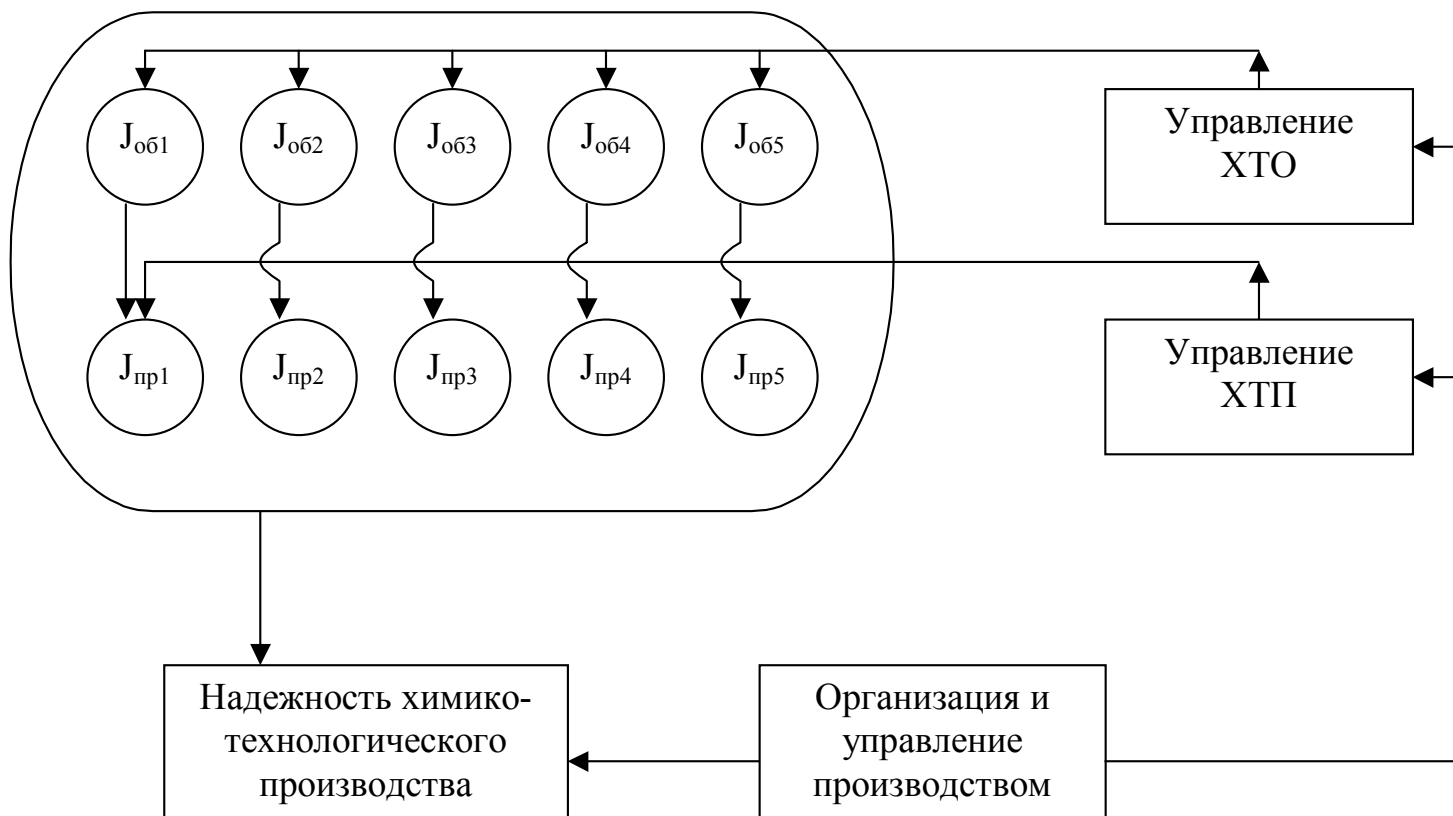


Рис.3. Принципиальная схема влияния надежности химико-технологических процессов на надежность химико-технологического производства:

$J_{обі}$ – надежность химико-технологического оборудования ($ХТО_i$);

$J_{прі}$ – надежность химико-технологического процесса ($ХТП_i$)

выполняемых на химпроизводствах процессов, но и всю значительную сложность этих процессов, их взаимосвязь и взаимовлияние.

Ученые, производственники, специалисты разделяют все основные процессы, применяемые в большинстве химических производств [5-7], на механические, гидромеханические, тепловые, массообменные и тепломассообменные. Такая классификация производится в зависимости от закономерностей, характеризующих протекание этих процессов, т.е. процессы подчиняются законам гидромеханики, тепло- и массо-передачи, химической кинетики, а также механики твердых тел (измельчение, смешение, классификация-разделение). Каждый химико-технологический процесс (ХТП) зависит от значительного количества факторов и причин, влияющих на ход данного процесса, оказывающих совместное, даже часто противоречивое действие. При исследовании и обеспечении надежности ХТП необходимо учитывать то, что они могут быть периодическими и непрерывными, при ведении одного (основного) процесса могут возникать, параллельно и одновременно протекать побочные (неосновные) процессы. Все это отражается на эффективности, устойчивости и надежности химико-технологического процесса, а, следовательно, на надежности химико-технологического производства.

Все отказы в работе ХТП можно классифицировать по причинам их возникновения: А – отказы, происходящие вследствие организационных причин на производстве; Б – отказы, возникающие из-за отклонения параметров процесса и технических характеристик оборудования от оптимальных; В – отказы, возникающие вследствие протекания нежелательных побочных процессов.

Надежность технологического процесса – это свойство обеспечивать изготовление продукции в заданном объеме, сохраняя во времени установленные требования к ее качеству и постоянными (оптимальными) параметры этого процесса. Понятие надежности технологического процесса отличается от понятия его точности и стабильности. Согласно ГОСТ 15895 – 77, под точностью понимается свойство технологического процесса обеспечивать соответствующие поля рассеивания значений показателя качества изготовления продукции заданному полю допуска и его расположению; стабильность – свойство технологического процесса сохранять показатели качества изготавливаемой продукции в заданных пределах в течение некоторого времени. Из двух этих определений следует, что эти два показателя характеризуют технологический процесс в некоторый фиксированный момент времени. Надежность же понятие динамическое, поэтому точность и стабильность следует рассматривать как составные части свойства надежности системы.

Под надежностью технологического процесса понимается устойчивый в допустимом интервале изменяемых основных показателей качества ход процесса в течение заданного времени с обеспечением основных его

характеристик в допустимом диапазоне их изменений. Естественно, что в связи с разнообразием химико-технологических процессов, критериями их надежности будут различные характеристики.

Показатели надежности химико-технологических процессов, прежде всего, зависят от физико-химических особенностей процессов, т.е. от природы данного ХТП. В соответствии с приведенной (рис. 2) структурой ХТП рассмотрим показатели надежности гидромеханических, механических, тепловых, массообменных и тепломассообменных процессов. По вышеприведенному определению надежности химико-технологических процессов их устойчивость (надежность) обеспечивается поддержанием постоянными основных оценочных параметров процессов во времени.

Гидравлические процессы осуществляются с использованием гидродинамических машин: насосов, компрессоров, вентиляторов и воздуходувок. Главными характеристиками таких машин являются расходы и напоры воздушных и жидких систем. Анализ работы гидравлических машин показывает, что надежность гидравлических процессов зависит, в основном, только от надежности элементов самих машин. Снижение расходов и давлений потоков ниже допустимых пределов в этих машинах зависит, преимущественно, только от надежности элементов машин, от образивности и коррозионного износа этих элементов: лопастей насосов и вентиляторов; поршней, колец, клапанов, цилиндров, компрессоров, износа элементов уплотнителей, приводящих к снижению напоров, к подсосам и утечкам среды.

К гидромеханическим процессам относятся также процессы разделения суспензий и эмульсий: процессы центрифугирования и фильтрации, надежность которых зависит, в основном, от характеристик фильтрата или фугата, если продуктом разделения является жидкая фаза. В тех случаях, когда продуктом разделения является твердая фаза, которая впоследствии должна быть выдана в виде сухого материала, критерием надежности процесса разделения является влажность твердой фазы. Часто в процессах разделения на гидроциклонах, фильтрах и центрифугах продуктами разделения являются обе фазы (жидкая и твердая или 2-3 жидкости в случае разделения эмульсий). В этих случаях, как правило, надежность процесса определяется критерием, характеризующим регламентируемое качество основного или наиболее дорогого из продуктов.

К механическим процессам относятся процессы: смешения и перемешивания, измельчения, классификации и дозирования твердых материалов.

Главным показателем надежности процесса измельчения является получение заданного количества твердого материала со строго определенным размером частиц или распределением по размерам частиц.

Главными показателями надежности процессов классификации (сепарации) твердых материалов является чистота тонкой фракции, которую иногда характеризуют степенью загрязнения тонких фракций частицами

грубого продукта, а также степенью извлечения тонкого материала из грубого продукта.

Критерием надежности процессов смешения является качество смешения, определяемое равномерностью распределения всех смешиваемых компонентов в объеме смеси, оцениваемое, как правило, коэффициентом вариации.

Критерием надежности процессов непрерывного или порционного дозирования является задаваемая погрешность дозирования, при нарушении которой могут быть полностью прекращены последующие процессы.

К механическим процессам относятся, кроме вышеназванных, также процессы перемещения твердых материалов.

Надежность этих процессов, в основном, зависит от конструктивной эффективности транспортирующих устройств (ленточные транспортеры, пластинчатые транспортеры, скребковые, винтовые, элеваторы и др.). На устройствах смешенного перемещения (транспортеры с погружными скребками, устройства пневматического транспорта и гидравлического транспорта) надежность процессов непрерывного транспорта будет зависеть не только от конструктивных особенностей этих устройств, но также от параметров воздушной (пневматический транспорт) или жидкостной (гидравлический транспорт) среды. Устойчивость таких процессов будет зависеть также от технологических параметров (давление, скорость движения потока, коэффициент сопротивления и др.). Основным показателем надежности таких процессов - производительность потоков может зависеть также от конфигурации пути перемещения материала, насыпного веса (m/m^3).

Характеристика надежности процессов дозирования, смешения и перемешивания имеет такие же черты, как и все механические процессы, но отличается особенностями:

- 1) непрерывность и периодичность дозирования;
- 2) исходное качество материала до смешения или дозирования;
- 3) конечная оценка (результативность) процесса: точность дозирования, равномерность смешения, скорость перемешивания, плотность твердой фазы, вязкость среды и др.

Вышеперечисленные характеристики этих процессов можно назвать вторичными показателями их надежности.

Поскольку на химических промышленных предприятиях производится весьма разнообразная продукция, то химико-технологические процессы ее производства тоже значительно различаются. Не менее широко, чем механические и гидромеханические, представлены тепловые процессы: нагревание и охлаждение, выпаривание и кристаллизация. Определяющим (основным) показателем надежности таких процессов являются температуры в аппаратах или на выходе из аппаратов.

Для выполнения процессов нагревания применяют различные способы нагрева (обогрева) – естественная циркуляция, принудительная циркуляция,

различные виды движения теплоносителей (прямоток, противоток), передача тепла смешением, передача тепла через стенку и др.

Различают установившийся и неуставившийся процессы теплопередачи.

Рассмотренные виды передачи тепла обычно сопутствуют друг другу и реже встречаются в чистом виде (теплопроводность, конвекция, лучеиспускание).

Для обеспечения надежности тепловых процессов следует поддерживать тепловой баланс системы: количество тепла, передаваемого от одного тела другому. При этом необходимо стремиться к минимальному количеству потерь тепла, т.к. потери снижают надежность процесса теплообмена.

Большее количество выполняемых в химико-технологических производствах процессов – это процессы тепловые, массообменные и тепломассообменные: сушка, обжиг, грануляция, кристаллизация, агломерация, абсорбция, адсорбция, экстракция и т.д. Надежность таких процессов может быть обеспечена, так же как у других ХТП, прежде всего поддержанием на оптимальном уровне технологических параметров (стабильная кинетика процесса, температура, давление, влажность и т.д.).

Одним из критериев надежности таких процессов является скорость этих процессов, т.е. скорость перехода вещества из одной фазы в другую (скорость массопередачи). Так как массообменные процессы обратимы, то показателем их надежности может являться также концентрация одного вещества в другом.

Надежность процессов сушки обеспечивается поддержанием оптимальных температур, заданной конечной влажностью материала и отсутствием нежелательных побочных процессов (например, комкование твердых частиц). Надежность процесса сушки зависит также от физико-химических свойств высушиваемого материала и сушильного агента (воздух, топочные газы и др.).

Весьма значительно влияет на надежность ведения процесса обжига, физико-химический состав и структура исходного материала. Например, в производстве фосфора чрезвычайно велика роль физико-механического состава природных ископаемых материалов (фосфориты, апатиты, кремний, фосфаты и т.д.). В [4] доказано, что «производство фосфора характеризуется высоким материальным индексом. На 1 тонну готового продукта расходуется различное количество минерального сырья в зависимости от содержания в нем полезного компонента». Этот индекс – содержание полезного компонента в готовом продукте можно считать одним из показателей надежности производства фосфора. Альперович И.Г. и др. [8] для характеристики качества сырья, рекомендуют применять показатель качества шихты «УКТ» - универсальный комплексный показатель качества. Вполне очевидно, что данный показатель следует считать показателем надежности процесса обжига шихты в производстве фосфора.

Если при обжиге параллельно протекает побочный процесс агрегирования твердых частиц, то это может привести к останову основного

процесса из-за образования так называемого «козла», т.е. спекание продуктов реакции. В данном случае побочный процесс агломерации снижает надежность основного процесса и даже приводит к отказу основного ХТП.

Тепломассообменные процессы (гранулирование, агломерация, кристаллизация и др.) чрезвычайно широко применяются в химической, текстильной промышленности (отделка, окрашивание тканей), в производствах строительных материалов, пищевых продуктов, металлургической и других отраслях промышленности.

Процесс агломерации не всегда является основным при ведении технологических процессов в различных производствах. Весьма часто он является побочным, параллельно протекающим с основным ХТП. И в таких случаях он может либо повышать, либо снижать надежность основного процесса. Например, при проведении процесса кристаллизации и в случаях получения крупнокристаллического продукта процесс агломерации мелких кристаллов (что реализуется в большинстве типов кристаллизаторов из растворов) повышает выход «крупных» частиц и, соответственно, улучшает надежность процесса. В этом случае показателем надежности процесса является выход крупнокристаллического продукта. При ведении процесса грануляции, например, присутствие агрегирования частиц изменяет размеры гранул, их форму, физические и механические свойства, т.е. снижает надежность ХТП. Процесс инкрустации теплообменных поверхностей при ведении кристаллизации аналогичен агломерации и не только уменьшит его надежность, но и в определенное время может привести к останову основного процесса.

Процесс кристаллизации выполняется различными способами и в различных типах кристаллизаторов. Весьма сложен данный процесс из-за его физико-химических особенностей. На надежность процесса кристаллизации будет оказывать существенное значение - образование зародышей кристаллов и рост кристаллов. Так же как и для всех химико-технологических процессов, надежность кристаллизации определяется устойчивостью во времени технологических параметров (температура, давление, концентрация твердого компонента в растворе и т.д.).

Таким образом, тщательный анализ работы химико-технологических процессов и выявление основных показателей видов отказов, снижающих надежность ХТП – предпосылка для успешного решения задач, связанных с обеспечением надежности ХТП.

В зависимости от разновидности ХТП создаются соответствующие виды химико-технологического оборудования (ХТО). Надежность ХТО в большинстве производств обеспечивает надежность технологического процесса и является как бы третьим уровнем обеспечения надежности всего химико-технологического производства (рис.3).

Обеспечение и оптимизация надежности производства могут быть реализованы с помощью комплексной системы управления и обеспечения

надежности производства (рис.24). Чрезвычайно большое значение организации производства, влияние уровня организации на эффективность работы производства требуют тщательного изучения, исследования и установления зависимости этого уровня от наиболее значимых факторов, одним из которых является надежность производства.

Для того, чтобы комплексная система управления и обеспечения надежности производства (КСУОНП) являлась действительно эффективным средством повышения уровня организации производства, необходимо, чтобы на каждом из элементов системы была обеспечена высокая надежность, т.к. надежность всей химико-технологической системы (например, надежности производства NH_3 , ронгалита, фосфора и других) будет являться статистической суммой надежности ее подсистем.

1.1.2. Основные показатели надежности, рекомендации их выбора

Эти показатели могут быть использованы для оценки надежности ХТП и ХТО. Показатели надежности, которые могут быть использованы для оценки надежности ХТП и ХТО, могут быть вероятностными и статистическими. Вероятностные показатели необходимы в аналитических расчетах, статистические показатели – при испытаниях, экспериментальных исследованиях или эксплуатации объекта до его отказа. С ростом числа испытываемых объектов статистические показатели будут сходиться в пределе (по вероятности) к аналогичным вероятностным показателям [9].

Один и тот же объект в зависимости от особенностей и этапов эксплуатации может считаться восстанавливаемым или невосстанавливаемым. Если восстановление работоспособности объекта в случае его отказа по каким-либо причинам признается неосуществимым или нецелесообразным, то такой объект для данной ситуации является невосстанавливаемым.

1. Вероятность безотказной работы объекта в интервале времени от 0 до t_0 :

а) вероятностное определение $P(t_0) = P(O, t_0) = P\{\xi \geq t_0\} = 1 - F_1(t_0)$;

б) статистическое определение $\hat{P}(t_0) = N(t_0) / N(o) = 1 - n(t_0) / N(o)$,

где $F_1(t) = P\{\xi_1 \leq t\}$ - распределение времени до первого отказа,

ξ_1 - случайная наработка объекта до первого отказа;

$n(t)$ - число отказавших объектов к моменту t ;

$N(t)$ - число работоспособных объектов к моменту t ;

$\hat{P}(t_0)$ - отношение числа объектов, безотказно работавших до момента времени t_0 к числу объектов, исправных в начальный момент времени $t = 0$.

2. Вероятность отказа объекта в интервале времени от 0 до t_0 определяется как дополнительная по отношению к вероятности безотказной работы:

$$Q(t_0) = 1 - P(t_0) \text{ и } \hat{Q}(t_0) = 1 - \hat{P}(t_0).$$

3. Плотность распределения отказов.

а) вероятностное определение $f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = \frac{d}{dt} Q(t) = -\frac{d}{dt} P(t)$;

б) статистическое определение:

$$\hat{f}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N(o)\Delta t} = \frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{N(o)\Delta t} = \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N(o)\Delta t}.$$

4. Интенсивность отказов объекта в момент времени t.

а) вероятностное определение: $\lambda(t) = \frac{1}{1 - F(t)} \cdot \frac{d}{dt} F(t) = \frac{f(t)}{P(t)}$;

б) статистическое определение:

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N(t)\Delta t} = \frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{N(t)\Delta t} = \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N(t)\Delta t}.$$

Средняя наработка объекта до отказа.

а) вероятностное определение: $T_1 = M\{\xi_1\} = \int_0^{\infty} x f(x) dx = \int_0^{\infty} x dQ(x) = \int_0^{\infty} P(x) dx$;

б) статистическое определение: $\hat{T}_1 = \frac{1}{N(o)} (\xi_1^{(1)} + \xi_1^{(2)} + \dots, \xi_1^{[N(o)]}) = \frac{1}{N(o)} \sum_{i=1}^{N(o)} \xi_1^{(i)}.$

Выбор вида показателей надежности зависит, в основном, от назначения характеризуемого объекта и следующих рекомендаций:

- 1) общее число показателей должно быть минимальным;
- 2) следует избегать сложных комплексных показателей;
- 3) каждый показатель должен иметь простой физический смысл;
- 4) выбранные показатели должны соответствовать нормам надежности и допускать их задание в количественной форме.

Все приведенные выше показатели надежности действительны как для восстанавливаемых, так и для невосстанавливаемых объектов.

1.1.3. Сетевые методы (СПУ) в вопросах изучения и анализа надежности производства

Наиболее перспективное направление изучения надежности химико-технологических систем – это сочетание статистических, вероятностных методов с глубоким проникновением в физико-химическую и механическую сущность процесса, снижающего (повышающего) надежность и вызывающего (предупреждающего) отказ ХТС.

Согласно системному анализу [10] на II этапе изучения проблемы необходимо выявить все факторы, влияющие на надежность ХТС (случайные факты и детерминированные). Исходя из этого, вытекает деление на два направления при изучении надежности и отказов:

1. определение причин случайных отказов;
2. определение причин и закономерностей детерминированных отказов.

Разработка теории надежности, изучение отдельных ее вопросов, как было сказано ранее, это весьма сложная задача. Поэтому крайне необходимо четкое, достаточно полное и точное отображение взаимосвязей и характеристик работ в процессе выполнения поставленных задач. Это может быть достигнуто, например, путем применения сетевых методов планирования разработок (изучения проблемы).

Сетевое планирование – это один из прогрессивных методов организации работ, дающих четкое представление об объеме и количестве работ, позволяющий выполнить работы в установленные сроки, в целом характеризующий проблему надежности производства. Например, если рассматривать линейную схему производства ронгалита (рис.4), то для решения задачи обеспечения надежности данного производства можно предложить следующую сетевую модель (рис.5).

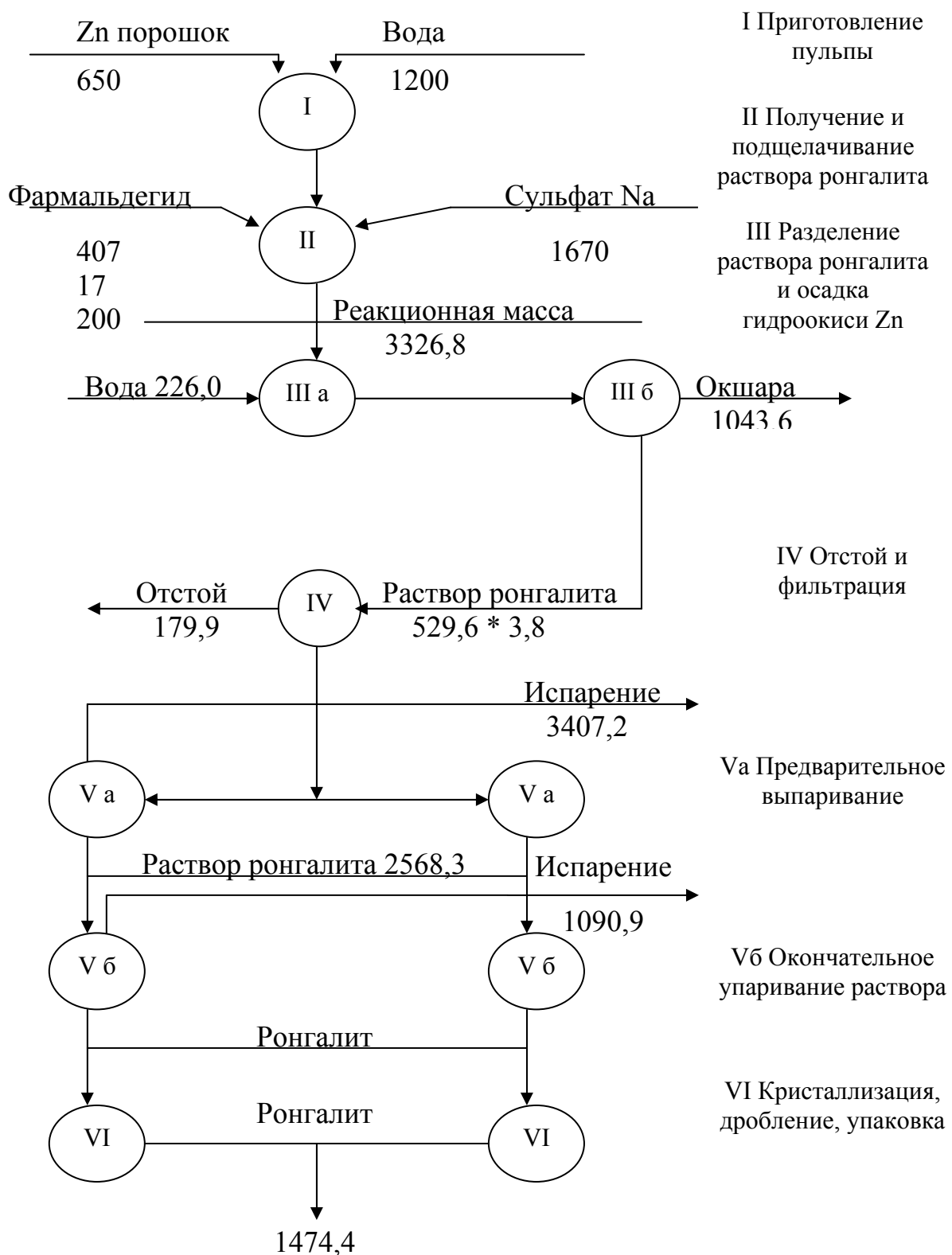


Рис.4. Линейная схема производства ронгалита. Материальный баланс (загрузка в кг.)

Таблица 1

Библиотечный список работ сетевого графика

Номер работы	Наименование работы сетевого графика
0–1	Анализ документации производства ронгалита.
0-2	Предварительное обследование цеха ронгалита.
1-3	Разработка методики изучения вопроса.
3-4	Рассмотрение (изучение и описание) вопросов надежности при эксплуатации.
3-5	-"- при конструировании химико-технологического оборудования (ХТО).
3-6	-"- при изготовлении ХТО.
3-7	-"- при проектировании химико-технологического процесса (ХТП), оборудования, производства (химико-технологической системы).
4-8	Изучение влияния восстановительного ремонта ХТО на его надежность.
4-9	Составление номенклатуры ХТП в производстве ронгалита.
5-10	Разработка новых конструкций, приспособлений, их внедрение в производство ронгалита с целью повышения надежности этого производства.
6-10	Прогнозирование надежности ХТС (ХТО, ХТП).
6-11	Изучение влияния организации ремонта ХТО на надежность ХТС.
7-12	Влияние организации производства ронгалита на надежность ХТС.
7-13	Разработка номенклатуры технико-экономических показателей, характеризующих надежность ХТС.
8-14	Обоснование надежности ХТО цеха ронгалита.
9-15	Обоснование надежности ХТП цеха ронгалита.
10-22	Составление математической модели диагностики надежности ХТС (ХТП, ХТО).
11-22	Разработка документации по повышению надежности при ремонте ХТО.
12-22	Разработка документации по повышению надежности ХТП.
15-16	Изучение надежности ХТП сушки и выпаривания.
15-17	Изучение надежности ХТП кристаллизации.
15-18	Изучение надежности ХТП грануляции.
15-19	Изучение надежности ХТП фильтрации.
15-20	Изучение надежности ХТП измельчения.
16-21	Изучение влияния побочных процессов на надежность ХТП

17-21	Разработка математической модели надежности ХТП с учетом агломерации.
20-21	Разработка и внедрение химактивации ХТП производства ронгалита.
21-22	Разработка алгоритма расчета и программы повышения надежности ХТС, выдача оптимальных режимов работы ХТС.
21-23	Идентификация производства ронгалита.
22-23	Технико-экономическое обоснование повышения надежности ХТС производства ронгалита.

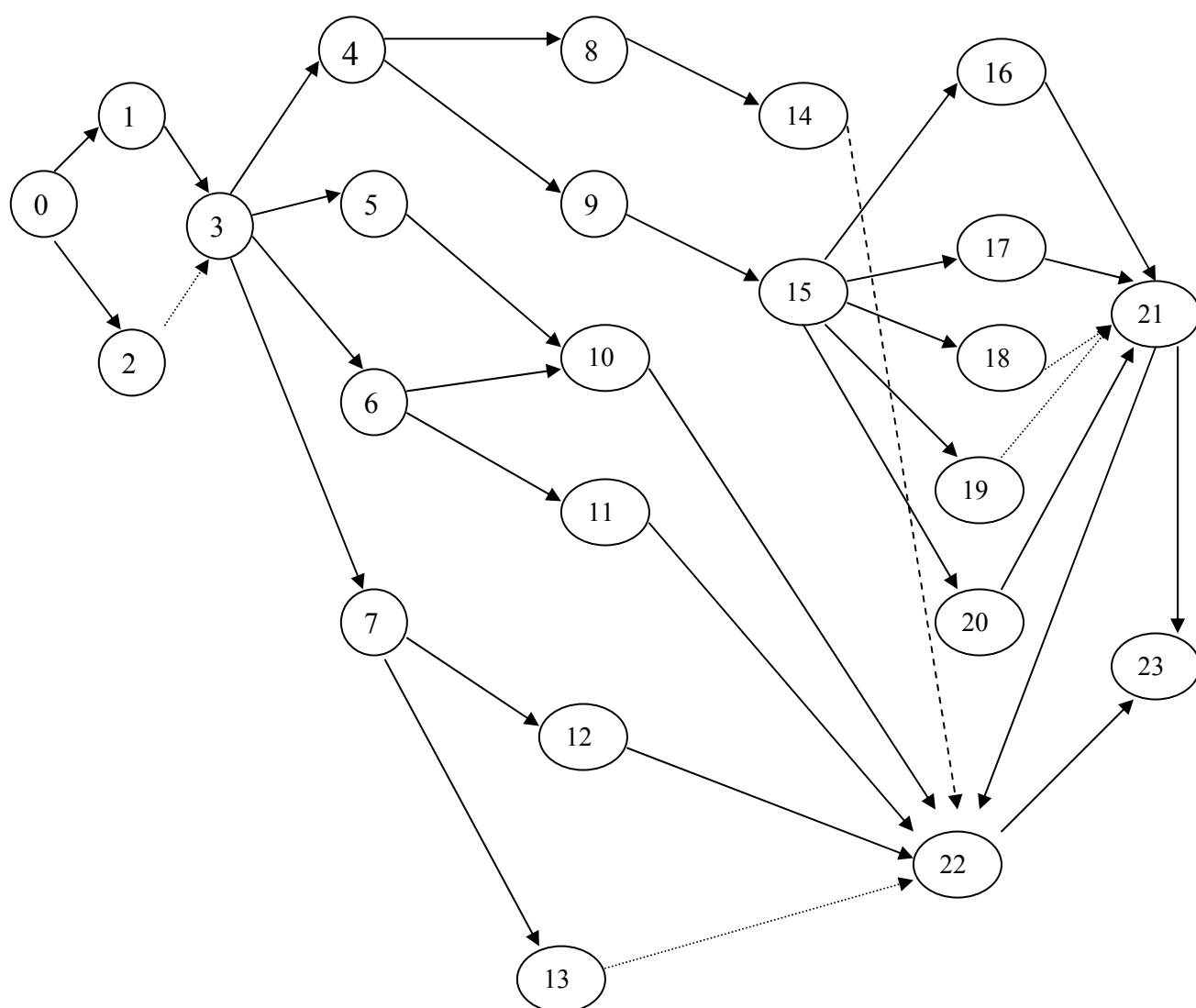


Рис.5. Сетевой график производства ронгалита

Глава II

Математические модели надежности производства

Математика все шире внедряется в химическую практику – математический анализ становится неотъемлемым средством химической науки и техники [11]. Б.В. Гнеденко о роли математического аппарата сказал следующее: «Математика неотделима от проблем теории надежности. Точные количественные методы необходимы при расчете надежности сложных систем, при испытаниях на надежность, при проверке гипотез о характере потери изделиями их надежности. Без глубокого математического анализа невозможно прогнозировать надежность изделия при длительной эксплуатации. Более того, само определение надежности и выделение показателей надежности нуждаются в математических средствах. Одними описательными и экспериментальными средствами нельзя обойтись при постановке и решении многочисленных и разнообразных по своему характеру задач теории и практики надежности» [12, т. II].

Представление любой информации в виде математической модели должно преследовать цель использовать этот материал как руководство для применения этой информации на практике. Предлагаемые в данной книге математические модели не могут претендовать на исчерпывающий охват всех разделов в теории надежности. Это попытка удовлетворить интерес применения простейших (простых) математических моделей надежности производства (ХТС).

II.1. Марковские процессы в описании надежности химико-технологических систем

В настоящее время научные и технические области весьма широко используют методы теории вероятностей и математической статистики. В любом производстве имеет место многообразие повторяющихся технологических операций, процессов, трудовых действий человека и т.д. в неизменных и изменяющихся условиях. Чтобы обеспечить надежность функционирования такой сложной системы, надо прежде всего с той или иной степенью полноты охарактеризовать эту систему. Описание такой системы с учетом факторов, оказывающих влияние на стабильность ее работы, может быть дано именно с применением теории вероятностей, которая является наиболее достоверным математическим методом при исследовании процессов, зависящих от воздействия случайных факторов. Теория случайных процессов [13] изучает закономерности изменения случайных величин X в зависимости от изменения неслучайного параметра, например, времени, пространственной координаты и т.д.

Всем известно, что цель создания промышленного производства (объект нашего внимания) – производить необходимую продукцию и чем дольше будет

действовать такой объект, тем больший результат будет получен. Итак, все изменения или стабильное состояние, имеющие место в данном производстве прежде всего будут зависеть от такого параметра, как время надежной работы производства (t).

В зависимости от того, непрерывное или дискретное множество значений принимает случайная величина $X(t)$ и ее параметр t , различают [14] шесть основных видов случайных процессов: 1 - дискретная случайная последовательность (дискретный процесс с дискретным временем); 2 - непрерывная случайная последовательность (непрерывный процесс с дискретным временем); 3 - дискретный (разрывный) случайный процесс (дискретный процесс с непрерывным временем); 4 - непрерывный случайный процесс (траектории процесса не имеют больших вертикальных скачков, время изменяется непрерывно); 5 - дискретно-непрерывный процесс; 6 - сложный (смешанный) случайный процесс.

В соответствии с рассмотренной классификацией в теории вероятностей различают следующие виды случайных марковских процессов [14]:

- 1) марковские цепи;
- 2) марковские последовательности;
- 3) марковские процессы с конечным и бесконечным числом состояний;
- 4) дискретно-непрерывные и смешанные марковские процессы.

Теория случайных процессов [12, том II] по своему существу тесно связана с процессами потери надежности процессов и технических средств. Процессы изнашивания и процессы старения должны рассматриваться как случайные процессы, каждый из них имеет свои индивидуальные особенности. Поэтому при разработке математических моделей такого рода процессов необходимо создавать новые подходы и методы, учитывающие эти особенности.

Теория случайных процессов и ее приложения представляют большой интерес для решения многих важнейших задач в технике. Как было сказано выше, в этой теории изучаются закономерности изменения случайных величин в зависимости от изменения неслучайного параметра, например, времени, пространственной координаты и т.д. [13, 15]. Случайные процессы (случайные функции) имеют место в производстве (пульсации входных потоков массы сырья, полуфабрикатов, возникновение отказов в работе какой-либо машины, аппарата); в системах массового обслуживания (СМО).

С весьма значительной степенью достоверности можно считать надежность химико-технологических производств такой системой, которая состоит из ряда подсистем X , в каждой из которых происходят случайные процессы. Система X с течением времени может под влиянием случайных факторов переходить из одного состояния в другое состояние. Уточняя сказанное, следует считать КСУОНП, состоящей из суммы подсистем X с дискретным состоянием, т.к. каждая подсистема X имеет счетное (конечное) множество возможных состояний $x_1, x_2, \dots, x_n$, и переход из одного состояния в

другое осуществляется скачком. Возможные состояния подсистемы X изображаются [11] с помощью графа состояний (рис. 6а, 6б), на котором состояния системы изображены прямоугольником, а возможные переходы системы из состояния в состояние – стрелками, соединяющими соответствующие прямоугольники.

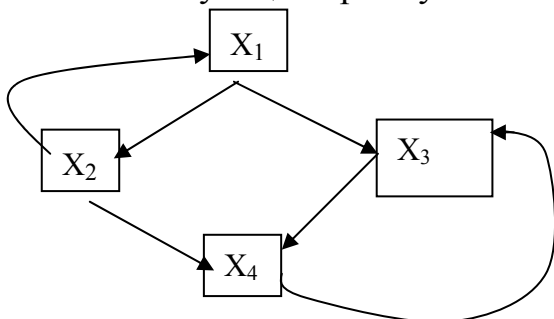


Рис.6а. Граф состояний подсистем с переходами

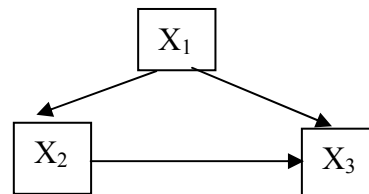


Рис.6б. Граф состояний подсистем без выхода

На рис.6а показан граф состояний системы, имеющей 4 возможных состояния: x_1, x_2, x_3, x_4 и переходы состояния x_1 в x_2 и в x_3 , x_2 в x_1 и в x_4 и обратно.

На рис.6б изображено состояние x_3 , которое не имеет выхода, т.к. «состояние без выхода».

Все изложенное выше не противоречит содержанию схемы КСУОНП, изображенной на рис.24 в главе V. Комплексная система обеспечения и управления надежностью производства (КСУОНП) состоит из суммы подсистем: управления надежностью конструкций машин и аппаратов, трубопроводов, арматуры; управления надежностью процессов; управления надежностью организации производства, планирования на производстве, учета в производстве. Как было сказано выше, состояний каждой подсистемы X может быть множество, т.е. $x_1, x_2, \dots, x_n$ и переход из одного состояния в другое может осуществляться скачком. Например, появление отказа в работе оборудования, процесса, в работе того или иного подразделения в сфере заводоуправления. Все это можно рассматривать как переход из состояния x_1 в состояние x_2 , и не всегда имеет место обратный переход, т.е. переход из состояния x_2 в x_1 .

Таким образом, комплексная система обеспечения и управления надежностью производства представляет собой сумму подсистем X с дискретными состояниями.

В подсистемах X комплексной системы обеспечения и управления надежностью (рис.24) могут протекать случайные процессы с дискретным временем, если переходы системы из состояния в состояние возможны только в определенные моменты времени $t_1, t_2, \dots$, и случайные процессы с непрерывным временем, если переходы возможны в любой момент времени. Значительную

часть процессов перехода подсистем X следует отнести к марковским, поскольку все вероятностные характеристики процесса в будущем зависят от состояния этого процесса в данный (настоящий) момент времени.

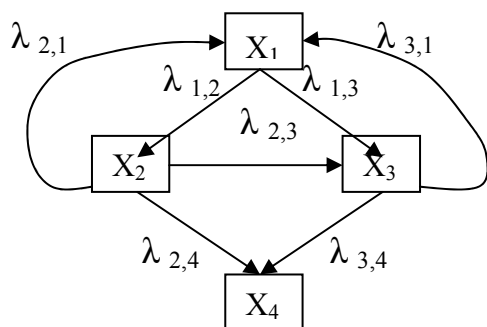
Итак, в качестве основного, определяющего математического метода для изучения, исследования и описания надежности производства следует использовать теорию вероятностей и, в частности, марковские процессы.

Для описания случайного процесса, протекающего в подсистеме X с дискретными состояниями $x_1, x_2, \dots, x_n$ часто пользуются вероятностями состояний $p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)$, где $p_k(t)$ – вероятность того, что в момент t система находится в состоянии x_k , $k = 1, 2, 3, \dots, n$. Вероятности $p_k(t)$ удовлетворяют условию

$$\sum_{k=1}^n p_k(t) = 1. \quad (\text{II} - 1)$$

Если процесс, протекающий в системе с дискретными состояниями и непрерывным временем, является марковским, то для вероятностей состояний $p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)$ можно составить систему линейных дифференциальных уравнений. Комплексная система управления и обеспечения надежности производства должна контролировать и обеспечивать надежность работы всего производства, начиная со всех звеньев заводоуправления и кончая всеми производственными участками как основного производства, так и вспомогательных (обслуживающих) подразделений предприятия.

Поэтому для обоснования надежности такой системы удобней всего пользоваться размеченным графом состояний, на котором против каждой стрелки, ведущей из состояния в состояние, следует проставлять интенсивность (плотность) λ_{ij} потока событий, переводящую систему x_i в состояние x_j . Система (II - 2) дифференциальных уравнений для описания данного процесса состоит из такого количества уравнений, сколько состояний системы предусмотрено графом [11]. Например, для описания процесса восстановления (ремонта) отказавшей машины можно предложить следующий граф (рис.6в) перехода состояния отказа x_1 (нерабочее состояние машины) в надежное состояние x_4 (восстановительный ремонт произведен, машина вновь надежно функционирует).



x_2 – характеристика (состояние)
готовности документации на ремонт
машины;
 x_3 – характеристика (состояние)
готовности материальных средств
на ремонт машины.

Рис. 6в. Граф подсистемы ремонта машины

Итак, система дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_1(t)}{dt} &= \lambda_{2,1}p_2(t) + \lambda_{3,1}p_3(t) - (\lambda_{1,2} + \lambda_{1,3})p_1(t) \\ \frac{dp_2(t)}{dt} &= \lambda_{1,2}p_1(t) - (\lambda_{2,1} + \lambda_{2,3} + \lambda_{2,4})p_2(t) \\ \frac{dp_3(t)}{dt} &= \lambda_{1,3}p_1(t) + \lambda_{2,3}p_2(t) - (\lambda_{3,1} + \lambda_{3,4})p_3(t) \\ \frac{dp_4(t)}{dt} &= \lambda_{2,4}p_2(t) + \lambda_{3,4}p_3(t) \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.2})$$

Учитывая условие (1), можно уменьшить число уравнений системы (II.2) на одно, т.к. при любом t :

$$p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) + p_4(t) = 1.$$

Комплексную систему управления и обеспечения надежности производства можно рассматривать как разновидность системы массового обслуживания (СМО). Системой массового обслуживания (СМО) называется, как известно, любая система, предназначенная для обслуживания какого-либо потока заявок. КСУОНП следует относить к «чистой системе массового обслуживания с ожиданием» [11].

Для «чистой системы с ожиданием» ($m = \infty$) предельные вероятности выражаются формулами:

$$p_k = \frac{\frac{\alpha^k}{k!}}{\sum_{k=0}^n \frac{\lambda^k}{k!} + \frac{\alpha^{n+1}}{n \cdot n!(1 - \frac{\alpha}{n})}} \quad (k = 0, 1, \dots, n),$$

$$P_{n=s} = \frac{\frac{\alpha^n}{n!} (\frac{\alpha}{n})^s}{\sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^{n+1}}{n \cdot n!(1 - \frac{\alpha}{n})}} \quad (S=1, 2, \dots),$$

где

n – число каналов обслуживания (возможности ликвидации отказов машины);

m – число мест в очереди (число отказов машины);

λ – плотность потока заявок (отказов машины);

μ – плотность «потока обслуживаний» одного « n »;

$$\alpha = \frac{\lambda}{\mu},$$

$\frac{\alpha}{n} < 1$ – условие существования предельного режима для чистой системы с ожиданием.

Предельным режимом для системы X называется [11] случайный процесс, устанавливающийся в системе при $t \rightarrow \infty$.

Все потоки событий, переводящие систему из состояния в состояние, в зависимости от тех или иных условий, хорошо изученных характеристик этих потоков, принято разделять на потоки Пальма, Эрланга, регулярный поток, нестационарный пуассоновский поток и др.

Такие характеристики, как плотность распределения $f_k(t)$, функция распределения $F_k(t)$ для закона Эрланга любого порядка, можно вычислять, пользуясь таблицами пуассоновского распределения:

$$P(k, a) = \frac{a^k}{k!} e^{-a} \quad , \text{ а в свою очередь}$$

$$f_k(t) = \lambda P(k, \lambda t) \quad (t > 0)$$

$$F_k(t) = 1 - R(k, \lambda t), \quad \text{где}$$

$$R(k, \lambda t) = \sum_{s=0}^k \frac{(\lambda t)^s}{s!} e^{-\lambda t} \quad - \text{табулированная функция}$$

Функцию $P(k, a)$ можно вычислять по тем же таблицам $R(k, a)$, т.к. между функциями $P(k, a)$ и $R(k, a)$ существует соотношение:

$$\frac{\partial}{\partial a} R(k, a) = -P(k, a), \quad \text{и} \quad \text{предельные значения которых}$$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} R(k, a) = 1, \quad \lim_{k \rightarrow \infty} P(k, a) = 0$$

Итак, решая, например, задачу определения вероятности состояний системы и ее характеристик при обеспечении ремонта машин, имеющих отказы, прежде всего составляется размеченный граф состояний системы, затем определяется вид потока событий и составляется система дифференциальных уравнений. Для поставленной задачи система дифференциальных уравнений [11] имеет вид:

$$p_k = \frac{B(m, k, p)}{\tilde{B}(m, n, p) + \frac{P(n, n)R(m-n-1, x)}{P(o, n)P(m, x)} q^m} \quad (0 \leq k \leq n),$$

$$p_{n+s} = \frac{P(n, n) P(m-(n+s), \chi)}{\frac{\tilde{B}(m, n, p) P(O, p) P(m, \chi)}{q^m} + P(n, n) R(m-n-1, \chi)} \quad (1 \leq s \leq m-n),$$

$$\text{где} \quad B(m, k, p) = C_{m-k}^k p^k q$$

$$\tilde{B}(m, k, p) = \sum_{\ell=0}^k C_m^\ell p^\ell q^{m-\ell}$$

– функции, связанные с биномиальным распределением;

$$p = \frac{\alpha}{1+\alpha}; \quad q = 1-p; \quad \alpha = \frac{\lambda}{\mu}; \quad \chi = \frac{n \mu}{\lambda}.$$

Исходя из этих уравнений, среднее число отказов машины, находящейся в ремонте:

$$\bar{k} = \sum_{k=0}^n k p_k + n \sum_{s=1}^{m-n} p_{n+s} = \frac{p_0}{q_m} \sum_{k=0}^n k B(m, k, p) + \frac{n p_0 P(n, n)}{P(o, n) P(m, \chi)} \sum_{s=1}^{m-n} P(m - (n + s), \chi) = \frac{p_0}{q_m} \sum_{k=1}^n k B(m, k, p) + \frac{n p_0 P(n, n) R(m - n - 1, \chi)}{P(O, n) P(m, \chi)}, \text{ где } p_0 = \frac{q^m}{\tilde{B}(m, n, p) + \frac{P(n, n) R(m - n - 1, \chi)}{P(O, n) P(m, \chi)}} q^m,$$

p_0 - вероятность того, что ремонтный цех способен приступить к ремонту машины.

Среднее число отказов (неисправностей, поломок, которое следует устранить):

$$\bar{s} = \sum_{s=1}^{m-n} s p_{n+s} = \frac{P(n, n) p_0}{P(O, n) P(m, \chi)} \sum_{s=1}^{m-n} s P(m - (n + s), \chi) = \frac{P(n, n) p_0}{P(O, n) P(m, \chi)} [(m - n) R(m - n, \chi) - \chi R(m - n - 1, \chi)]$$

Определение среднего времени простоя машины в ремонте $\bar{t}_{np}$ осуществляется через вероятность простоя:

$$P_{np} = \frac{\bar{s} + \bar{k}}{m}, \quad P_{np} = \frac{\bar{t}_{np}}{\bar{t}_{np} + \bar{t}_p},$$

где $\bar{t}_p = \frac{1}{\lambda}$ - среднее время пребывания в ремонте,

$$\text{тогда } \bar{t}_{np} = \frac{1}{\lambda} \frac{P_{np}}{1 - P_{np}} \quad (\text{П.3})$$

Среднее время простоя очередной машины в ожидании ремонта:

$$t_{np}^{ож} = \frac{1}{\mu} \frac{1 - \frac{\bar{k}}{n}}{\frac{\bar{k}}{n}}.$$

Согласно рассмотренному выше, теория марковских процессов позволяет записать систему дифференциальных уравнений, характеризующих состояние КСУОНП в i -й момент времени:

$$\frac{dp_1(t)}{dt} = \lambda_{2,1} p_2(t) + \lambda_{3,1} p_3(t) - (\lambda_{1,2} + \lambda_{1,3}) p_1(t)$$

.....

$$\frac{dp_j(t)}{dt} = \lambda_{i,j} p_i(t) + \lambda_{i-1,j} \cdot p_{i-1}(t), \text{ где}$$

$p_i(t)$ - вероятность состояния x_i подсистемы,

$\lambda_{i,j}$ - интенсивность (плотность) потока событий, переводящих систему из состояния x_i в состояние x_j .

Применение теории марковских процессов дает широкие возможности для весьма точного описания и расчета характеристик (показателей) случайных процессов, к которым относятся в большинстве случаев отказы в работе такой комплексной системы, как промышленное производство.

II. 2. Основные принципы разработки модели надежности химико-технологических процессов

II.2.1. Виды химико-технологических процессов, основы моделирования надежности ХТП

Анализ и расчет процессов химической технологии являются исходным звеном в управлении ими, обеспечении их надежности и эффективности. Базой для систематизации новейших методов, используемых в химии и химической технологии, служит кибернетика, «основным методом которой является математическое моделирование изучаемых систем»[16].

Кафаров В.В., Перов В.Л. Мешалкин В.П. [7] впервые сделали попытку систематизировать методы моделирования, анализа и оптимизации химических производств на основе использования топологических моделей и цифровых вычислительных машин. Создание новых высокоинтенсивных технологических процессов требует решения новых научно-технических задач, например, обеспечение работы химических производств в оптимальном режиме; надежности функционирования ХТС (ХТО, ХТП) и др. Для этого надо, впервые указывают авторы [7], создать научно-обоснованную теорию анализа и синтеза химико-технологической системы (ХТС).

Работа любой ХТС должна обеспечиваться функциональной связью химико-технологических процессов (ХТП) и химико-технологического оборудования (ХТО), являющихся ее составными частями (элементами). Для успешного решения таких задач следует разработать, например, математическую модель надежности технологического процесса, которая должна отражать не только технологические связи между элементами и сущность ХТП, но и критерии (показатели, параметры) ненадежности (надежности) ведения процесса, как бы его «узкие места».

В предлагаемой книге сделана попытка (гл. III) рассмотреть принципы расчета и обеспечения надежности процессов с помощью математических моделей следующих ХТП:

- 1) механические процессы (измельчение, классификация);
- 2) гидромеханические процессы (фильтрация);
- 3) тепловые процессы (кристаллизация, грануляция, агломерация, обжиг);
- 4) массообменные процессы (сушка).

Сущность математического моделирования излагается В.В. Кафаровым [16] и предполагает три этапа:

- 1) формализация изучаемого процесса (составление математического описания его модели);
- 2) создание алгоритма, моделирующего процесс;
- 3) установление адекватности модели процесса.

Математические модели позволяют исследовать различные варианты состояния (ведения) процессов, изучить особенности ХТП и определить возможности обеспечения его надежного осуществления (выполнения).

II.2.2. Интенсивные ХТП, показатели надежности интенсивных ХТП.

Ускорение НТП выдвинуло еще одно жизненно необходимое требование производства – интенсификацию технологических процессов и обеспечение надежности их работы.

Наиболее перспективными в технологическом и экономическом отношениях, с возможным аппаратным оформлением, являются следующие известные способы интенсификации технологических процессов.

1. Кинетическая интенсификация, т.е. увеличение скоростей процесса до максимально возможного предела.
2. Балансовая интенсификация, т.е. максимальный тепломассообмен, нагрев, давление и т.д.
3. Химическая интенсификация, т.е. использование различных химических добавок, применение катализаторов и т.д.

Примером кинетической интенсификации могут служить процессы, которые осуществляются в подвижной среде (псевдооживленное состояние, сквозной поток, вибровзвешенный слой и т.д.) или с помощью специальных способов и оборудования (механоактивация).

Все высокоскоростные, интенсивные процессы работают на грани предельной устойчивости, т.е. в их работе гораздо чаще могут быть срывы, отказы, чем при обычном ведении процесса. Примером этого может служить второй способ интенсификации, когда при обеспечении максимального потребления тепла обеспечивают возрастание скоростей химических реакций, так как известно, что локальные перегревы интенсифицируют процесс. Но при этом возникают трудности в обеспечении однородности температурных полей. Если стремиться к однородности последних, то можно снизить интенсивность химико-технологического процесса /ХТП/. И здесь возникает своего рода технологический тупик. Поэтому изучение технологических причин формирования температурных полей, в приведенном примере, приобретает важное значение для осуществления надежного интенсивного ХТП.

Из сказанного ясно, что первоочередной задачей обеспечения надежности интенсивного технологического процесса с экономически оправданными затратами по ликвидации отказов является прогнозирование ведения такого процесса. Инженерное прогнозирование базируется на получении научно обоснованной информации, отражающей в вероятностной и детерминированной постановке потенциально возможное осуществление технологического процесса без срывов и отказов.

Задача прогнозирования надежности технологического процесса или какого-либо оборудования сводится, в основном, к предсказанию вероятности

безотказной работы объекта в зависимости от возможных режимов и условий эксплуатации, которые предусматриваются при прогнозировании оборудования или разработке технологического процесса, при изготовлении оборудования или освоении технологического процесса.

Изучавшиеся интенсивные процессы были выбраны по следующим принципам:

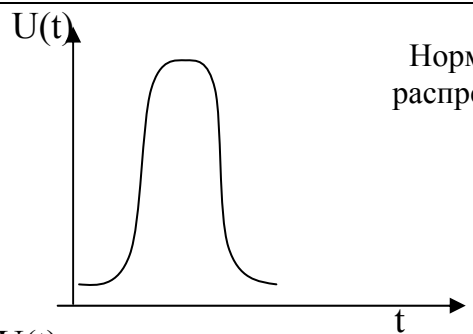
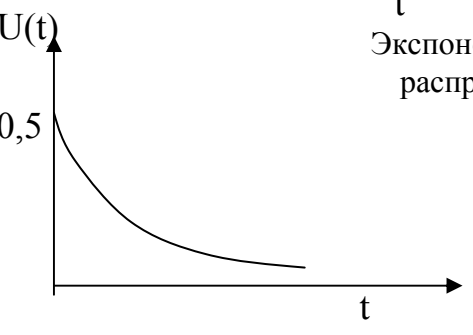
- 1) производственная значимость процесса;
- 2) технологические особенности (прерывный или непрерывный, машинный или аппаратный и т.д.);
- 3) в зависимости от способов интенсификации;
- 4) в зависимости от закономерностей процессов (механические, гидромеханические, тепловые, массообменные).

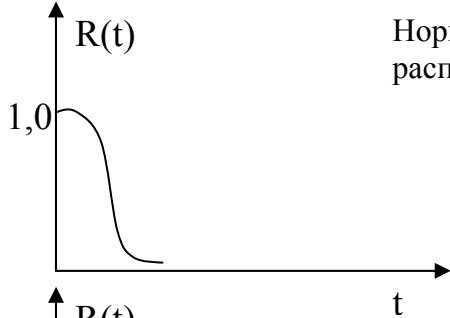
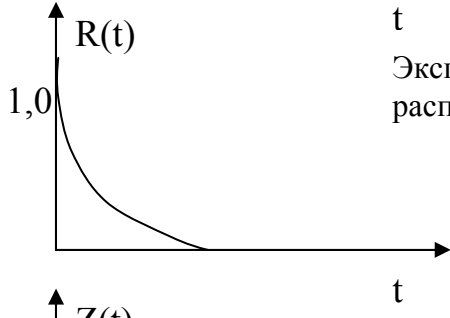
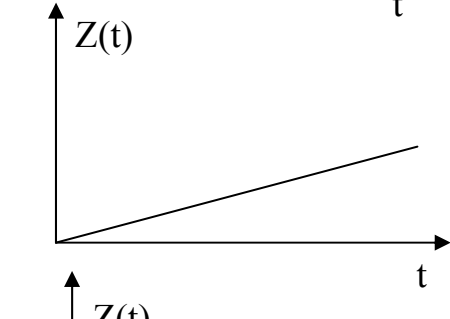
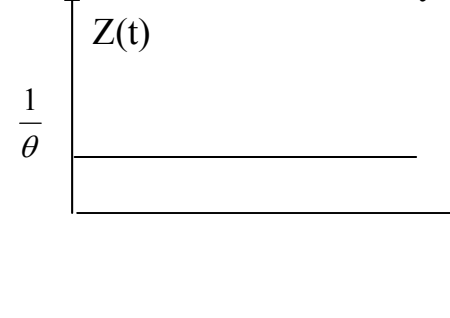
Вклад каждого процесса, протекающего в аппарате или машине, в надежную их работу может быть оценен с помощью разработанной нами таблицы 2 показателей надежности интенсивных процессов.

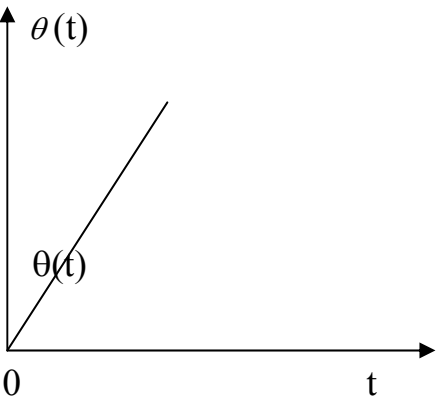
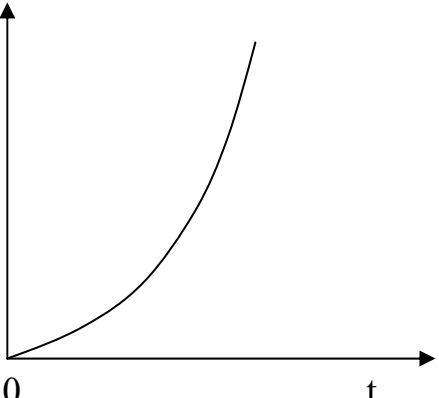
Расчеты надежности процесса и оборудования, основанные на предварительном изучении причин и их закономерностей, вызывающих отказы, являются таким источником информации о будущем поведении процесса или оборудования, который по своим возможностям позволяет обеспечить надежность объекта на всех стадиях его существования (разработка, изготовление, освоение, эксплуатация)

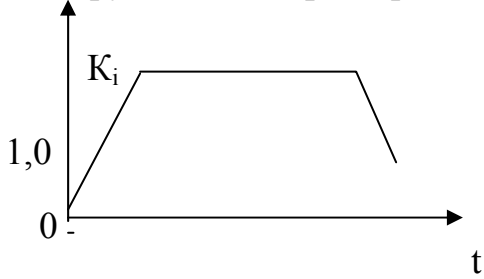
Таблица 2

Показатели, характеризующие надежность интенсивных химико-технологических процессов и оборудования

Шифр, № п/п	Характери- стика показателя	Наименова- ние показателя	Математи- ческое выражение показателя	Графическое выражение показателя	Шкала мак- симальной значимости
I-I	Вероятностный показатель	Функция надежности (опасности) вероятность отказа	$U(t) = \int_{\infty}^t U(t)$	 Нормальное распределение	0,9
				 Экспоненциальное распределение	0,5

I-2	Вероятностный показатель	Функция надежности (вероятность безотказности)	$R(t) = \int_t^\infty U(t)$	 Нормальное распределение  Экспоненциальное распределение	0,9
I-3	Вероятностный показатель	Коэффициент риска	$Z(t) = \frac{U(t)}{R(t)}$	 	0,5 0,5

I-4	Вероятностный показатель долговечности	Средний срок службы	$\theta(t) = \sum_0^t \bar{t}$	 Graph showing a linear relationship between $\theta(t)$ and t, starting from the origin (0,0).	0,5
I-5	Вероятностный показатель долговечности	Среднее время между отказами	$\theta_o, R(t) = e^{t/\theta}$	 Graph showing an exponential curve between $\theta_o, R(t)$ and t, starting from the origin (0,0).	$0 \div 1,0$
I-6	Вероятностный показатель ремонтно-пригодности (для оборудования), технологической восстановимости (для процесса)	Среднее время восстановления	$m(t_{\epsilon}) = m_{t_{\epsilon}}(t_{\epsilon i})$	Форма кривой зависит от конструктивных и организационных факторов	$0 \div 0,1$ 1,0

II-1	Статистический показатель	Коэффициент экстенсивности оборудования	$K_{\varepsilon} = \frac{(t_i - t_{\varepsilon})n_{\phi}}{t_i \cdot n}$	Форма кривой зависит от условий эксплуатации	
II-2	Статистический показатель	Коэффициент интенсивности оборудования	$K_U = \frac{Q_{\phi}}{Q_T}$	Форма кривой зависит от конструктивных факторов	1,0
II-3	Статистический показатель	Коэффициент интенсивности процесса	$K_i = K_i(t_i)$		1,0
III-1	Наличие детерминированного побочного процесса (ПП)	Скорость ПП, снижающего надежность основного ХТП	$\lambda = \frac{dx}{dt}$	Форма кривой зависит от закономерностей ПП	0÷1
III-2	-"-	Мощность ПП	$M = \frac{dx}{dV}$	-"-	0÷1
III-3	-"-	Интенсивность ПП (ускорение)	$\mu = \lambda M$	-"-	0÷1

II.3. Математические модели надежности химико-технологического оборудования

II.3.1. Экономические проблемы и эффективность повышения надежности ХТО

Проблема надежности является одной из основных проблем машиностроения и приборостроения. Решение этой проблемы – огромный резерв повышения эффективности производства, производительности общественного труда. Ненадежная машина не сможет эффективно функционировать, т.к. каждая ее остановка из-за повреждения отдельных элементов или снижения технических характеристик ниже допустимого уровня, как правило, влечет за собой большие материальные убытки, а в отдельных случаях может иметь катастрофические последствия.

Большой опыт проектирования и эксплуатации разнообразного оборудования в химической промышленности показывает, что при выборе имеющегося и, в особенности, при проектировании и создании нового оборудования, к нему должны предъявляться следующие требования или критерии оценки:

- 1) Конструктивное совершенство оборудования;
- 2) Механическая надежность;
- 3) Эксплуатационные достоинства;
- 4) Технологическая устойчивость (надежность) оборудования.

Под требованием конструктивного совершенства понимаются следующие критерии оценки машин и аппаратов: высокий коэффициент полезного действия процесса; низкие удельные затраты энергии в кВт/тонну или кДж/кг; высокая удельная производительность в тоннах продукции/тонне веса оборудования; или в тонн продукции / м³ рабочей поверхности; максимальная простота конструкции; технологичность в изготовлении; использование недефицитных конструкторских материалов. Первым критерием оценки любого оборудования является коэффициент полезного действия протекающего в нем процесса. И чем выше КПД, тем совершеннее оборудование. Но наряду с этим требованием должны параллельно выполняться и последующие требования конструктивного совершенства; низкие удельные затраты энергии и т.д. Следствием требования – высокая удельная производительность – являются малые габариты оборудования и малый его вес, что напрямую связано с его стоимостью, так как чем ниже металлоемкость оборудования, тем пропорционально меньше его стоимость.

В то же время необходимо отметить, что малые габариты при большой производительности приводят автоматически к большим скоростям движения перерабатываемых потоков, и это обстоятельно должно учитываться при выполнении требования механической надежности для обеспечения расчетной

долговечности нагруженных узлов оборудования с учетом коррозионного и абразивного износов.

Требование максимальной простоты конструкции, как правило, противоречит требованию высокого КПД процесса, так как в очень простой конструкции достаточно сложно иметь высокий к.п.д. процесса. В то же время достижение высокого КПД процесса возможно в сравнительно простой конструкции в тех случаях, когда исследователь или конструктор абсолютно грамотно реализуют нужную гидродинамику процесса в микро- и макрообъемах.

Опыт эксплуатации различных машин и аппаратов малой и большой производительности (до 150-200 тонн/ч) показал, что в различных отраслях промышленности наибольшее применение нашло оборудование сравнительно простых конструкций, так как в таком оборудовании наиболее надежно выполняются последующие требования механической надежности, его проще эксплуатировать, оно технологически устойчиво и не так дорого в изготовлении.

Требования технологичности в изготовлении и использовании недефицитных конструкционных материалов напрямую связано со стоимостью оборудования. Технологичность в изготовлении – это, в первую очередь, возможность изготовления основных узлов оборудования без использования дорогих вспомогательных приспособлений, наличие которых при малых сериях единиц оборудования (что наиболее типично для химической промышленности, исключая насосы, теплообменники и аппараты с мешалками) резко его удорожает. Например, на заводах химического машиностроения России было отмечено, что при мелкосерийном производстве литые металлические узлы и детали много дороже аналогичных сварных узлов, так как требуют производства специальных форм. Требование – использование недефицитных и дешевых конструкционных материалов – является противоречивым требованием механической надежности оборудования с обязательным учетом необходимой долговечности основных узлов и деталей, особенно при больших производительностях, когда час незапланированного простоя оборудования (в случае отсутствия «горячего» резерва оборудования) приводит к большим экономическим потерям производства.

Требование механической надежности включает в себя 5 критериев: прочность, жесткость, устойчивость, герметичность и долговечность. Первые три критерия при расчете механической надежности оборудования относят к «механическим» расчетам, так в ряде оборудования главным является обеспечение прочности и в задачу расчета входит определение нагруженного узла и обеспечение условия $\sigma_{max} \leq [\sigma]$. В ряде единиц или узлов оборудования главным является обеспечение необходимой жесткости рабочего узла. Например, в консольной роторной машине при малых зазорах между ротором и статором определяющим является не прочность вала, а его жесткость, т.е. прогиб конца вала. Все металлорежущие станки для

обеспечения высокой точности обработки деталей металлорежущим инструментом должны иметь высокую жесткость станин и узлов, в которых закреплены инструменты.

Аппараты, работающие под вакуумом, рассчитываются на устойчивость, а прочность получаемой стенки только проверяется.

При переработке вредных, пожаро- и взрывоопасных веществ под давлением чрезвычайно важным требованием является герметичность оборудования.

Все оборудование по возрастающей сложности герметизации можно разделить на 3 группы:

1. Герметизация разъемных, неподвижных соединений (крышки, днища, фланцы).
2. Герметизация узлов: корпус – шток или поршень.
3. Герметизация узлов: корпус – вращающийся вал.

Наиболее просто решается задача герметизации разъемных неподвижных соединений с помощью подобранных прокладок, начиная от обычного картона и заканчивая металлическими прокладками.

Сложнее уплотнять штоки и поршни, так как при поступательном движении при контактных уплотнениях появляются силы трения и, соответственно, износ уплотнительных элементов.

Самым сложным является решение задачи $Q_{\text{утечки}} = 0$ при уплотнении зазора между валом и корпусом машины в связи с наличием у любой машины биения вала вследствие появления динамической силы из-за имеющегося эксцентриситета (смещение центра тяжести масс относительно оси вращения).

$$C_{\text{дин}} = m_{\text{рот}} \omega_p^2 e_{\text{дин}},$$

где $m_{\text{рот}}$ – масса мотора; ω_p – угловая скорость вращения ротора; $e_{\text{дин}}$ –

динамический эксцентриситет:
$$e_{\text{дин}} = \frac{e_{\text{стат}}}{1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega_c}\right)^2},$$

$e_{\text{стат}}$ – статистический эксцентриситет; ω_c – собственная частота вращения вала.

Наличие такой динамической силы, которая, например, в центрифугах достигает нескольких сот тонн вследствие неравномерного распределения осадка по окружности ротора, приводит к большим биениям валов и к тяжелым условиям работы контактных уплотнений.

Требование долговечности конструкции должно выполняться с учетом всех нагрузок, коррозионной и абразивной стойкости контактирующих со средой узлов и деталей оборудования. Поэтому вопросу долговечности нагруженных узлов оборудования, а также вопросам быстрой замены, например, быстроизнашивающихся узлов машин и аппаратов (при невозможности

организации надежной защиты от износа) должно уделяться проектировщиками серьезное внимание.

Эксплуатационные достоинства оборудования включают в себя следующие основные требования: быстрота и легкость разборки и сборки, простота ремонта, простота, легкость и безопасность обслуживания, отсутствие недопустимых шумов и вибрации.

Простота, легкость и безопасность обслуживания предполагает, что оборудование будет работать в автоматическом режиме и выполнение этого требования не только облегчает работу обслуживающего персонала, но также и позволяет частично выполнить требование конструктивного совершенства – высокой удельной производительности.

Требование – отсутствие недопустимых шумов и вибрации в случае невыполнения его связано с большими капитальными затратами, так как известно, что правила техники безопасности требуют, чтобы оборудование, имеющее шум с частотой более 85 дцб, должно работать в отдельном от основного производства помещении, что резко повышает начальные капитальные затраты.

В оборудовании, в котором в процессе эксплуатации возникают вибрации вследствие появления больших динамических сил (например, в центрифугах), должны быть предусмотрены конструктивные мероприятия для компенсации напряжений от динамических сил. Динамические силы вызывают большие напряжения в валах центрифуг вследствие появления изгибающих моментов. Компенсацию изгибающих моментов от динамических сил обычно осуществляют путем развития больших гироскопических моментов, действие которых направлено навстречу изгибающим моментам от динамических сил. Конструктивное развитие гироскопических моментов не только резко снижает вибрацию оборудования, но также и в десятки, и иногда и в сотни раз уменьшает максимальные напряжения во вращающихся валах, что позволяет существенно уменьшить их диаметры и, соответственно, затраты металла на их изготовление и повысить долговечность машин.

Требование технологической устойчивости оборудования связано с поддержанием достаточно высокого КПД процесса при изменении входных параметров (производительности, температуры и т.д.) в определенных пределах. Данное требование должно выполняться строго, так как, к сожалению, существует оборудование, имеющее очень высокий КПД процесса (по рекламе), который поддерживается только в очень узком диапазоне колебания параметров, обеспечить который не удастся даже при использовании новейших современных систем автоматики. Поэтому при эксплуатации такого оборудования средний КПД процесса может оказаться значительно ниже того оборудования, у которого максимальный КПД ниже, но поддерживается на высоком уровне при широком диапазоне колебания входных параметров.

Для того, чтобы оборудование было действительно энерго- и ресурсосберегающее, необходимо соблюдение всех вышеупомянутых

требований и проведение локальной оптимизации взаимозависимых требований.

Большой опыт проектирования и эксплуатации оборудования показывает, что наилучшим критерием оптимизации при выборе лучшего типа машины или аппарата являются приведенные затраты.

$$Z_{\text{привед}} \rightarrow \min.$$

Известно, что приведенные затраты имеют 2 основные составляющие:

$$Z_{\text{привед}} = Z_{\text{себест}} + Z_{\text{капит.}}$$

Первая составляющая учитывает затраты на энергию, сырье, заработную плату и ремонт, а вторая – капитальные затраты на изготовление оборудования. Поэтому минимизируются обе составляющие и наилучшее оборудование имеет минимум приведенных затрат.

Общеизвестно, что при классификации по видам свойств машиностроительной продукции, основными всегда называют показатели назначения: производительность, надежность, технологичность, стандартизация и унификация, некоторые экономические показатели (стоимость, энергоемкость, металлоемкость и др.), а также показатели качества. Все они используются для оценки качества машины, которое определяется как относительная характеристика, иначе, производится сравнение совокупности показателей данной машины с соответствующей совокупностью показателей базовой. Какую бы цель не ставил потребитель для оценки уровня качества объекта, показатель надежности учитывается всегда (например, сравнение с заменяемой машиной, определение степени превосходства отечественной продукции с зарубежными образцами и т.п.). Таким образом, первой и важнейшей проблемой в экономике и технике является проблема управления качеством продукции, а, следовательно, и управление и обеспечение надежности. Система управления и обеспечения должна базироваться на как можно более полной информации о показателях качества и надежности изделий, причем для действительно управления качеством и надежностью следует иметь информацию о качестве и надежности объекта в течение всего жизненного цикла изделия /машины/. Со временем конструктивная надежность машины становится ниже уровня эксплуатационной надежности. Это надо знать, это надо предвидеть и эксплуатировать машину в экономически оправданные сроки.

Таким образом, определение оптимального срока службы продукции машиностроения является второй проблемой обеспечения надежности. Оптимальный срок службы, определенный с учетом надежности машины, даст возможность прогнозировать удельные затраты на содержание и эксплуатацию оборудования, оценка которых при технико-экономическом обосновании новых машин пока еще недостаточно достоверна [17].

Еще одной экономической проблемой надежности машины можно назвать связь и влияние надежности на производительность труда, т.к. качество машины должно оцениваться не только по множеству свойств, которые

зачастую устанавливаются потребителями, но и по конечному результату работы машины – по обеспечению данной машиной требуемого уровня производительности труда. При дальнейшем исследовании этой проблемы можно установить и то, что влияние надежности на показатель производительности труда позволяет экономить не только живой труд, но и материальные затраты: металл, энергию, необходимые для изготовления машины, а также экономятся живой труд, энергия и материалы при эксплуатации данной надежной машины.

Все сказанное выше позволяет сделать вывод, что в результате решения перечисленных проблем создаются реальные условия для эффективного функционирования и химико-технологического оборудования и химико-технологических систем.

В настоящее время промышленность даже передовых стран несет огромные потери из-за недостаточной надежности и долговечности выпускаемых машин. За весь период эксплуатации затраты на ремонт и техническое обслуживание машин, в связи с их износом, в несколько раз превышают стоимость новой техники, например, для автомобилей – до 6 раз, для самолетов – до 5 раз, для радиотехнической аппаратуры – до 12 раз.

Особенностью проблемы надежности является ее связь со всеми этапами проектирования, изготовления и использования машин. Каждый из этапов вносит свою лепту в решение трудной задачи создания машины требуемого уровня надежности с наименьшими затратами времени и средств. Основные решения по надежности, принятые на стадии проектирования или изготовления машины, непосредственно сказываются на ее эксплуатационных свойствах и экономических показателях, которые нередко вступают между собой в противоречие. Поэтому необходимо выявление связей между показателями надежности и возможностями их по повышению на каждом из этапов проектирования, изготовления и эксплуатации машины.

Надежность закладывается при проектировании и расчете машины. Она зависит от конструкции машины и ее узлов, применяемых материалов, методов защиты от различных вредных воздействий, системы смазки, приспособленности к ремонту и других конструктивных особенностей.

В настоящее время наблюдается тенденция к увеличению мощности производств, переходу на последовательные технологические системы со сложным аппаратным оформлением, объединение производств в сложные системы, связанные между собой сырьевыми и энергетическими потоками и обеспечивающие комплексную переработку нескольких продуктов. В этих условиях надежность оборудования, ХТП и всей ХТС приобретает первостепенное значение.

Разработка и повышение надежности являются весьма трудными проблемами в теоретическом плане и практической реализации.

II.3.2. Виды отказов ХТО и их классификация. Некоторые вопросы теории надежности и их анализ

Основным показателем качества аппаратов и машин в химическом производстве является надежность их работы, т.е. свойство аппаратов или машин выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени и требуемой наработки. Надежность аппаратов (машин) обуславливается их безотказностью, ремонтпригодностью, сохраняемостью, а также долговечностью их узлов и деталей (запчастей).

Для описания надежности технических объектов существуют определенные показатели, характеризующие надежность не только с качественной, но и с количественной стороны (ГОСТ 27.002 – 89). Ниже рассмотрены основные из них.

Работоспособность – это состояние изделия, при котором оно способно выполнять заданные функции, сохраняя значение заданных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией.

Отказ – это событие, заключающееся в нарушении работоспособности изделия.

Время работы до отказа называется сроком службы до отказа.

Время работы изделия до отказа, выраженное в часах, называется наработкой до отказа – это время достижения предельного значения любым из его выходных параметров.

Наработка или срок службы до предельного регламентированного состояния называется соответственно ресурсом или допустимым сроком службы.

Надежность – это свойство изделия сохранять во времени свою работоспособность.

Надежность изделия – обобщенное свойство, которое включает в себя понятия безотказности и долговечности.

Безотказность – это свойство изделия непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого промежутка времени или некоторой наработки.

Долговечность – это свойство изделия сохранять работоспособность до наступления предельного состояния, т.е. в течение всего периода эксплуатации при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.

Основным показателем безотказности изделия является вероятность безотказной работы $P(t)$ (коэффициент надежности) – вероятность того, что в заданном интервале времени (или в пределах заданной наработки) не возникает отказа изделия [18].

Приближенное значение $P(t)$ можно определить [20] по формуле:

$$P(t) = \frac{N(t)}{n}, \quad (\text{II.4})$$

где $N(t)$ – число изделий, оставшихся работоспособными до конца наработки (или до конца заданного интервала времени),

n – число испытываемых изделий.

Вероятность отказа $F(t)$ связана с вероятностью безотказной работы простым соотношением [18], [20]:

$$F(t) = 1 - P(t). \quad (\text{II.5})$$

Основным показателем долговечности элемента изделия является его срок службы (наработка) до отказа.

Эта характеристика [20] не включает время простоев и не является календарным временем с момента пуска аппарата. Она более удачно отражает выполнение аппаратом своей функции.

Показателем, определяющим долговечность машины, может служить коэффициент технического использования, который равен:

$$K_{т.и.} = \frac{T_{раб}}{T_{раб} + \sum_{i=1}^n T_{рем}}, \quad (\text{II.6})$$

где $T_{раб}$ – время работы машины за некоторый период эксплуатации;

$T_{рем}$ – суммарная продолжительность ремонтов машины за этот же период эксплуатации.

Коэффициент технического использования – безразмерная величина. Он численно равен вероятности того, что в данный произвольно взятый момент времени машина работает, а не ремонтируется.

Коэффициент готовности K_g представляет собой [20] отношение времени наработки на отказ T к полному времени, предполагая, что оборудование или работает или ремонтируется:

$$K_g = \frac{T}{T + T_B}, \quad (\text{II.7})$$

где T_B – средняя продолжительность восстановления (ремонта) оборудования.

Отказ – это событие, заключающееся в нарушении работоспособности изделия.

Примеры отказов: поломка вала, заклинивание золотника системы, выход за допустимые пределы КПД двигателя и др.

Естественно, что различные отказы имеют разные последствия – от незначительных отклонений в работе машины до аварийных ситуаций. Поэтому рассмотрим показатели для оценки степени опасности отказов и классификацию отказов.

Классификация отказов.

Основным признаком, определяющим различные виды отказов, служит характер возникновения и протекания процессов, приводящих к отказу [18].

Постепенные (износные) и внезапные отказы.

Постепенные (износные) отказы возникают в результате протекания того или иного процесса старения, ухудшающего начальные параметры изделия (рис.7).

Основным признаком постепенного отказа является то, что вероятность его возникновения $F(t)$ в течение заданного периода времени от t_1 до t_2 зависит от длительности предыдущей работы изделия t_1 . Чем больше эксплуатировалось изделие, тем выше вероятность возникновения отказа, т.е. $F_2(\Delta t) > F_1(\Delta t)$, если $t_2 > t_1$, где $F(\Delta t)$ – вероятность отказа за период от t до $(t + \Delta t)$. К этому виду относится большинство отказов машин. Они связаны с процессами износа, коррозии, усталости и ползучести материалов.

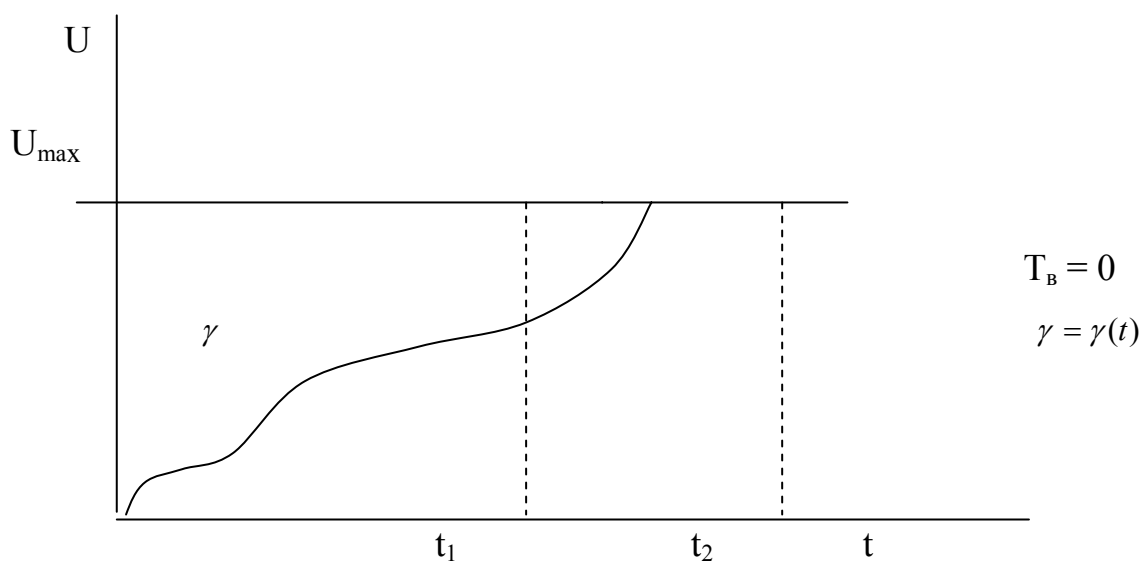


Рис.7 Схема возникновения постепенного отказа

Внезапные отказы (рис.8) возникают в результате сочетания неблагоприятных факторов и случайных внешних воздействий, превышающих возможности изделия к их восприятию.

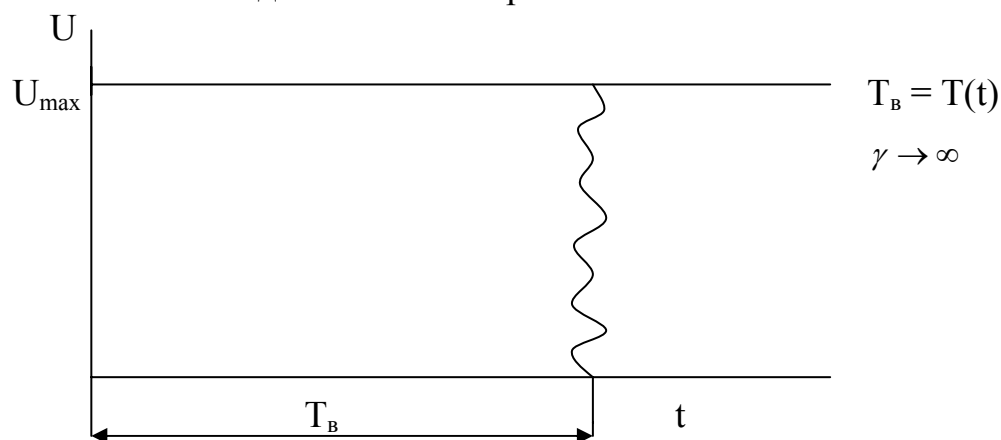


Рис.8. Схема возникновения внезапного отказа

Отказ возникает через некоторый промежуток времени T_b , который является случайной величиной.

Основным признаком внезапного отказа является независимость вероятности его возникновения $F(t)$ в течение заданного периода времени от t_1 до t_2 от длительности предыдущей работы изделия t_1 .

Примерами таких отказов могут служить тепловые трещины, возникающие в детали вследствие прекращения подачи смазки, поломки детали из-за неправильной эксплуатации машины или возникновения перегрузок, прекращения подачи одного из компонентов, деформация или поломка деталей, попавших в такие условия работы, когда каждый параметр принимает экстремальное значение (наибольшие нагрузки, повышенная температура и т.д.).

Выход из строя происходит, как правило, внезапно, без предшествующих симптомов разрушения.

Иногда существует мнение «..., что появлению внезапных отказов обычно также предшествуют скрытые изменения свойств деталей или компонентов, которые не всегда удается обнаружить. Поэтому разделение на внезапные и постепенные отказы носит условный характер» [19].

С этим нельзя согласиться, т.к. деление на постепенные и внезапные отказы определяется природой их возникновения, а не тем, установлена или нет природа отказа. Внезапность отказа при эксплуатации машины в результате скрытности процесса разрушения еще не означает, что отказ относится к категории внезапных. Критерием здесь будет служить наличие или отсутствие зависимости $F(t)$ от времени предыдущей работы изделия [18].

Наступление любого отказа зависит от скорости процесса повреждения:

$$\gamma = \frac{dU}{dt}, \quad (\text{II.8})$$

где U – степень повреждения,

и от времени начала возникновения этого процесса T_b .

Для постепенного отказа $T_b = 0$, т.е. при эксплуатации изделия, процесс начинается сразу, даже если вначале он практически не проявляется, а скорость процесса является функцией времени $\gamma(t)$.

Для внезапного отказа время возникновения его T_b является случайной величиной и подчиняется некоторому закону распределения $f(T_b)$, не зависящему от состояния изделия. Процесс протекает весьма быстро ($\gamma \rightarrow \infty$), и поэтому функция $f(T_b)$ определяет вероятность безотказной работы.

Может быть и третий вид отказов, включающий особенности двух предыдущих (см. рис.9), который будем называть сложным отказом.

Здесь время возникновения отказа – случайная величина, не зависящая от состояния изделия, а скорость процесса потери работоспособности изделия $\gamma(t)$ зависит от его сопротивляемости. Например, внешние допустимые ударные воздействия на машину (редкое случайное событие) могут явиться источником возникновения усталостной трещины из-за концентрации напряжений.

Постепенное (разрушение) развитие трещины будет происходить по мере дальнейшей эксплуатации машины.

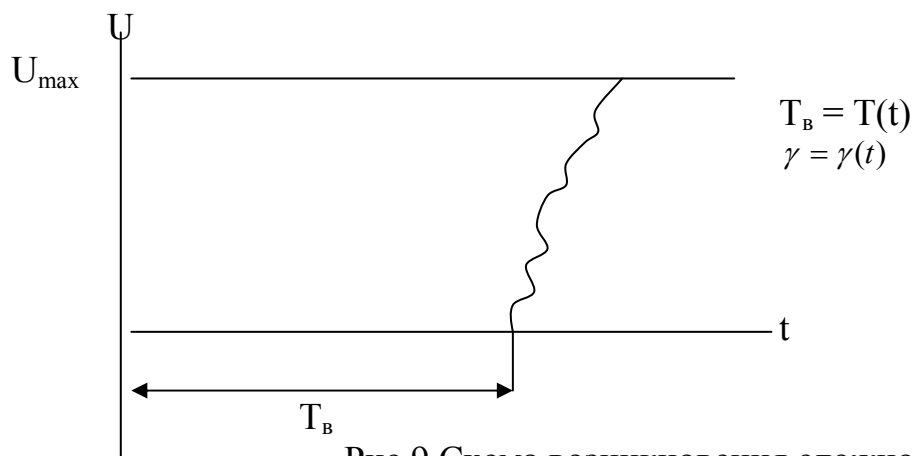


Рис.9 Схема возникновения сложного отказа

Отказы функционирования и параметрические отказы.

Последствия отказов весьма разнообразны. Их можно разделить на параметрические и отказы функционирования.

Отказ функционирования приводит к тому, что изделие не может выполнять своих функций. Например, в результате отказа редуктор не вращается и не передает движения, двигатель внутреннего сгорания не запускается, насос не подает масла и т.п. Часто отказ функционирования связан с поломками или заклиниванием отдельных элементов изделия.

Параметрический отказ приводит к выходу параметров (характеристик) изделия за допустимые пределы. Такие отказы, как нарушение точности обработки на станке, падение КПД передачи и др., не ограничивают возможность дальнейшего функционирования изделия. Однако оно становится неработоспособным с точки зрения требований, установленных техническими нормативами.

Для современных машин и изделий наиболее характерны параметрические отказы [18].

Это связано с высокими требованиями к выходным параметрам современных машин. Эксплуатация изделия, имеющего параметрический отказ, может привести к весьма тяжелым экономическим и другим последствиям. Например, к выпуску некачественной продукции, которая может быть причиной отказов в сфере ее эксплуатации, к невыполнению изделием возложенных функций, к большим дополнительным затратам времени и средств.

В сложных машинах и системах параметрические отказы элементов могут привести к отказу функционирования. Например, в многосвязном механизме, последнее звено которого совершает небольшое перемещение, в результате износа кинематических пар возможен случай, когда наличие зазоров приведет к тому, что звено вообще не будет перемещаться.

Поэтому параметрические отказы являются основным объектом рассмотрения в теории надежности машин.

Следует подчеркнуть, что отказы функционирования и параметрические отказы могут быть как постепенными, так и внезапными.

Например, внезапный отказ измерительного прибора из-за недопустимых внешних воздействий будет параметрическим, если потеряна его точность из-за нагрева от внешних источников тепла и отказом функционирования, если произошло заклинивание его механизмов из-за запыления атмосферы.

Фактические и потенциальные отказы.

При эксплуатации любого изделия может наступить его первый, а затем и последующие отказы. Если эти отказы предотвращаются заблаговременным выполнением ремонта и регулировок, то критерием близости отказа является степень повреждения изделия, а отказ воспринимается как потенциально возможное событие. Такие отказы будем называть потенциальными.

В инструкциях по сбору и обработке информации о надежности различных машин при их эксплуатации, как правило указывается, что восстановление работоспособности отдельных деталей, сопряжений и узлов, выполняемое в соответствии с правилами технического ухода и ремонта, не является отказом. Лишь та потеря работоспособности изделия, при которой требуется внеочередное вмешательство ремонтной службы, квалифицируется как отказ.

Такой подход приводит к неверному суждению о надежности машины, т.к. не учитываются потенциальные отказы.

Для изготовителей и эксплуатационников характерно постоянное стремление к недопущению отказов при работе машин. Это достигается правильной организацией системы ремонта и технического обслуживания, применением обоснованной системы управления качеством и надежностью при производстве изделий и строгим выполнением правил эксплуатации и ремонта. В результате изделие может вообще не иметь отказов при эксплуатации, тем не менее уровень его надежности не будет удовлетворять разработчиков и потребителей.

Поэтому, когда речь идет об отказах изделия этой основной категории теории надежности, то имеются в виду в основном потенциально возможные, а не только фактические отказы [18].

Допустимые и недопустимые отказы.

Допустимые отказы [18] связаны с процессами старения, которые приводят к постепенному ухудшению выходных параметров изделия. Сюда же следует отнести внезапные отказы, которые вызваны неблагоприятным сочетанием факторов, если последние находятся в пределах, указанных в ТУ на эксплуатацию. Иногда конструктор сознательно допускает некоторую (как правило небольшую) вероятность возникновения отказа, чтобы облегчить и удешевить конструкцию. Это, конечно, допустимо лишь в тех случаях, когда отказ не вызовет катастрофических последствий.

Недопустимые отказы [18] связаны с нарушением:

- технических условий при изготовлении и сборке изделий;
- правил и условий эксплуатации и ремонта – превышение режимов работы машины выше допустимых;
- правил ремонта, ошибок людей, управляющих машиной и т.п. – скрытые причины, неучтенные в технических условиях и нормативах параметры. Изделие может быть выполнено в строгом соответствии с техническими условиями (ТУ), однако сами ТУ не учитывают всех тех объективно существующих факторов, которые влияют на надежность и проявляются в процессе эксплуатации.

Для описания и анализа надежности механических систем предлагается в справочнике «Надежность технических систем» [1] рассматривать такие факторы, которые имеют непосредственное влияние на величину надежности: нагрузки и воздействия на механические системы; механические свойства материалов и элементов конструкций; особенности расчета механических систем на надежность; отказ как выброс случайного процесса из допустимой области. С учетом этих факторов предлагается основной показатель надежности $P(t)$ – вероятность безотказной работы на отрезке времени $[0, t]$. Далее говорится, что это соответствует вероятности нахождения вектора качества $V(t)$ в допустимой области Ω в течение указанного отрезка времени: $P(t) = P\{V(\tau) \in \Omega; \tau \in [0, t]\}$.

В данной формуле не учитывается разброс физико-механических свойств материалов и параметров нагрузок. Эта зависимость определяет показатель надежности на основе теории выбросов случайных процессов и полей. При условии, что случайные свойства параметров системы характеризуются векторной случайной величиной r , а разброс параметров внешнего воздействия $q(t)$ определяется вектором S , совместная плотность вероятности параметров r и S – $p(r, S)$, можно записать формулу вероятности безотказной работы по формуле полной вероятности:

$$P(t) = \iint P(t | r, S) p(r, S) dr dS,$$

где интегрирование производится по всей области изменения параметров r и S . Условная вероятность безотказной работы $P(t|r, S)$ вычисляется аналогично для системы с фиксированными параметрами r и S ; при этом вектор качества будет зависеть от r и S , а допустимая область – от параметра r .

Применяя изложенный подход к определению надежности можно рассчитать безотказность объекта, выбирая пространство качества V и допустимую область Ω в этом пространстве.

Как было сказано выше, отказ в теории надежности механических систем трактуется [1] как нарушение условия нахождения параметра качества V в допустимой области Ω_0 . В зависимости от свойств технического объекта, вида и характера воздействия на него внешних нагрузок, времени функционирования этого объекта описание отказов может быть проведено различными способами, да и сами отказы в зависимости от этих факторов

могут быть различных типов. Ученые и специалисты в области надежности технических систем классифицируют отказы в зависимости от внешних и внутренних факторов и предлагают соответствующие математические модели для их описания. Например, предлагаются статические модели отказов [1], марковские модели, кумулятивные модели, модели пуассоновского типа [1,21], модели надежности [21] невозстанавливаемого элемента и восстанавливаемого элемента [12 том II]. В теории надежности для математического моделирования Б.В.Гнеденко [12 том II] предлагает использовать следующие распределения: экспоненциальный (показательный) закон; нормальный закон; закон Вейбулла–Гнеденко; гамма–распределение и т.д. Вполне понятно, что выбор той или иной модели для описания надежности, отказов технических объектов определяется рядом факторов, влияющих на эти объекты. Часто трудно описать однозначно какой-либо одной определенной моделью надежность или отказ, поэтому предлагаются [12] еще и такие подходы к разрешению задачи: смесь распределений (учитывает фактор изготовления объекта на различных предприятиях); стареющие распределения (учитывается фактор так называемого «стареющего элемента»).

В.В.Болотин [21] рассматривает «простейшие задачи теории надежности», учитывая взаимодействие элементов между собой по некоторым логическим схемам (принято в системной теории надежности). Предлагается для наглядного представления взаимодействия использовать структурные схемы и графы. Элементарные модели отказов машин и конструкций [21] должны опираться на вид расчетной схемы, способ описания свойств нагрузок, воздействий и материалов, характер назначаемых ограничений на состояние объекта и другие факторы, большинство из которых уже упоминалось выше. «Кроме того, структура моделей связана с характером протекающих в объекте процессов. В зависимости от множества значений аргумента различают модели с дискретным временем (случайные последовательности) и модели с непрерывным временем. В зависимости от размерности пространства качества различают модели одномерные, двумерные и т.п. Наряду с моделями, элементами которых служат некоторые случайные процессы, приходится рассматривать континуальные модели, элементами которых служат случайные поля [22]. Еще один признак для классификации моделей основан на свойстве зависимости (независимости) процесса от предыстории. Модель называют марковской, если ее поведение в будущие моменты времени может быть предсказано на основании сведений о ее состоянии в некоторый заданный момент независимо от предыстории. Наряду с марковскими моделями теории надежности машин и конструкций применяют модели, учитывающие свойства наследственности и последствий».

В справочниках «Надежность технических систем» [1], «Надежность и эффективность техники» [12], а также в других источниках, освещающих проблемы надежности, рассматриваются математические модели надежности, в которых отражаются и другие факторы, влияющие на надежность.

Кумулятивные модели отказов описывают постепенное развитие и накопление в машинах повреждений, деформаций, износа, происходящих в процессе эксплуатации и влияния окружающей среды.

Монотонное ухудшение параметров качества механических систем можно представить в виде кумулятивной модели случайного процесса $V(t)$, если для любых моментов времени $t_2 > t_1$ выполняется условие $\|V(t_2)\| \succ \|V(t_1)\|$, где $\|V(t)\|$ - выбранная норма вектора $V(t)$ в пространстве качества V . Для выпуклой области Ω в пространстве качества кумулятивный процесс $V(t)$ монотонно приближается к границе допустимой области, а вероятность безотказной работы на отрезке времени $[0, t]$ совпадает с вероятностью пребывания в этой области в момент времени t :

$$P(t) = P\{V(t) \in \Omega\}.$$

Если число отказов в системе на отрезке времени $[0, t]$ образует пуассоновский поток событий и вероятность наступления равно k -а отказов

$$p_k(t) = \frac{1}{k!} \left[\int_0^t \lambda(\tau) d\tau \right]^k \exp \left[- \int_0^t \lambda(\tau) d\tau \right], \quad k = 0, 1, \dots, \text{ то}$$

вероятность безотказной работы $P(t)$ определяется при $k = 0$:

$$P(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(\tau) d\tau \right],$$

где $\lambda(\tau)$ - интенсивность отказов.

II.3.3. Математическая модель надежности химико-технологического оборудования

Наука о надежности рассматривает процесс изменения во времени показателей качества машин, их точности, мощности, КПД, производительности и др.

Наука и исследования по надежности связаны с развитием математических методов оценки надежности, изучением физики отказов, разработкой расчетных методов надежности. Математические методы теории надежности имеют особое значение, т.к. позволяют учитывать специфику возникновения и устранения отказов. Эта специфика связана с тем, что для решения задач надежности необходимы знания статистики отказов и тех физических, химических и механических процессов, которые приводят к изменению начальных показателей качества машин и их элементов. Эти процессы, подчиняясь определенным физическим закономерностям, имеют стохастическую природу. Временные закономерности физики отказов являются базой для решения основных задач надежности.

Исходя из сказанного выше, следует, что основу математических расчетов надежности и разработки математических моделей надежности должна составлять теория марковских процессов.

Разработка математической модели надежности химико-технологического оборудования включает в себя три этапа [18].

- 1) описание процесса потери работоспособности ХТО;
- 2) разработку формализованной схемы этого процесса;
- 3) построение математической модели, представляющей систему соотношений, связывающей характеристики процесса потери работоспособности ХТО и исходные показатели изделия с его выходными параметрами.

Первый этап разработки математической модели обязателен для описания надежности какого-либо конкретного вида ХТО.

На втором этапе формализацию процесса потери работоспособности машины можно представить схемой структуры внешних воздействий на ХТО (рис. 10).

На третьем этапе производится разработка математической модели надежности ХТО.

Математическая модель базируется на схеме процесса потери работоспособности, но из-за сложности протекающих при этом явлений часто производится расчленение процесса на несколько элементарных процессов, которые можно описать более простыми математическими зависимостями.



Рис. 10. Структура внешних воздействий на конструкцию

Выходные параметры ХТО являются характеристикой, как бы мерой его надежности. Закон изменения выходного параметра машины во времени $X(t)$ может соответствовать определяющей его временной зависимости для степени повреждения $U(t)$, но может и существенно от нее отличаться, т.к. между $X(t)$ и $U(t)$ имеется функциональная зависимость $X = f(U)$, отражающая назначение и принцип действия данной машины.

Связь между X и U может быть линейной и нелинейной, т.е. в общем виде:

$$X = f(U) = f[U(t)].$$

Обычно $U(t)$ является случайной величиной, а функция $f(U)$ описывает детерминированную зависимость. Сложные изделия характеризуются несколькими выходными параметрами $X_1, X_2, \dots, X_n$, а во многих случаях выходной параметр изделия зависит от нескольких повреждений $U_1, U_2, \dots, U_k$, которые могут иметь различные законы изменения во времени. Поэтому в общем случае зависимости для выходных параметров могут быть записаны системой уравнений:

$$\begin{aligned} X_1 &= f_1[U_{11}(t), U_{21}(t), \dots, U_{k1}(t)] \\ X_2 &= f_2[U_{12}(t), U_{22}(t), \dots, U_{k2}(t)] \\ X_n &= f_n[U_{1n}(t), U_{2n}(t), \dots, U_{kn}(t)] \end{aligned} \quad (a)$$

Примером для описания надежности ХТО данной системой надежности может служить любая машина или аппарат, применяемая в химической промышленности.

На рис.11а показана зависимость давления $X=P$ в аппарате от износа U вследствие коррозии. На рис.11б изображается зависимость передаточного усилия в шестернях $X=P_d$ (динамической наурузки) от величины износа U .

Связь между X и U в явном виде существует лишь для простых изделий с ограниченным числом выходных параметров.

Запишем систему уравнений для фильтра-пресса, предназначенного для фильтрации раствора ронгалита. Выходными параметрами этого аппарата являются следующие:

X_1 – содержание ронгалита в фильтрате;

X_2 – количество осадка на фильтре-прессе;

Повреждения, влияющие на выходные параметры аппарата:

U_1 – забивка фильтровальной ткани;

U_2 – повреждение сварного шва рамы.

Тогда система уравнений будет иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= f_1(U_1, U_2) \\ X_2 &= f_2(U_1, U_2) \end{aligned} \right\} \quad (б)$$

Как было сказано выше, формирование выходных параметров представляет собой сложный процесс. Для сложных механизмов с большим числом звеньев определение функциональных связей, характеризующих влияние изменений состояния отдельных звеньев на выходные параметры

изделия, может производиться на основе линейной и нелинейной теории точности академика Бруевича Н.Г.

$X=P$

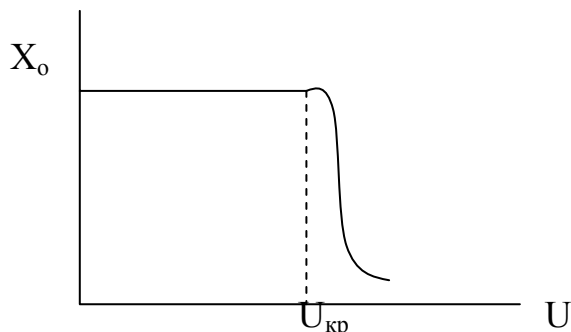


Рис. 11а

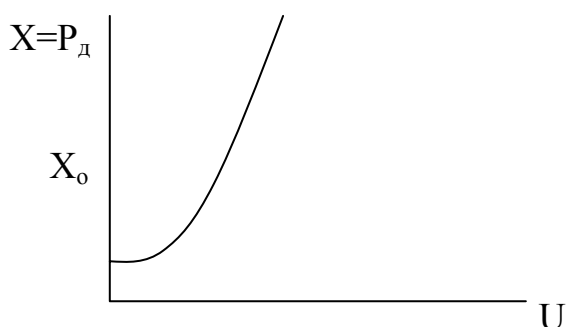


Рис. 11б

Данная теория рассматривает ошибки выходного параметра (сигнала) φ устройства, как функцию параметров и координат его входных параметров (сигналов) q_2 .

Первичная ошибка отдельных звеньев Δq_s зависит как от исходных погрешностей их изготовления $(\Delta q_s)_0$, так и от процессов, изменяющих со временем начальные погрешности со скоростью γ , т.е.

$$\Delta q_s = (\Delta q_s)_0 + \gamma t. \quad (\text{в})$$

Ошибка выходного параметра $\Delta \varphi$ рассчитывается по формуле, полученной Н.Г.Бруевичем:

$$\Delta \varphi = (\varphi'_0 - \varphi_0) + \sum_1^s \left(\frac{\partial \varphi}{\partial q_s} \right)_0 \Delta q_s + t \sum_1^s \left(\frac{\partial \varphi}{\partial q_s} \right) \gamma, \quad (\text{г})$$

где φ_0 - выходные параметры идеального механизма;

φ'_0 - выходные параметры реального механизма;

S - число учитываемых первичных ошибок звеньев.

Разработанная математическая модель надежности фильтра-пресса и проведенные расчеты подтверждают возможность описания по зависимостям (а), (б), (в), (г) надежности функционирования этого вида оборудования. Недостатки в работе фильтра-пресса (уменьшение осадка ронгалита на

фильтрующей ткани – X_2 и увеличение его в фильтрате – X_1), имеющие место из-за забивки фильтровальной ткани – U_1 и повреждений сварного шва рамы – U_2 , вполне достоверно подтверждаются величиной ошибки выходного параметра $\Delta\varphi$, рассчитанного по формуле Н.Г.Бруевича. Процент расхождений в расчетах не превышает 2-3 % от данных производства ронгалита.

Для какого-либо конкретного механизма значения, входящие в формулы (в) и (г) – детерминированные величины. Значение γ , как следствие процессов старения и режимов работы изделия, всегда является случайной величиной. Поэтому сложная система не может функционировать и тем более изменять свое состояние (работоспособность) по строго детерминированным законам.

Нельзя также поставить задачу о раскрытии всех связей системы, что практически и даже принципиально невозможно. Речь всегда должна идти о выявлении основных связей и зависимостей, которые с достаточной степенью достоверности описывают происходящие процессы.

Глава III

Надежность химико-технологических процессов (ХТП)

Разработкой теории надежности, математическим обеспечением расчетов надежности систем, техники занимаются многие специалисты и ученые. Информации в этой области более чем достаточно, но работа над проблемой надежности процессов ведется в меньших размерах, информации по этому направлению немного. Имеются сведения в справочниках, статьях о структуре, оптимизации, обеспечении надежности технологических процессов в машиностроении [12, 18, 23]. Работы по надежности химико-технологических процессов стали освещаться одним из первых В.В.Кафаровым и его школой [7, 10, 24, 25]. Всесоюзное научно-производственное и проектно-конструкторское объединение «Нефтехим», начиная с 1979 г. издает работы по надежности нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств.

III.1. Обеспечение надежности химико-технологических процессов на стадии эксплуатации

III.1.1. Сбор информации об отказах ХТП

Изучая вопросы надежности, мы пришли к выводу, что ограничиваться лишь вероятностным подходом и обработкой статистической информации нельзя. Для обоснования надежности химико-технологических процессов следует изучать не только статистическую информацию об отказах, но и проникать в их физико-химическую сущность. В связи с таким подходом к изучаемому вопросу, нас заинтересовало положение, сложившееся в цехе по производству ронгалита АО «Химпром». Цех постоянно «лихорадит», выпуск качественного продукта постоянно срывается. Мы стали изучать работу этого цеха, выявлять причины срывов (отказов) в его работе с целью повышения надежности его функционирования.

Началось изучение с работы первой стадии технологического процесса производства ронгалита (технологическая схема производства ронгалита (рис.4)). Было выявлено, что не все количество цинкового порошка, необходимого для получения ронгалита, вступает в реакцию, поэтому велики его потери, продукт получается низкого качества. Поэтому решили, прежде всего, изучить влияние химической активности цинкового порошка на качество ронгалита.

Использовали ранее разработанную методику повышения надежности производства ронгалита (гл. II), а для этого провели обследование данного производства. Данные, полученные примерно за год наблюдений, приведены в таблице 3.

Таблица 3

Отказы в работе цеха ронгалита

Наименование отказа, причины отказа	Последствие отказа	Частота (количество отказов)	Время простоя, ч	Классификация простоя
1	2	3	4	5
Электропогрузчик вышел из строя	Нарушен процесс загрузки сырья	7	0,16	ХТО
Не работают фильтры, т.к. заморожена вода на промывку фильтров	Остановлен процесс промывки фильтрующей ткани	4	1,0	ХТО
Отсутствует щелочь из-за нарушения технологической дисциплины	Остановлен процесс подщелачивания	2	0,5	Организационный
Сгорел электродвигатель насоса подачи Zn - пульпы	Низкое давление в трубопроводной системе	1	1,0	ХТО
Мало давление речной воды	Простой выпарного отделения	2	1,5	ХТП
Отсутствует подача пара	Нарушен процесс разделения раствора ронгалита	1	1,5	ХТП
При продувке паром емкости формалина часть формалина выбило из емкости	Простой фильтрования остановлен	3	2,5	ХТП
Замедлен прием бисульфита из-за неисправности системы подачи сырья	Простой реакционного отделения	2	2,3	ХТП
Оборван поплавков на мернике	Сбой в работе процесса разделения ронгалита и осадка гидроокиси Zn	1	0,5	ХТО
Нет растворов, замена двигателя на транспорте	Стадия кристаллизации в простое	3	6	ХТО

III.1.2. Обработка информации об отказах химико-технологических процессов (ХТП)

Полученные данные об отказах химико-технологических процессов необходимо прежде всего проанализировать с целью определения математического метода для более корректного (адекватного) представления надежности ХТП, разработки математической модели надежности химико-технологических процессов. В ряде источников [11, 15, 26-29 и др.] указывается, что для поставленной цели, в первую очередь, надо использовать методы теории вероятностей и математической статистики.

Полученные количественные данные (отказы ХТП) представляют собой последовательность N событий. Характеристиками событий являются частота m_i и частость $p_i = m_i / N$, количество наблюдений обозначим буквой « n ». Первичная обработка данных (таблица 3) представлена в таблице 4.

Таблица 4

Результаты первичной обработки данных

№ п/п	Значение случайной величины (t_i) отказа	Частота m_i	Частость $p_i = m_i / N$	Накопленная частота $\sum_i^n m_i$	Накопленная частость $\sum_i^n p_i$
1	2	3	4	5	6
1	1,0	1	0,0286	1	0,0286
2	5,5	1	0,0286	2	0,0572
3	7,0	1	0,0286	3	0,0858
4	7,5	2	0,0572	5	0,1430
5	7,8	1	0,0286	6	0,1716
6	7,84	3	0,0857	9	0,2573
7	8,0	1	0,0286	10	0,2859
8	14,0	1	0,0286	11	0,3145
9	14,75	1	0,0286	12	0,3431
10	15,0	1	0,0286	13	0,3717
11	15,84	1	0,0286	14	0,4003
12	19,0	1	0,0286	15	0,4289
13	21,5	1	0,0286	16	0,4575
14	21,7	1	0,0286	17	0,4861
15	23,1	1	0,0286	18	0,5147
16	23,84	1	0,0286	19	0,5433
17	29,0	1	0,0286	20	0,5719
18	30,0	1	0,0286	21	0,6005
19	35,5	1	0,0286	22	0,6291
20	38,5	2	0,0572	24	0,6863
21	39,84	1	0,0286	25	0,7148
22	43,0	1	0,0286	26	0,7434

23	52,5	1	0,0286	27	0,7720
24	53,0	1	0,0286	28	0,8006
25	54,5	1	0,0286	29	0,8292
26	55,0	1	0,0286	30	0,8578
27	59,0	1	0,0286	31	0,8364
28	62,5	1	0,0286	32	0,9150
29	71,5	1	0,0286	33	0,9436
30	71,84	1	0,0286	34	0,9722
31	95,0	1	0,0286	35	1,0008
n=31		N _{ХТС} = 35			

Построим график зависимости накопленной частоты $\sum_{i=1}^n m_i$ / от значения случайной величины t_i / (см.рис. 12).

Эмпирическое среднее может быть найдено по формуле как среднее арифметическое [15, 16]:

$$t_{cp} = \sum_{i=1}^{35} \frac{t_i}{35} \quad \text{или} \quad t_{cp} = \sum_{i=1}^{31} t_i p.$$

Для расчета воспользуемся формулой (2):

$$t_{cp} = +1 \cdot 0,0286 + 5,5 \cdot 0,0286 + 7 \cdot 0,0286 + 7,5 \cdot 0,0572 + \dots = 33,49 \text{ часов}$$

Полученное расчетное среднее значение случайной величины округлим до значения, равного $t_{cp} = 34$ часа.

Эмпирическое значение дисперсии распределения (оценка) определяется по формуле [15, 16]:

$$\overline{Dt} = \frac{\sqrt{M_k}}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - t_{cp})^2, \quad M_k = 1; N-1 = 35-1 = 34,$$

$$\overline{Dt} = \frac{1}{34} (33^2 + 28,5^2 + 27^2 + 26,5^2 + 26,32^2 + \dots) = 0,029 \cdot 17292,15 = 501,5$$

$$\overline{Dt} = 501,5 \text{ ч}^2$$

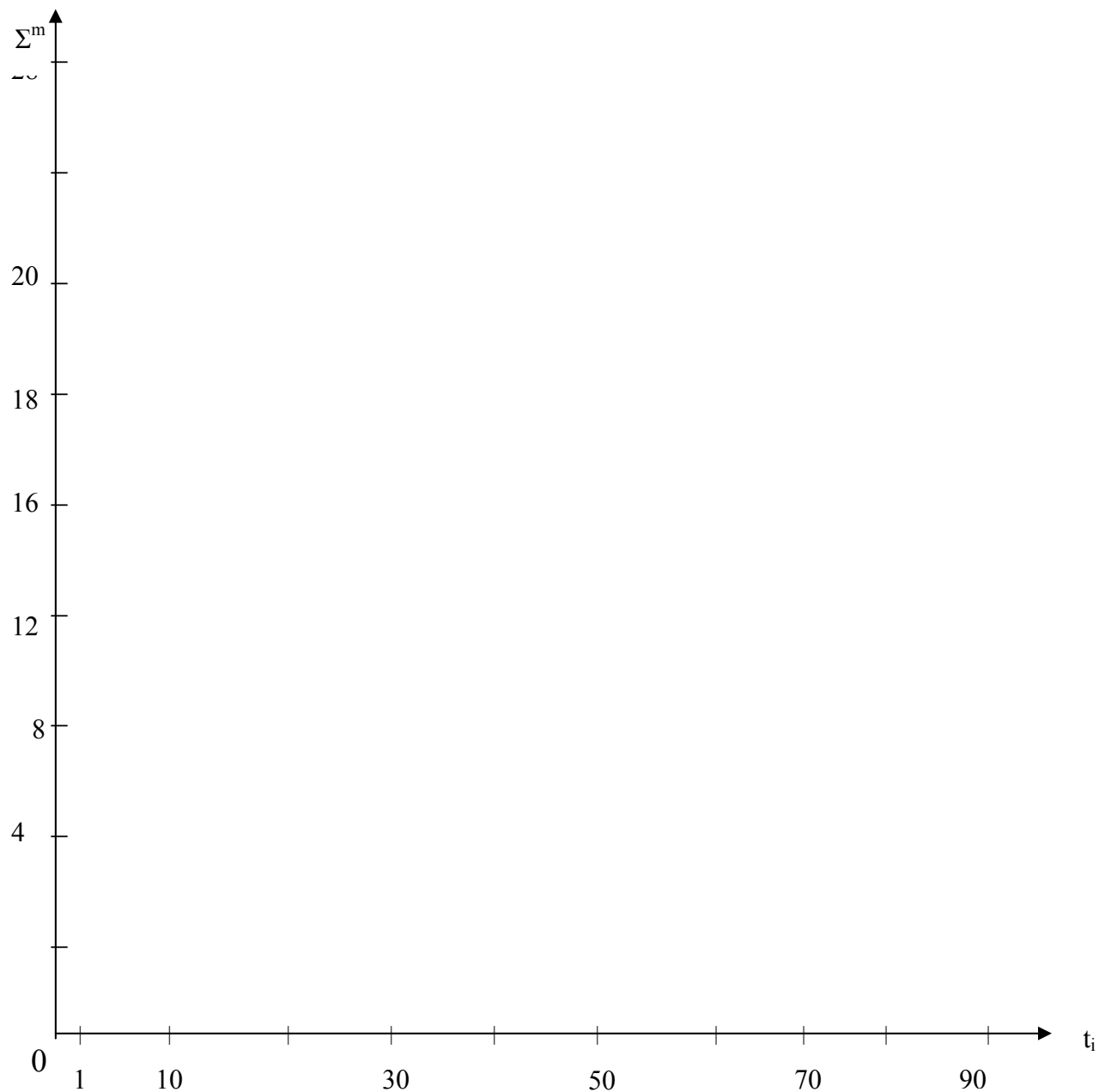


Рис. 12. Зависимость частоты m_i от значения случайной величины (t_i)

Среднее квадратическое отклонение распределения определяется как [15,27]:

$$\sigma = \sqrt{Dt},$$

$$\sigma = \sqrt{Dt} = \sqrt{501,5} = 22,39 \text{ ч.}$$

Определим коэффициент вариации как $V_x = \frac{\sigma_t}{t_{cp}}, V_x = \frac{22,39}{34} = 0,66,$

$$S_k = \frac{\mu_3}{\sigma_t^3} = \frac{17130,9}{22,39^3} = 1,52,$$

$$\mu_4 = 0,029 \cdot (33^4 + 28,5^4 + 27^4 + \dots) = 0,029 \cdot 24343194 = 705952,62,$$

$$S_k = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3 = \frac{705952,62}{22,39^4} - 3 = 0,01.$$

Так как $S_k \approx 0$ (мало и стремится к нулю), то распределение является нормальным.

Аппроксимирующее выражение для плотности вероятности распределения нормального закона можно написать, имея в виду, что выше приближенно определили расчетом значения параметров закона распределения, его среднее значение и среднее квадратическое отклонение.

Плотность вероятности нормального закона распределения [27]:

$$\varphi(t) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t_i - t_{cp})^2}{2\sigma_t^2}} = \frac{1}{22,39 \sqrt{2 \cdot 3,14}} \cdot e^{-\frac{(t_i - 34)^2}{2 \cdot 22,39^2}} = 0,018 e^{-\frac{(t_i - 34)^2}{1002,62}}$$

Математическое аппроксимирование выражения функции нормального закона распределения отказов [15]:

$$F(t) = 0,018 \int_0^t e^{-\frac{(t_i - 34)^2}{1002,62}} dt.$$

Вероятность безотказной работы можно записать в виде:

$$P(t) = 1 - F(t).$$

Если предположить вероятность безотказной работы равной 0,9, то вероятность отказов должна составить 0,1, а это по таблице значений функции Лапласа дает возможность установить при $t_{cp} = 34$ и $\sigma = 22,39$, что время наработки на отказ ХТС (любого элемента звена цеха) составит $59 < t_i < 95,0$, то есть t_i должно быть не менее 59 часов. Какие-либо недостатки в работе цеха не должны случаться чаще 1 раза за 2,5 суток, иначе вероятность безотказной работы будет ниже 0,9 (90%).

По функции Лапласа имеем [30]:

$$F(t_{i-1} < t_{cp} < t_{i+1}) = \Phi\left(\frac{t_{i+1} - t_{cp}}{\sigma_t}\right) - \Phi\left(\frac{t_{i-1} - t_{cp}}{\sigma_t}\right)$$

По данным цеха ронгалита (табл.7) вероятность отказов ХТС составляет

$$F(1 < t_i < 95) = \Phi\left(\frac{95 - 34}{22,39}\right) - \Phi\left(\frac{1 - 34}{22,39}\right) = \Phi(2,724) + \Phi(1,474) = 0,4967 + 0,4292 = 0,9259.$$

Тогда вероятность безотказной работы будет

$$P(t) = 1 - F(t) = 1 - 0,9259 = 0,074.$$

Для устойчивой работы цеха ронгалита необходимо иметь

$$F(59 \langle t_i \rangle 95) = \Phi\left(\frac{95 - 34}{22,39}\right) - \Phi\left(\frac{59 - 34}{22,39}\right) = \Phi(2,72) + \Phi(1,11) =$$

$$= 0,4967 - 0,3665 = 0,1302,$$

$$P(t) = 1 - F(t) = 1 - 0,1302 = 0,8698.$$

После проведения обследования производства, преследовавшего цель – выявить «узкие» (ненадежные) места, и обработки данных обследования, в соответствии с разработанной методикой следует приступить к разработке мероприятий, повышающих надежность химико-технологических процессов.

Анализ работы цеха ронгалита показал, что следующим важным этапом работы является разработка новой технологической схемы на стадии приготовления цинковой пульпы с внедрением измельчителя-активатора.

При исследовании процесса активации-измельчения цинкового порошка было установлено, что после активации-измельчения активность цинкового порошка резко возрастает. В производстве ронгалита цинковый порошок играет роль катализатора и поэтому повышение его активности выгодно.

Производство ронгалита работает на цинковом порошке трех видов: Югославском, Беловском и Горкинском. Последний используется крайне мало, ввиду небольшой своей активности. Но после активации-измельчения его активность резко возрастает и становится больше, чем у предыдущих двух видов. Югославский и Беловский порошок дороже, чем Горкинский, так как с ними связаны большие расходы на перевозку и доставку исходного сырья.

Повышение активности цинкового порошка благоприятно сказывается на повышении надежности процесса производства ронгалита. Прекращается выброс реакционной массы из аппарата, повышается процент использования цинка. Внедрение измельчителя-активатора повысило надежность производства ронгалита.

После мельницы активированная цинковая пыль собирается в бункере-накопителе, а затем ссыпается в пульпоприготовитель, предварительно заполненный водой, где происходит образование ронгалита.

Одним из мероприятий, разработанных нами для повышения надежности производства ронгалита, явилось проведение экспериментальных исследований по повышению химической активности цинкового порошка, с последующим внедрением результатов в производство ронгалита.

III.1.3. Процесс активации – измельчения

Процесс тонкого измельчения широко применяется в народном хозяйстве, в том числе в производстве строительных материалов, в химической и других отраслях промышленности.

Измельчение твердых материалов относится к классу механических процессов. В результате измельчения увеличивается поверхность обрабатываемого материала. Процессы измельчения связаны со значительным

расходом энергии на образование новых поверхностей (объемов), на преодоление внутреннего трения частиц при их деформации, на преодоление внешнего трения между материалом и рабочими частями машины. Процесс измельчения начинается с образования мельчайших трещин на поверхности твердых тел под воздействием внешних сил. При прекращении внешних воздействий трещины могут смыкаться вследствие протекания релаксационных процессов. Измельченный материал (образованная новая поверхность) или подвергнутый деформациям (нет новой поверхности, но имеются дефекты, трещины на материале) обладает иными механическими, физико-химическими свойствами по сравнению с исходным. Ударные воздействия на материал, его измельчение позволяют значительно ускорить растворение, обжиг, химическое взаимодействие (химактивность), интенсифицировать тепло- и массообменные процессы, в которых участвует этот материал, т.е. делает его более активным, «динамичным», что повышает надежность основных ХТП. Поэтому считаем, что надежность процесса активации-измельчения формулируется как максимальная (заранее определенная) активность материала (твердых частиц) при минимальном размере частиц измельчаемого материала с оптимальными затратами внешней энергии.

По теории дробления, предложенной Ребиндером П.А., работа, затрачиваемая на дробление, в общем случае является суммой двух слагаемых:

$$A = \sigma \Delta F + k \Delta V, \quad (\text{III.1})$$

где σ - удельная поверхностная энергия (энергия, приходящаяся на единицу поверхности тела);

ΔF - вновь образованная при разрушении поверхность;

k - работа упругой и пластической деформаций на единицу объема твердого тела;

ΔV - объем тела, подвергшийся деформации.

Если приращение поверхности невелико (ΔF), то почти вся энергия, израсходованная на процесс деформации частиц, идет на приращение объема деформаций (ΔV) и в конечном итоге в теплоту и дефектность структуры материала, оказывающую существенное влияние на интенсификацию химических реакций в гетерогенных системах жидкость+твердый реагент; газ+твердый реагент.

Уравнение (III.1) – частное выражение закона сохранения энергии. До разрушения тело обладает потенциальной энергией, т.е. находится под воздействием внешних сил в состоянии упругой деформации.

Проведенные нами исследования по повышению надежности производства ронгалита (отбеливателя в текстильной промышленности) показали, что степень превращения исходных реагентов в ронгалит и производительность технологической линии можно существенно повысить, проводя активацию-измельчение одного из побочных реагентов – катализаторов цинкового

порошка. Цинковый порошок поступал в производство от трех производителей (из Югославии, Белгорода и Ивановской области). Порошок имел разную дисперсность и, соответственно, разную удельную поверхность контакта с реагентами.

Но даже самый тонкодисперсный и, в то же время, самый дорогой Югославский порошок не обеспечивал высокой степени превращения реагентов вследствие его низкой химической активности.

Исследования процесса активации и доизмельчения на различных типах измельчителей: вибрационной валковой и ударно-отражательной мельницах показали, что наименьшие удельные затраты энергии имеет разработанная в ИГХТУ на кафедре МАХП мельница ударно-отражательного принципа действия. После обработки в ней порошки цинка имеют наибольшую активность. Показано, что даже самый дешевый цинковый порошок после активации-измельчения в мельнице ударно-отражательного действия позволяет получать максимальный выход ронгалита при минимальном времени пребывания реагентов в реакторах идеального смешения при минимальных удельных затратах энергии и небольших капитальных затратах на приобретение и включение в технологическую линию измельчителя-активатора.

III.1.4. Постановка проблемы надежности процесса обжига сырья в производстве фосфора

Области применения фосфора и, особенно, его производных, весьма обширны: спички, синтетические моющие средства, сельское хозяйство (удобрения, кормовые средства), металлургия, металлообработка, нефтепереработка, водоподготовка и т.д. [31]. Фосфорная промышленность России базируется на природном сырье (фосфориты бассейна Каратау, апатитовые руды Хибин, фосфатное сырье Кировской области и другие). Для получения фосфора требуются высокие температуры, т.е. технология производства фосфора весьма энергоемкая. В настоящее время наибольшее распространение получил электротермический метод производства фосфора. Этот метод характеризуется многообразием физико-химических процессов, протекающих во всем этом довольно сложном производстве. Сложность технологии получения фосфора обусловлена качеством исходного сырья. Природные месторождения фосфатного сырья характеризуются невысоким содержанием P_2O_5 и сложным минеральным составом. Это определяет необходимость тщательной подготовки сырья, исследование процессов его термической обработки. Фосфорная промышленность нашей страны оснащена мощным уникальным оборудованием, позволяющим перерабатывать фосфатное сырье различного состава. Работники таких предприятий, ученые и специалисты в данной области выполнили большой объем работ по совершенствованию технологии производства фосфора, изысканию новых

методов получения фосфора и утилизации отходов производства, созданию безотходной технологии, повышению эффективности (экономичности) таких производств. Однако до сих пор отсутствуют исследования и разработка вопросов обеспечения надежности рассматриваемого производства.

Обеспечение надежности производства фосфора следует выполнять с начальной стадии этого производства, т.е. с подготовки сырья. Принципиальные схемы (пять вариантов) подготовки фосфатного сырья подробно излагаются в книге «Технология фосфора» [31]. Требования к качеству исходных материалов определяются двумя направлениями:

1) оптимальные показатели по сырью, поступающему на завод, которые обеспечиваются в процессе добычи и подготовки сырья.

2) оптимальные показатели по сырью (шихта), поступающему на стадию получения фосфора.

Параметры (показатели) качества сырья по первому направлению – процентное содержание P_2O_5 и примесей в сырье; гранулометрический состав; влажность; физико-химические (прочность, плавкость, спекаемость) свойства.

Параметры (показатели) качества шихты – процентное содержание P_2O_5 и примесей; гранулометрический состав; универсальный комплексный показатель качества (УКП).

УКП предложено Альперовичем И.Г., Ершовым В.А., Мухтаровым М.А. [8] можно выразить следующей формулой:

$$УКП = 3,7 P_2O_5 + 1,1 (SiO_2 + Al_2O_3) - 3,2 (Fe_2O_3 - 2,5) \geq 105 . \quad (III.2)$$

Обеспечение надежности процесса получения фосфора, в первую очередь, обуславливается, как было сказано выше, требованиями, предъявляемыми к качеству сырья, а, следовательно, параметрами (показателями) его качества, а также наличием параллельного протекания основному (например, процессу обжига) побочных процессов (ПП), влияющих (положительно или отрицательно) на надежность основного процесса.

При выводе УКП было принято [31], что изменение содержания P_2O_5 в руде компенсируется таким изменением количества SiO_2 , при котором добавка флюса снижается, разбавление фосфорита кварцитом уменьшается, а потому содержание P_2O_5 в конечной шихте остается постоянным. На содержание P_2O_5 в шихте оказывает влияние не только изменение количества SiO_2 , но и содержание окиси железа и потому УКП учитывает отклонение этого содержания от базового, равного 2,5%. Рассматриваемая формула предложена для оценки как фосфатного, так и кремнистого сырья и не устанавливает границ между этими видами сырья [4]. «Так, фосфорит, содержащий 25% P_2O_5 и 21% $(SiO_2 + Al_2O_3)$ и фосфатизированные кремни, содержащие 3,8% P_2O_5 и 95% SiO_2 , имеют $УКП = 115$ » [4]. Поэтому формула (III.2) представляет содержание исходного фосфатного сырья ($УКП = 105$), а $УКП = 115$ характеризует содержание флюсующей добавки.

Руды с повышенным содержанием окиси алюминия понижают температуру плавления шлака, склонны к спеканию и сводообразованию

(образованию «козлов») [32]. Снижает надежность процесса обжига (получения фосфора) присутствие в руде щелочных окислов (K_2O и Na_2O). Все вышеуказанные минералы понижают температуру начала деформации руды, что приводит к ухудшению технологического и электротехнического режимов работы печи, т.е. снижению надежности, в первую очередь, основного процесса. УКП не учитывает физико-химические и технологические свойства сырья, и это является недостатком в использовании УКП для оценки качества сырья и характеристики надежности процесса обжига.

Характеристиками (показателями) надежности ведения основного процесса получения фосфора (например, обжига) являются: а) показатели качества сырья, б) параметры основного процесса, в) параллельное протекание побочных процессов (ПП).

Для обеспечения надежности ведения процесса обжига следует:

а) обеспечить постоянство универсального комплексного показателя качества сырья на входе в печь обжига;

б) параметры ведения основного (обжиг) процесса также поддерживать постоянными за все время ведения процесса, что позволит свести к минимуму нежелательные побочные процессы (например, интенсивную агломерацию частиц), приводящие к останову процесса обжига.

На основе знания универсального комплекса показателя качества исходного сырья и условий процесса обжига в производстве фосфора получена оценка прогнозного значения надежности технологического процесса, процесса обжига сырья в производстве фосфора.

Прогнозирование на основе анализа информационных источников выполняется по рекомендациям В.Г. Гмошинского [19]. Прогноз выполняется на основании данных об отказах в производственной системе, наблюдавшихся за период t (с января по октябрь). Отказы происходили вследствие неисправности в системе: умягчения воды, в ферро-фосфатной летке, шихтоподготовки, в системе оборотной воды, системе грануляции, конденсации и т.д. Программное прогнозирование разработано на базе общей теории действия с операторами Л.Д.Ландау [24]. Прогнозируемая переменная (количество отказов) за время t : $\theta(t) = 1 + \overset{0}{V}$, где $\overset{0}{V}$ -кумулята скорости поступления информации. Операторное уравнение, обеспечивающее переход от ретроспективной (в данном случае исходной) информации к объекту прогнозирования: $\theta(t) = \theta_0 \cdot \Omega_1(t) \cdot \Omega_2(t)$, где $\Omega_1(t)$, $\Omega_2(t)$ – операторы, показывающие величину изменения прогнозируемого параметра (объекта) – $\theta(t)$. Оператор $\Omega_2(t)$ определяет порядок устранения отказов.

По методике [19]: $\Omega_1(t) = 1 + \overset{0}{V}$, $\Omega_2(t) = 1 + \sum_{i=n}^{i=n} I(i) \overset{0}{U}_i$, где

$\overset{0}{U}$ - относительная скорость обеспечения информацией;

$I(i) = \frac{i}{2^{i-1}}$; n – прогнозируемое число «поставок» - поступлений информации (отказов).

Относительную скорость появления отказов (дефектов) можно назвать темпом появления отказов: $\bar{V} = \bar{V}_i + \bar{V}_{i+1}$.

В данной модели рассматривается общее (сумма) количество отказов (дефектов) без учета их видов.

Численное решение таких уравнений (уравнения в частных производных) выполняется методом замены производных отношениями конечных разностей [26]. Расчеты выполняются по таблицам 1 и 2.

Таблица 5

Расчет относительной скорости появления отказов

Исходная информация (количество отказов за время t)	Скорость поступления информации	Кумулята скоростей (генерирование информации)	Оператор Ω_1	Относительная скорость появления отказов (информации)
V_i	$\nu_i^0 = \frac{2(V_{i+1} - V)_i}{V_{полн}}$	$\bar{V}_i^0 = \bar{V}_i + \bar{V}_{i+1}^0 + \bar{V}_{i+2}^0 + \dots$	$\Omega_1(i) = 1 + \bar{V}^0$	$\bar{V}_i = \bar{V}_i + \bar{V}_{i+1}$
$V_1 = 45$	$\nu_1^0 = \frac{2(60 - 45)_i}{262} = 0,1145$	$\bar{V}_1^0 = 0,1145$	1,1145	$\bar{V}_1 = 45$
$V_2 = 60$	$\nu_2^0 = 0,1069$	$\bar{V}_2^0 = 0,2214$	1,2214	$\bar{V}_2 = 60 - 45$
$V_3 = 36$	$\nu_3^0 = -0,1908$	$\bar{V}_3^0 = 0,0306$	1,0306	$\bar{V}_3 = -14$
$V_4 = 11$	$\nu_4^0 = 0,0305$	$\bar{V}_4^0 = 0,0611$	1,0611	$\bar{V}_4 = -25$
$V_5 = 15$	$\nu_5^0 = -0,0076$	$\bar{V}_5^0 = 0,0535$	1,0535	$\bar{V}_5 = 4$
$V_6 = 14$	$\nu_6^0 = 0$	$\bar{V}_6^0 = 0,0535$	1,0535	$\bar{V}_6 = -1$
$V_7 = 14$	$\nu_7^0 = -0,0209$	$\bar{V}_7^0 = 0,0306$	1,0306	$\bar{V}_7 = 0$
$V_8 = 11$	$\nu_8^0 = 0$	$\bar{V}_8^0 = 0,0306$	1,0306	$\bar{V}_8 = -3$
$V_9 = 11$	$\nu_9^0 = 0,1908$	$\bar{V}_9^0 = 0,2214$	1,2214	$\bar{V}_9 = 0$
$V_{10} = 34$	$\nu_{10}^0 = 0,0076$	$\bar{V}_{10}^0 = 0,3741$	1,3741	$\bar{V}_{10} = 23$
$V_{11} = 14$	$\nu_{11}^0 = -0,687$	$\bar{V}_{11}^0 = 0,3054$	1,3054	$\bar{V}_{11} = -20$
$V_{12} = 5$	$\nu_{12}^0 = 0,0229$	$\bar{V}_{12}^0 = 0,3286$	1,3286	$\bar{V}_{12} = -9$
$V_{13} = 2$	$\nu_{13}^0 = 0,0382$	$\bar{V}_{13}^0 = 0,3664$	1,3664	$\bar{V}_{13} = -3$
$V_{14} = 7$	$\nu_{14}^0 = 0,0763$	$\bar{V}_{14}^0 = 0,4428$	1,4428	$\bar{V}_{14} = 5$

$V_{15} = 17$	$\nu_{15}^0 = 0,3893$	$\bar{V}_{15}^0 = 0,8321$	1,8321	$\bar{V}_{15} = 10$
$V_{16} = 68$	$\nu_{16}^0 = -0,2443$	$\bar{V}_{16}^0 = 0,5878$	1,5878	$\bar{V}_{16} = 51$
$V_{17} = 36$	$\nu_{17}^0 = 0,2519$	$\bar{V}_{17}^0 = 0,8397$	1,8397	$\bar{V}_{17} = -32$
$V_{18} = 3$	$\nu_{18}^0 = 0$	$\bar{V}_{18}^0 = 0,8397$	1,8397	$\bar{V}_{18} = -33$
$V_{19} = 3$	$\nu_{19}^0 = 0,0840$	$\bar{V}_{19}^0 = 0,9237$	1,9237	$\bar{V}_{19} = 0$
$V_{20} = 14$	$\nu_{20}^0 = -0,1069$	$\bar{V}_{20}^0 = 0,8168$	1,8168	$\bar{V}_{20} = 11$
$V_{\text{полн.}} = 262$				

Таблица 6

Определение прогнозного значения надежности

n	$\bar{V}_i$	Нормирующая функция		Относительная скорость появления дефектов	
		$I(i)_{\max}$	$I(i)_{\min}$	$\bar{U}_{\max}^0$	$\bar{U}_{\min}^0$
1	45	0,25018	0,0000095	11,2581	0,000405
2	15	0,25018	0,0000181	3,7527	0,00027
3	14	0,18763	0,0000343	-2,62682	-0,000476
4	-25	0,12509	0,0000648	-3,125	-0,001625
5	4	0,07818	0,0001221	0,3112	0,000488
6	-1	0,04678	0,000229	-0,047	-0,000229
7	0	0,0273634	0,0004275	0	0
8	-3	0,015511	0,0004453	-0,0465330	-0,001335
9	0	0,0087562	0,0007505	0	0
10	23	0,0048784	0,0026769	0,1122032	0,061571
11	-20	0,0026769	0,0048784	-0,0535380	-0,09756
12	-9	0,0007505	0,0087562	-0,0067545	-0,078804
13	-3	0,0004453	0,015511	-0,0013359	-0,046533
14	5	0,0004275	0,0273634	0,0021375	0,137595
15	10	0,000229	0,04678	0,00229	0,47
16	51	0,0001221	0,07818	0,0062271	3,978
17	-32	0,0000648	0,12509	-0,0020736	-4,0
18	-33	0,0000343	0,18763	-0,0011319	-6,204
19	0	0,0000181	0,25018	0	0
20	11	0,0000095	0,25018	0,0001045	2,75198
		Σ 1	Σ 1	Σ 9,53	Σ -3,03

$$I(i) = \frac{i}{2^{i-1}}, \quad \sum_1^n I(i) = 3,99714,$$

$$I(i)_{\max} = \frac{I(i)}{\sum_1^n I(i)} = \frac{I(7)}{3,99714} = \frac{0,1093757}{3,99714} = 0,0273634,$$

$$U_{\max}^0 = \bar{V}_i \cdot I(i)_{\max} = \bar{V}_3 \cdot I(3)_{\max} = (-14) \cdot 0,18763 = -2,62682,$$

$$\Omega(i)_{\max} = 1 + U_{\max}^0 = 1 + 9,53 = 10,53,$$

$$\Omega(i)_{\min} = 1 + U_{\min}^0 = 1 + (-3,03) = -2,03$$

$U_{\max}^0 = \sum_{i=1}^n I(i)_{\max} \cdot \bar{V}_i$ отражает скорость появления дефектов (отказов) и равняется 9,53.

$U_{\min}^0 = \sum_1^n I(i)_{\min} = -3,03$ означает, что при определенных условиях система может работать безотказно.

$$\theta(t)_{\max} = \theta_0 \cdot \Omega(i)_{\max}$$

$$\theta(t)_{\min} = \theta_0 \cdot \Omega(i)_{\min}$$

$$\theta_0 = 1$$

$$\theta(t)_{\max} \cong 10,53$$

$$\theta(t)_{\min} \cong -2,03$$

Анализ расчетных данных (величины $\nu_i^0, \bar{V}_i^0, U^0$) указывает на то, что отрицательные значения этих величин, нулевые или минимальные (близкие к 0), наблюдаются по тем видам отказов, которые не играют значительную роль в работе всей системы, в данном случае – в работе фосфорного подразделения химического производства.

III.2. Побочные процессы

III.2.1. Причины происхождения и механизм процесса агломерации

Особенности технологических систем определяются тем, что это сложная динамическая система, в которой в единый комплекс объединены оборудование, средства контроля и управления, вспомогательные и транспортные устройства, обрабатывающий инструмент (приспособления, средства) и наконец, люди, осуществляющие процесс [18].

Технологические системы обладают свойствами, которые облегчают задачу обеспечения высокой надежности технологического процесса. Во-первых, возможность изменять структуру системы и ее элементов, вводить дополнительный контроль, разбивать операции на ряд переходов, изменять режим работы, что непосредственно отражается на надежности технологического процесса. Во-вторых, технологические системы могут обладать свойствами саморегулирования и при изменении условий, в которых протекает технологический процесс, автоматически или за счет

целенаправленных действий людей изменять свои параметры, обеспечивая требуемый уровень надежности [18].

Надежность ХТП во многих случаях определяется наличием побочных процессов, протекающих при осуществлении основных процессов. Интенсивное протекание побочных процессов зачастую приводит к остановке производства, т.е. технологическому отказу. Все эти виды отказов взаимосвязаны и взаимозависимы. Мало изученными, но имеющими особую значимость в надежности ХТП, являются отказы, зависящие от физикохимии побочных процессов. Их происхождение находится в прямой зависимости от основного процесса.

Оптимизация и устойчивость химико-технологических процессов с участием твердой фазы, а, следовательно, их надежность весьма часто определяются гранулометрическим составом твердой фазы материала, используемого для ведения ХТП. В промышленной практике широко используется техника псевдоожиженного (кипящего, взвешенного) слоя в качестве одного из действенных средств интенсификации производства. Примером этому является проведение целого ряда процессов в кипящем слое: обжиг руд концентратов, сушка различных материалов, производство катализаторов и активированных углей, разделение газов сорбционными методами, грануляция материалов, кристаллизация вещества из водных растворов, контактно-каталитические процессы и т.д. При обработке зернистых материалов наряду с основными процессами, в той или иной степени, протекают сопутствующие (побочные) процессы, часто способствующие изменению грансостава материала. "Это свойственно процессам, проводимым как в неподвижном, так и в псевдоожиженном слое. В зависимости от рода проводимых процессов укрупнение частиц твердого компонента можно рассматривать как положительное или же, как отрицательное явление, повышающее или понижающее надежность основного процесса.

При оптимизации проводимых химико-технологических процессов, а также при разработке новых ХТП, обеспечении их устойчивости, надежности необходимо в обязательном порядке учитывать побочные процессы, приводящие к изменению, например, гранулометрического состава обрабатываемого материала. В противном случае процесс может полностью прекратиться, т.к. весьма часто укрупнение размеров частиц за счет их агломерации является отрицательным побочным процессом. Такое явление ведет к большим материальным потерям, например, в производстве гранулированных сложных удобрений (нитрофоски, аммофоса, аммофоски) в БГС (барабан-гранулятор-сушилка), а также по двухступенчатой системе их получения: барабанный гранулятор - барабанная сушилка. Резкое повышение содержания крупных фракций на выходе из сушилок приводит к увеличению потока материала, направляемого после грохота на дробилку, превышающего ее предельную производительность. Превышение потока крупных фракций более производительности дробилки для исключения «завала» технологической

линии (т.к. производительность по готовому продукту более 100 т/ч) требует от аппаратчиков смены мгновенного снижения расходов исходных компонентов, что, естественно, ведет к уменьшению общей производительности линий по готовому продукту, а, в предельных случаях, и к остановке производства.

В ряде случаев интенсивная агломерация может играть и положительную роль. Например, для укрупнения фракций шихты при переработке смеси продуктов обжига (огарка, выгруженного через порог обжиговой печи; пыли, улавливаемой в циклоне, электрофильтрах).

Причин, приводящих к изменению размеров частиц материала может быть несколько, например, объединение двух или нескольких частиц в одну (процесс агломерации); дробление на несколько частиц; наращивание или снятие материала с одиночной частицы.

III.2.2. Классификация процессов агломерации

На основе сведений по изменению гранулометрии псевдоожиженного слоя в различных технологических процессах нами была предложена классификация процессов агломерации частиц в кипящем слое:

- 1) по причинам, вызывающим агрегирование частиц;
- 2) по механизму агломерации;
- 3) по кинетике процесса: аддитивный и самоускоряющийся характер агрегирования частиц;
- 4) по свойствам образовавшихся агломератов: обратимая и необратимая агломерация;
- 5) по зависимости от свойств системы и условий ведения процессов:
 - а) типа технологического процесса;
 - б) физико-химических особенностей системы;
 - в) режима работы установок (параметров процесса: температуры и скорости газа, концентрации твердого и газообразного компонентов и т.д.);
 - г) характеристик обрабатываемого материала, т.е. его полидисперсности, формы частиц, состояния их поверхности и т.д.;
 - д) особенностей конструкции аппарата (газораспределительного устройства, места и способа ввода материала и газа и т.д.).

Агломерация частиц может происходить: 1) за счет слипания частиц вследствие оплавления их поверхности при наличии локальной зоны повышенной температуры в процессах тепловой обработки материалов; 2) вследствие быстрого удаления влаги при сушке легко растворимых и быстро кристаллизующихся продуктов, приводящего к соединению частиц кристаллизационными мостиками твердой фазы; 3) за счет склеивания зерен материала пылью и различными коллоидными частицами, содержащимися во влаге, внесенной в слой материала; примесями, содержащимися в материале или внесенными в слой материала и адсорбирующимися на частицах продукта; 4) вследствие образования статического электричества.

Агломерация – это процесс объединения за счет появления или наличия жидкой фазы нескольких частичек в одну при их столкновении.

а) жидкости как таковой (вода, раствор);

б) расплава материала самих частичек при ведении процесса в кипящем слое [33].

Рассмотрим агломерацию в кипящем слое. Если пренебречь теми весьма редкими столкновениями, в которых участвуют более чем две частицы, то можно утверждать, что процесс агломерации начинается с объединения двух частиц в одну. В зависимости от того, какая доля частиц псевдоожиженной системы подверглась слипанию, можно отметить три стадии этого процесса:

1. Начальное состояние.

В этом случае агломераты непрочные, быстро разрушаются под влиянием ударов от столкновения с частицами слоя. В такой стадии агломерация не вызывает резкой неоднородности, не влияет отрицательно на ход процесса.

2. Развитая агломерация.

В такой стадии агрегирования образующиеся агломераты довольно прочны и при столкновении с частицами слоя, а также между собой, особого разрушения не претерпевают. В данном случае качество, например, псевдоожижения ухудшается. Это, в свою очередь, ведет к еще более интенсивному объединению частиц. При этом могут слипаться между собой не только частицы исходного размера, но и агломераты. Размер агломератов может возрасти до критического.

3. Залипание.

Агломераты, выросшие до критического размера, уже не могут поддерживаться во взвешенном состоянии псевдоожижающим агентом, имеющим определенную скорость, они осаждаются на газораспределительную решетку. С этого момента начинается залипание всего слоя.

Над осевшим агломератом образуется застойная зона, куда устремляются другие агломераты и частицы. И в стационарном, и в кипящем слое вследствие ухудшения теплообмена, масса частиц и агломератов сильно перегревается, начинается ее расплавление. В этой стадии процесс псевдоожижения останавливается. Такое аварийное состояние системы может быть ликвидировано только путем разборки аппарата (машины), и его чистка зачастую осуществляется ручным способом. Остановка аппарата и всей технологической цепочки, ремонт аппарата приводит к большим материальным потерям.

Наши экспериментальные исследования псевдоожиженных систем термолабильных частиц при температурах слоя, близких к их плавлению, позволили сделать определенные выводы о причинах изменения грансостава обрабатываемого материала, т.е. о причинах появления и протекания побочного процесса агломерации, снижающего надежность основного процесса и ухудшающего качество продукции.

III.2.3. Закономерности процесса агломерации в аппарате с ПС

Неоднородность псевдоожижения – основное условие агломерации. Структура псевдоожиженного слоя в значительной степени влияет на возможность образования агломератов частиц. Наиболее благоприятные условия для их возникновения создаются при неоднородности псевдоожижения. Механизм агломерации в псевдоожиженном слое может быть описан следующим образом.

В области, близкой к началу псевдоожижения, твердые частицы, склонные к агрегированию, образуют слой со сквозными каналами. Газ проходит по этим каналам, оставляя практически неподвижной основную массу твердого материала, с ростом скорости газа каналы исчезают. При псевдоожижении мелких влажных или склонных к слипанию материалов разрушить каналы оказывается невозможно даже при весьма высоких скоростях. Именно в таких условиях возможно укрупнение частиц. В системе с развитым псевдоожижением равномерное распределение частиц внутри слоя не всегда является устойчивым, и нарушение его равномерности может не восстановиться. Известно, что сила гидравлического сопротивления, действующего на частицу, пропорциональна квадрату скорости потока и плотности среды. Если предположить, что одна из частиц отклонилась от положения равновесия, т.е. расстояние между частицами уменьшилось, то в сужившемся пространстве скорость потока возрастет, а давление в потоке, по закону Бернулли, снизится [34]. Под действием возникших перепадов давления частицы будут сближаться, тем самым далее увеличивая неоднородность распределения твердой фазы. Общая картина еще более усложняется при образовании сгустка из большого числа сблизившихся частиц. Силы трения будут действовать лишь на поверхности сгустка со сторон обтекающего его потока. В таком случае силы трения перестанут уравнивать сгусток, и он начнет спускаться на распределительную решетку, будет являться очагом «залипания», завала псевдоожиженного слоя, т.е. может произойти отказ при ведении технологического процесса.

На устойчивость, надежность работы псевдоожиженного слоя оказывает влияние характер тепло- и массообмена. А.В.Лыков [35] показал, что перенос тепла и вещества нельзя рассматривать отдельно, независимо друг от друга, а только в их взаимосвязи. Наихудший теплообмен имеет место в тех средах, где наиболее ярко выражено агрегирование. Температура в сгустке может достигнуть температуры плавления материала. Возникающие локальные зоны перегрева являются основной причиной развития агломерации, вследствие появления жидкой фазы в этих зонах. К колебаниям теплового равновесия ведет уменьшение пористости системы. Рост температуры изменяет соотношение твердой и жидкой фаз в пользу последней, а это, в свою очередь, стимулируют агрегирование частиц.

Известно, что при движении капель жидкой фазы слоя увеличение их концентрации в системе приводит к слипанию отдельных капель или к объединению при столкновении твердых частиц системы, на которых есть жидкая пленка. Количественно довольно трудно оценить влияние вводимой с псевдоожижающим агентом влаги на устойчивость псевдоожижения. Наличие капиллярных мостиков влаги между зернами увеличивает их сцепление. Для хорошо сорбирующих влагу зерен, поглощенная ими до определенного предела влага, концентрируется внутри частиц и не влияет на равномерность псевдоожижения. Это явление подтвердили М.Э.Аэров и О.М.Тодес [34], проводя опыты с частицами стекла, диаметр которых составлял 20 мкм. Слой частиц стекла хорошо ожижался сухим воздухом, при продувании влажного воздуха через некоторое время частицы начинали комковаться, и псевдоожижение прекращалось.

Еще одной из причин агломерации частиц можно назвать появление в псевдоожиженном слое статического электричества. Уже при засыпке материала в аппарат из-за взаимного трения частицы электризуются по своей поверхности зарядами различного знака. Электризация движущихся частиц возникает и в псевдоожиженном слое при трении их друг о друга и о стенки аппарата. Вследствие электризации происходит соприкосновение частиц с различными зарядами, а затем и их агломерация.

III.2.4. Расчет движущей силы процесса агломерации частиц

Для более глубокого проникновения в физико-химические причины обеспечения надежности технологических процессов, в которых может возникать агломерация частиц, необходимо знать, что является движущей силой этого явления.

В процессах термообработки термолабильных плавящихся материалов появление жидкой фазы зависит от наличия в слое материала зон с температурами большими или равными температуре размягчения или плавления вещества (так называемой реперной температуре t_p). В зонах локальных перегревов слоя происходит процесс агломерации частиц, и чем больше таких зон в слое, тем интенсивнее процесс слипания частиц.

Следовательно, показателем величины движущей силы агломерации в аппарате КС будет количество зон (относительных объемов) с реперной температурой. Для определения движущей силы процесса агломерации интерес представляет только та часть обрабатываемого материала, где температура t_i выше реперной t_p , поскольку движущая сила процесса агломерации предполагает наличие объемов материала с $t_i \geq t_p$.

Если весь объем обрабатываемого материала V разделить на частичные объемы V_i т.е. $V = \sum_{i=1}^n V_i$, то каждый локальный объем материала V_i будет иметь температуру t_i .

Согласно теории вероятностей, момент относительно произвольной точки в общем виде определяется как

$$\gamma_a = \sum_{i=1}^n (x_i - b)^a n_i \quad \text{- для прерывной величины } x;$$

$$\gamma_a = \int_a^S (x_i - b)^a f(x) dx \quad \text{- для непрерывной величины } x,$$

где a - порядок момента.

Таким образом, можно предположить, что движущая сила будет выражаться уравнением:

$$\xi = \mu_a = \sum_{i=1}^{i=n} (t_i - t_p)^a V_i^{\text{отн}}, \quad (III.3)$$

$$\text{где } V_i^{\text{отн}} = \frac{V_i}{V}.$$

Зависимость скорости агломерации от движущей силы: $\frac{dN}{d\tau} = f(\xi)$ выражается графически в большинстве случаев в виде прямой линии [46] и имеет минимальный разброс η точек около этой прямой только при определенном значении «а»:

$$\eta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left[\frac{(dN/d\tau)_i - k \mu_a}{k \mu_a} \right]^2}{n}}, \quad (III.4)$$

где η - среднее квадратическое относительное отклонение;

$dN/d\tau$ - скорость агломерации, шт./мин.;

n - число точек на графике;

k - тангенс угла наклона прямой зависимости $dN/d\tau = f(\xi)$.

Подход к расчету движущей силы агломерации будет аналогичен для всех технологических процессов, осуществляемых в псевдооживленном слое. Важно лишь определить, какой параметр процесса будет создавать движущую силу процесса агломерации, которая часто выступает основной характеристикой надежности основного технологического процесса.

III.2.5. Математическая модель агломерации частиц при ведении химико-технологических процессов в подвижной и неподвижной средах

Падохин В.А. [36] описывает физическое явление агрегирования с помощью математической модели «рождение – гибель» частиц - агломератов применительно к процессам сушки, кристаллизации, где агломерация наблюдается как побочный процесс, вредный для основного.

Раскрытие сущности процесса агломерации в любой физической системе наиболее удобно описывать с помощью математической модели кинетики этого процесса. Кинетические закономерности процесса агрегирования, как предлагает В.В.Стрельцов [37], обязательно следует учитывать при расчете промышленных кристаллизаторов.

Для описания закономерностей агрегирования (кинетика агломерации, движущая сила этого явления, интенсификация и т.д.) можно воспользоваться следующей разработанной нами математической моделью. Кинетика образования единичных агрегатов может быть описана так:

$$\frac{dN}{d\tau} = K \xi V, \quad \text{шт/сек} \quad (\text{III.5})$$

где N - число агломератов в системе, шт.;

τ - время ведения процесса, с. (мин, ч).

$$\xi = \sum V_i^{omn} (t_i - t_p) - \text{движущая сила процесса агломерации, } (^\circ\text{C})^2 \cdot \text{м} \quad (\text{III.6})$$

Необходимо отметить, что суммируются только те члены (частичные объемы), где $t_i \geq t_p$.

V - характеристика масштаба аппарата (его объем) является экстенсивной характеристикой процесса агломерации.

K - коэффициент интенсивности процесса агломерации зависит от физико-химических и механических свойств твердого материала, параметров химико-технологического процесса, особенностей аппарата, где осуществляется ХТП.

Размерности K :

$$[K] = \frac{dN}{d\tau} \frac{1}{\xi V}, \quad \frac{\text{шт.}}{\text{с.} \cdot (^\circ\text{C})^2 \cdot \text{м}^3}$$

при условии $V = \sum V_i = 1$:

$$[K] = \frac{dN}{d\tau} \frac{1}{\xi}, \quad \frac{\text{шт.}}{\text{с.} \cdot (^\circ\text{C})^2 \cdot \text{м}^3}$$

Если система (слой) твердого материала состоит из агломератов различного размера, то необходимо ввести концентрацию агломератов:

$$\frac{dN_{i+1}}{d\tau} = K_{i+1} \xi \frac{G_i}{G_c},$$

где G_i - вес агломератов размера, обозначенного индексом i , кг;

G_c - общий вес всего материала слоя, кг.

Предполагаем, что число образующихся агломератов зависит прямо пропорционально от числа агломератов, из которых они могут образоваться путем присоединения единичной (исходной) частицы. При рассмотрении задачи в такой постановке будем полагать, что:

- 1) агрегаты растут за счет последовательного добавления единичных частиц (объединение двух-, трех и более агрегатов не происходит);
- 2) константа скорости (коэффициент интенсивности) K_{i+1} зависит от величины исходного (предшествующего) агломерата;

m_i - масса или вес агломерата g_i

$$K_{i+1} = \varphi(m_i);$$

- 3) после достижения критического размера ($d_{кр}$, $m_{кр}$, $g_{кр}$) дальнейший рост агломерата прекращается или идет по другому закону, вследствие изменения поведения частицы (в процессах с псевдооживленным слоем агломерат критического размера ложится на распределительную решетку);
- 4) разрушением агломератов пренебрегаем.

Тогда время от начала процесса агломерации до появления агломерата критического размера может быть определено с помощью следующей системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_1}{d\tau} &= K_1 \xi V \frac{G_0}{G_c} - K_2 \xi V \frac{G_1}{G_c} \\ \frac{dN_2}{d\tau} &= K_2 \xi V \frac{G_1}{G_c} - K_3 \xi V \frac{G_2}{G_c} \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{dN_i}{d\tau} &= K_i \xi V \frac{G_{i-1}}{G_c} - K_{i+1} \xi V \frac{G_i}{G_c} \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{dN_n}{d\tau} &= K_n \xi V \frac{G_{n-1}}{G_c} \end{aligned} \right\} \quad (III.7)$$

N_n - число исходных частиц, образующих агрегат размером d_n , m_n , g_n , если речь идет об агломератах с критическими свойствами, то

$$N_{кр} = \frac{\pi d_{кр}^3 \rho}{6 m_0} \text{ шт. в агрегате,} \quad (III.8)$$

m_0 - масса исходной частицы.

III.2.6. Методика повышения надежности основного химико-технологического процесса (ХТП), осложненного побочным процессом (ПП) агломерации

Данная методика была разработана в соответствии с общим подходом к методике повышения надежности. Методика должна включать в себя три этапа:

I этап. Исследование ХТП с целью выявления «узких мест» в процессе (например, отказы технологические, технические или организационные). Этот этап состоит из двух направлений исследования ХТП:

- 1) обследование ХТП:
 - а) дать перечень и классификацию процессов производства,
 - б) выявить такие ХТП, в которых происходят отказы;
 - в) определить причину отказа, его сущность, закономерности отказов, приводящих к последнему;
 - г) рассчитать оптимальный технологический режим с использованием в качестве целевой, функции максимума производительности, при этом предполагаются заданными степень чистоты и гранулометрический состав получаемого продукта.
- 2) обследование химико-технологического оборудования (ХТО) проводится одновременно с обследованием ХТП, осуществляемом в этом оборудовании:
 - а) дать перечень оборудования данного производства и его классификацию по группам сложности;
 - б) выявить ХТО, в котором происходят отказы;
 - в) определить причину отказа, его физико-механические закономерности;
 - г) выбрать и рассчитать оборудование, обеспечивающее проведение ХТП в оптимальном режиме с максимальной надежностью.

II этап. По результатам проведенных исследований и предварительных расчетов разрабатываются мероприятия, повышающие надежность производства. Можно назвать основные из значительного количества мероприятий, способствующих повышению надежности ХТП:

- 1) прогнозирование надежности ХТП и ее профилактика;
- 2) разработка математической модели надежности основного ХТП, осложненного побочными процессами:
 - а) математическая модель на основе теории графов;
 - б) математическая модель на базе теории вероятностей;
 - в) использование какого-либо другого математического аппарата для разработки модели.
- 3) усовершенствование работающих ХТП (устранение причин отказов);
- 4) разработка и внедрение новых ХТП (высокоэффективных, интенсивных и безотказных);
- 5) повышение надежности ХТО:

а) при конструировании (разработка новых конструкций, обязательное включение в методику расчета конструкций показателей надежности, прогнозирование надежности в работе новых конструкций и т.д.);

б) при изготовлении (использование новых приспособлений, оснастки, инструмента, применение прогрессивных методов в организации труда, обязательная оценка качества изготовления машин или аппаратов и т.д.);

в) при эксплуатации (внедрение новых конструкций, повышение надежности действующего ХТО, обеспечение надежности ХТО при его ремонте, обеспечение соответствующей организации труда обслуживающего персонала и т.д.);

III этап. Необходимое проведение организационных и технико-экономических мероприятий.

- 1) разработка блок-схемы для расчета на ЭВМ технико-экономического обоснования (ТЭО) надежности ХТП и ХТО;
- 2) разработка и использование в работе оценочных показателей работы ХТО и ХТП;
- 3) проведение технико-экономического обоснования повышения надежности производства;
- 4) создание и внедрение системы управления надежностью ХТП и ХТО;
- 5) разработка и внедрение единой документации учета и отчетности для анализа надежности ХТП и ХТО при конструировании, изготовлении и эксплуатации.

Все указанные вопросы методики взаимосвязаны и сложны с точки зрения полного математического описания. Объективность и точность методики расчета надежности химико-технологических процессов и оборудования определяется степенью изученности этих процессов.

В ранее проводимой работе по изучению закономерностей явления агрегирования [36] была применена для описания кинетики агломерации модель «рождения и гибели», учитывающая параллельно протекающий процесс дробления агломератов и частиц и позволяющая определить вероятность того или иного процесса.

$$P_x(\tau\tau = [1 - \alpha(\tau)][1 - \beta(\tau)][\beta(\tau)]^{x-1},$$

$$P_0(\tau\tau = \alpha(\tau),$$

где $\alpha(\tau)$ - случайная величина, характеризующая число агломератов в момент времени τ ;

$$\alpha(\tau) = \frac{\mu (e^{(\lambda-\mu)\cdot\tau} - 1)}{\lambda e^{(\lambda-\mu)\cdot\tau} - \mu},$$

$$\beta(\tau) = \frac{\lambda (e^{(\lambda-\mu)\cdot\tau} - 1)}{\lambda e^{(\lambda-\mu)\cdot\tau} - \mu},$$

$P_x(\tau)$ - вероятность изменения грансостава;

$P_0(\tau)$ - вероятность критического режима процесса, когда образуется критическое число агломератов, останавливающее основной процесс;

λ , μ - коэффициенты интенсивности, соответственно, агломерации и дробления.

Воспользуемся этой моделью для определения вероятности отказа при $\lambda = K_i = 1,4$. Примем $\mu = 1$ для случая, когда измельчение отсутствует, считая, что агрегирование является нежелательным процессом.

$$\alpha(\tau) = \frac{\mu \left(1 + \frac{y \tau}{1!} + \frac{(y \tau)^2}{2!} - 1 \right)}{\lambda \left(1 + \frac{y \tau}{1!} + \frac{(y \tau)^2}{2!} \right) - \mu},$$

здесь $y = \lambda - \mu = 1,4 - 1,0 = 0,4$. Если $\tau = 35$ мин, тогда

$$\alpha(\tau) = \frac{1 \left(1 + \frac{0,4 \cdot 35}{1} + \frac{(0,4 \cdot 35)^2}{2} - 1 \right)}{1,4 \left(1 + \frac{0,4 \cdot 35}{1} + \frac{(0,4 \cdot 35)^2}{2} \right) - 1} = 0,7,$$

$\beta(\tau) \approx 0$.

Итак, $P(\tau) = \alpha(\tau) = 0,7$

Вероятность отказа при интенсивности процесса агломерации $K_i = 1,4$ составит 70 %, т.е. при таких условиях процесс работает в критическом режиме.

III. 3. Процесс кристаллизации и обеспечение его надежности.

III.3.1. Механизм и закономерности кристаллизации

Кристаллизация из раствора, кристаллизация из расплава – весьма широко распространенные процессы в химической промышленности. Кристаллизация применяется для производства солей и ряда других веществ, для получения в чистом виде твердых веществ путем их кристаллизации. В производстве ронгалита также применяется процесс кристаллизации с целью получения ронгалита в твердом мелкодисперсном состоянии.

Процесс кристаллизации, как известно, состоит из двух стадий – образования зародышей кристаллов и роста кристаллов. И вот уже здесь, в механизме процесса кристаллизации, закладываются основы надежности этого процесса. В зависимости от требований, устанавливаемых человеком к этому процессу, следует усиливать (увеличивать) либо скорость зародышеобразования, либо рост кристаллов.

Если скорость образования зародышей больше скорости их роста, получается большое количество мелких кристаллов. Если же скорость роста больше скорости образования зародышей, получается меньшее количество крупных кристаллов. Изменяя факторы, влияющие на скорость образования

зародышей и скорость их роста, можно регулировать размеры кристаллов. Быстрое охлаждение, перемешивание раствора, высокая температура и низкий молекулярный вес кристаллов способствуют образованию зародышей и получению мелких кристаллов. Наоборот, медленное охлаждение, неподвижность раствора, низкая температура, высокий молекулярный вес способствуют процессу роста и получению крупных кристаллов [6].

Кристаллизация может быть ускорена внесением затравки мелких частиц кристаллизующегося вещества, которые и являются зародышами кристаллов. В этом случае кристаллизация происходит в основном за счет роста внесенных в раствор затравочных кристаллов. Для получения крупных кристаллов число затравочных кристаллов должно быть невелико.

Весьма часто размеры кристаллов являются одной из основных характеристик качества продукта, а, следовательно, и одним из параметров надежности процесса кристаллизации. Размеры кристаллов имеют значение для последующего использования кристаллического продукта (вещества) и его обработки в различных технологических процессах.

Крупные кристаллы легче высушиваются, отстаиваются, отфильтровываются, промываются и удерживают меньше влаги при фильтровании и промывке [6]. Мелкие кристаллы легче растворяются и обычно чище, чем крупные. Мелкие кристаллы, особенно кристаллическая пыль, способствуют слеживанию продукта. Поэтому во избежание слеживания следует получать либо крупные кристаллы, либо мелкие кристаллы одинакового размера. Однородность размеров кристаллического продукта также является одной из характеристик его качества.

Предложенная нами выше математическая модель процесса агломерации частиц псевдоожиженного слоя с достаточной степенью достоверности может быть использована для описания кристаллизации из растворов.

III.3.2. Способы кристаллизации

Кристаллизация из растворов

Пересыщение или переохлаждение является движущей силой процесса кристаллизации. Пересыщенными растворами называются растворы, концентрация которых превышает равновесную концентрацию (растворимость). Для характеристики степени пересыщения используются три величины: абсолютное пересыщение, относительное пересыщение и коэффициент пересыщения.

Кристаллизация из растворов основана на ограниченной растворимости твердых веществ. Раствор, содержащий максимальное количество растворенного вещества в данном количестве растворителя при определенной температуре, называется насыщенным. Если раствор содержит большее количество растворенного вещества, то он является пересыщенным, если же он

содержит меньшее количество растворенного вещества, то он является ненасыщенным.

Пересыщенные растворы неустойчивы: из них выделяется избыточное количество растворенного вещества, т.е. происходит процесс кристаллизации. После выделения кристаллов раствор становится насыщенным. Этот насыщенный раствор, полученный в процессе выделения кристаллов, называется маточным раствором или маточником. Отделение маточного раствора от кристаллов производится центрифугированием и другими методами. Насыщенные растворы сами по себе устойчивы, но при добавлении в такой раствор твердого вещества оно будет растворяться до тех пор, пока раствор не станет насыщенным. Твердое вещество находится в равновесии с насыщенным раствором. Растворимость равна концентрации насыщенного раствора и зависит от температуры, а также от свойств растворяемого вещества и растворителя. Для большинства твердых веществ растворимость с повышением температуры возрастает, но для некоторых веществ она с повышением температуры уменьшается или имеет при определенной температуре максимальное значение.

Для проведения процесса кристаллизации из растворов пользуются следующими способами создания пересыщенных растворов:

1. Охлаждение растворов применяется для кристаллизации веществ, растворимость которых заметно уменьшается с понижением температуры, а также для кристаллизации из расплавов.

2. Испарение части растворителя применяется для кристаллизации веществ, растворимость которых увеличивается или незначительно уменьшается с понижением температуры: испарение производится при кипении раствора в выпарном аппарате или путем испарения при температуре ниже точки кипения.

3. Комбинированный способ заключается в одновременном охлаждении и испарении части растворителя.

4. Кристаллизация может производиться также путем высаливания, т.е. добавления в раствор веществ, понижающих растворимость выделяемой соли. Такими веществами являются вещества, связывающие воду (кристаллизация сульфата натрия при добавлении спирта или аммиака) или соединения, содержащие одинаковый ион с данной солью (кристаллизация хлористого натрия при добавлении хлористого магния, кристаллизация медного купороса при добавлении концентрированной серной кислоты).

Рассмотренные способы создания пересыщенных растворов широко используются при ведении процессов кристаллизации в различных отраслях промышленности. Охлаждение растворов для кристаллизации веществ имеет место, например, в металлургии; второй способ (испарение части растворителя) применяется в химической, пищевой, производстве строительных материалов и других отраслях промышленности. В текстильной и легкой промышленности для крашения тканей, трикотажа, кожи, изделий из них применяется третий

(комбинированный) способ получения пересыщенных растворов. Высаливание (четвертый способ) применяют для получения чистых веществ.

Кристаллизация расплавов на охлаждаемой поверхности

Данный способ получения твердого продукта можно осуществить, применяя кристаллизаторы с внутренним охлаждением (валковые кристаллизаторы).

Для системного исследования процесса в валковом, ленточном кристаллизаторах можно выделить четыре рабочие зоны [39].

В 1-й зоне происходит процесс кристаллизации на поверхности охлаждаемой стенки, погружающейся в расплав. Во 2-й зоне протекает два процесса: увлечение пленки расплава вращающейся поверхностью и ее кристаллизация. Охлаждение закристаллизовавшегося слоя до заданной температуры и сьем слоя кристалла происходит в 3-й зоне и охлаждение стенки вальца (стабилизация ее температуры) в 4-й.

Таким образом, структурную схему каждого из рассматриваемых кристаллизаторов можно представить состоящей из 4-х аппаратурно-процессных единиц (АПЕ), условно названных кристаллорастителем, отвердителем, холодильником, термостабилизатором.

Для удобства эксплуатации в промышленных условиях обычно перерабатываются несколько перегретые расплавы. Дополнительное оснащение ванн вальцевых кристаллизаторов рубашками позволяет для практических расчетов температуру расплавов считать постоянной.

III.3.3. Математическая модель процесса кристаллизации с элементами теории надежности

Современные методы решения задач интенсификации промышленного производства требуют широкого применения математических моделей процессов с целью оптимизации и повышения надежности проектных решений. Методика расчета и проектирования кристаллизационных установок предполагает постановку и решение определенных инженерных задач. Например, таких как расчет оптимального технологического режима ведения процесса, проработка схемных решений, выбор и расчет технологического оборудования. Методика расчета надежности при проектировании кристаллизационных установок определяется степенью изученности не только макрокинетики процесса, но и микрокинетики элементарных процессов (первичное и вторичное зародышеобразование, рост кристаллов, их дробление и агрегирование, классификация, промывка, возможность инкрустации и т.д.). Изучение указанных вопросов осложняется стохастичностью их протекания. Поэтому методы подхода к изучению проблемы и математическому описанию процессов должны быть и детерминированными и вероятностными.

Решение полученной системы требует задания начальных и граничных условий, а это возможно лишь при изучении элементарных составляющих

процесса. Однако наличие математической модели с элементами теории надежности в общем случае позволяет с достаточной достоверностью перенести результаты лабораторных исследований вплоть до промышленных условий. Все вышеизложенное дает возможность своевременно получить исходный материал для расчетов с учетом внутренних связей и определить главные условия в технической реализации процесса. Аналогичные результаты можно получить для всех видов затрат на осуществление процесса, включая технико-экономические показатели оптимальности.

За основу построения модели было взято уравнение изменение производительности кристаллов заданного размера по готовой продукции. В общем виде эта зависимость описывается следующим уравнением:

$$\frac{dQ}{d\tau} = f\left(J, \frac{dq_p}{d\tau}, \lambda_{\text{агл}}, \lambda_{\text{дробл}}\right), \quad (\text{III.9})$$

где J - скорость зародышеобразования;

$dq_p/d\tau$ - скорость роста кристаллов;

$\lambda_{\text{агл}}$ - скорость роста кристаллов за счет агломерации;

$\lambda_{\text{дробл}}$ - скорость дробления кристаллов.

В понятие надежности процесса кристаллизации и работы кристаллизационного оборудования кроме стабильной производительности по выходу кристаллов заданного размера необходимо включить также и такие показатели: 1) определенная чистота продукта, (min % примесей), 2) оптимальные (и даже min) расход электроэнергии, тепла, холода, растворителя и т.д.

Скорость зародышеобразования – величина весьма сложная и зависящая более чем от десятка факторов. На нее оказывают влияние физико-химические свойства вещества и растворителя, параметры процесса, режим работы установки и ее конструктивные особенности.

Скорость зародышеобразования можно описать:

$$J = K (C - C_0)^m, \quad (\text{III.10})$$

где K , m - постоянные, зависящие от физико-химических свойств растворенного вещества и растворителя, например, таких как произведение валентностей ионов вещества, число молекул кристаллогидратной воды, тип кристаллической решетки и т.д.;

C_0 - абсолютная растворимость вещества или концентрация насыщенного раствора для данных условий;

C - действительная концентрация вещества в пересыщенном растворе.

Скорость роста кристаллов описывается в общем виде следующей зависимостью:

$$\frac{dq_p}{d\tau} = f(\Pi_c, V_{\text{пер}}, t^0 C, Q_{\text{пр}}, F_{\text{инкр}}). \quad (\text{III.11})$$

От величины устойчивости пересыщения будет зависеть форма образующихся кристаллов Φ_k , которая является одним из показателей качества получаемого продукта.

В непосредственной близости от стенки аппарата (кристаллизатора, кристаллорастителя, трубопроводов) основной процесс идет несколько иначе (медленнее), а это позволяет побочным процессам развиваться быстрее. Этим и обуславливается процесс инкрустации, который снижает надежность основного процесса кристаллизации, т.е. замедляет скорость роста кристаллов, изменяет их форму, увеличивает наличие примесей в готовом продукте (товарных кристаллах), вследствие перехода полезной части раствора в инкрустационный слой. Второстепенный (побочный) процесс инкрустации влияет на пересыщение и может являться главной причиной изменения производительности по выходу кристаллов заданного размера. В этой связи необходима разработка математической модели для описания побочных явлений в кристаллизаторах [38-40].

В функциональной зависимости (III.9) одним из аргументов является $\lambda_{\text{агл}}$, т.е. параллельно основному процессу – росту кристаллов – увеличение их размеров может происходить за счет агломерации кристаллов.

Агрегированию могут подвергаться как зародыши, так и кристаллы любых размеров, разница лишь в том, что скорость агрегирования будет зависеть, в частности, от размеров контактируемых элементов.

В общем виде скорость процесса агломерации можно выразить следующим уравнением:

$$\lambda_{\text{агл}} = f(V_{\text{пер}}, I_{\text{пер}}, \tau, V_t, d_0, V, \sigma, Q_{\text{пр}}, C_{\text{кр}}), \quad (\text{III.12})$$

где $I_{\text{пер}}$ - интенсивность перемешивания;

τ - время кристаллизации (среднее время пребывания кристалла в слое);

V_t - скорость охлаждения раствора;

d_0, V - размер (усредненные диаметр и объем) соответственно зародыша и кристалла;

σ - поверхностные силы натяжения;

$C_{\text{кр}}$ - концентрация кристаллов в слое.

На скорость роста кристаллов будет оказывать нежелательное воздействие дробление кристаллов, которое будет зависеть в общем виде от следующих величин:

$$\lambda_{\text{дробл}} = f(V_{\text{пер}}, V_t, V, C_{\text{кр}}, \tau). \quad (\text{III.13})$$

- 1) Рассматривать дробление по отношению к качеству продукта, как процесс уравнивающий агломерацию, не совсем корректно, вследствие того, что образующиеся мелкие осколки, как и образующиеся агломераты с размерами более заданного, снижают качество готового продукта.

Рассмотрим более подробно такие явления в процессе кристаллизации, как инкрустация, агломерация и дробление.

III.3.4. Закономерности побочного процесса инкрустации

Борьба с отложениями соли на теплопередающих поверхностях ведется путем увеличения скорости циркуляции раствора в аппарате, выноса зоны кипения из греющих трубок и поддержания постоянного количества кристаллов в циркулирующей суспензии [40].

Для устранения накипи, что в равной степени может быть использовано для борьбы с образованием инкрустаций, принимают следующие меры:

- повышают линейную скорость движения кристаллизуемого раствора путем многократной циркуляции его в трубах;
- вводят в раствор (в качестве затравки) твердые частички того же химического состава, что и выпадающая накипь. В этом случае накипь будет выделяться преимущественно на готовой поверхности затравки;
- вводят в аппарат антинакипины - вещества коллоидного состава, уменьшающие скорость отложения накипи на теплопередающих поверхностях.

Эти приемы не гарантируют полного устранения отложения накипи на греющих поверхностях, они лишь уменьшают скорость образования осадка. В аппарате с выносной греющей камерой, чтобы избежать инкрустации стенок сепаратора, нужно полировать их внутренние поверхности, подавать на стенку низкочастотные механические вибрации, а также вводить питающий раствор через орошающее устройство.

Итак, увеличение скорости циркуляции раствора в аппарате уменьшает вероятность образования в нем инкрустации и увеличивает надежность его работы. Образование инкрустации на теплопередающих поверхностях вызвано тем, что именно у стенки раствор имеет наименьшую температуру, а следовательно, и максимальное пересыщение.

Увеличение скорости движения раствора существенно уменьшает, а иногда и полностью устраняет образование инкрустаций. Это объясняется не только тем, что интенсивное перемешивание выравнивает температурное поле у стенок аппарата и в объеме раствора, а также и тем, что оно стимулирует возникновение новых зародышей не в спокойном пристенном слое, а в участках наиболее интенсивного движения, то есть в основной массе раствора. В ряде случаев недостаточно одного перемешивания раствора для устранения инкрустаций, поэтому в конструкции аппарата следует предусмотреть механическую очистку стенок от осадка. С этой целью либо устанавливается якорная мешалка с очень небольшим зазором между лопастями и стенками аппарата, либо, для предупреждения заклинивания лопасти мешалки снабжают металлическими щетками, либо вертикальные лопасти мешалки заменяют цепями, которые при вращении прижимаются центробежной силой к стенкам и соскребают отложения.

Для кристаллизаторов периодического действия образование инкрустаций не представляет особенно больших эксплуатационных неудобств,

поскольку эти пристенные осадки при заполнении аппарата горячим, несколько ненасыщенным раствором, полностью растворяются [40].

Рассмотрим кинетику процесса инкрустации (рис. 14).

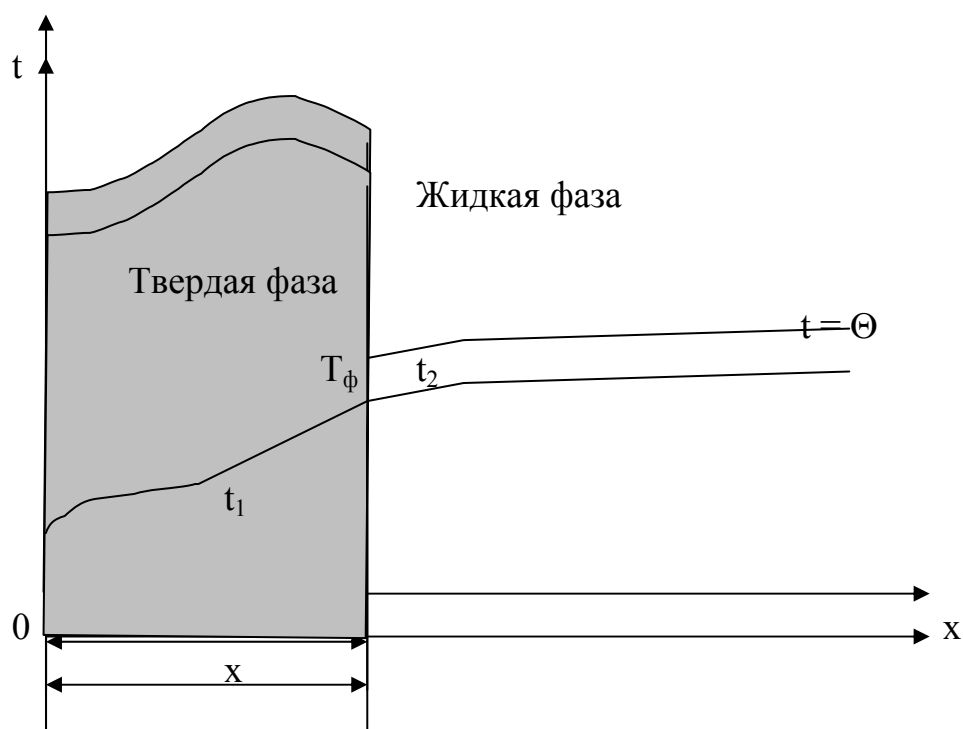


Рис.14. Кинетика процесса инкрустации

На данном рисунке изображена зависимость температуры $t^{\circ}\text{C}$ от размера области кристаллизации - X .

Допустим, что в начальный момент времени вся рассматриваемая область (аппарат кристаллизации с раствором, из которого получают кристаллы) заполнена жидкой фазой с температурой Θ . При $t > 0$ на поверхности $X = 0$ поддерживается температура $t_1 < t$ кристаллизации вещества. Для начала процесса инкрустации и его протекания [41] должны удовлетворяться граничные условия, относящие этот класс задач к задаче Стефана:

$$\lambda_i \left. \frac{\partial T_i}{\partial n} \right|_{\Phi_{i-0}} - \lambda_{i+1} \left. \frac{\partial T_{i+1}}{\partial n} \right|_{\Phi_{i+0}} = (-1)^{i+1} Q_{\text{фаз}} \frac{\partial \Phi_i}{\partial t C}, \quad (\text{III.14})$$

где $T_i(\tau)|_{\Phi_i} = T_{\text{фаз}}$ температура фазовых превращений;

λ - теплопроводность;

$\Phi_i = \Phi_i(x, y, z, \tau) = 0$ – уравнение поверхности (фронта) раздела фаз;

n - нормаль к поверхности Φ_i ;

$Q_{\text{фаз}}$ - теплота фазовых превращений;

x - размер области кристаллизации;

τ - время кристаллизации.

Должны выполняться также условия, соответствующие линейным тепловым потокам в твердой и жидкой фазах:

$$\frac{\partial^2 t_1}{\partial x^2} - \frac{1}{a_1} \frac{\partial t_1}{\partial \tau} = 0$$

$$\frac{\partial^2 t_2}{\partial x^2} - \frac{1}{a_2} \frac{\partial t_2}{\partial \tau} = 0$$

где a_1, a_2 - коэффициенты температуропроводности фаз.

Кроме того, для полуограниченной области

$$t_{\text{раствора}} \rightarrow \Theta \text{ при } x \rightarrow \infty.$$

Для линейного потока тепла решение [41] может быть найдено в виде функции ошибок:

$$t = A \operatorname{erf} \frac{x}{2 \sqrt{a \tau}}.$$

Напомним, что

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi, \quad 1 - \operatorname{erf}(x) = \operatorname{erfc}(x).$$

Функция $\operatorname{erf}(x)$ табулирована, так же как и ее производные и интегралы. Таким образом, решение пишется в виде:

$$t_1 = A \operatorname{erf} \frac{x}{2 \sqrt{a_1 \tau}}, \quad (\text{III.15})$$

где A - постоянная, удовлетворяющая $t_1 = 0$ при $x=0$.

Из граничного условия $t_1(x) = t_2(x) = T_\phi$ следует, что $x(\tau) \sim \sqrt{\tau}$, например $x(\tau) = 2k \sqrt{a_1 \tau}$,

где k - численный множитель, определяемый из второго граничного условия на фронте разделения фаз (III.14).

После соответствующих подстановок получается уравнение, из которого определяется множитель k :

$$\frac{\exp(-k^2)}{\operatorname{erf}(k)} - \frac{\lambda_2 \sqrt{a_1} (\Theta - T_\phi) \exp\left(-\frac{a_1 k^2}{a_2}\right)}{\lambda_1 \sqrt{a_2} T_{\text{фаз}} \operatorname{erfc}\left(k \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}\right)} = \frac{k Q_{\text{фаз}} \sqrt{\pi}}{C_1 T_{\text{фаз}}}, \quad (\text{III.16})$$

где C_1 - теплоемкость твердой фазы.

Величину k , найденную из (III.16) подставляем в (III.15). Тогда

$$t_1 = \frac{T_\phi}{\operatorname{erf}(k)} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2 \sqrt{a_1 \tau}}\right). \quad (\text{III.17})$$

Используя эту зависимость, рассчитаем, например, время начала инкрустации бихромата калия $K_2Cr_2O_7$ при следующих условиях кристаллизации.

Температура фазовых превращений:

$$T_{\phi} = 236,8^{\circ}\text{C}. \quad [57]$$

Коэффициент температуропроводности:

$$a_1 = 3,28 \cdot 10^{-4}. \quad [57]$$

Так как функция $\text{erf}(x)$ табулирована, с учетом этого преобразуем уравнение (III-15) и, подставив известные величины в полученное уравнение, будем иметь:

$$T_{\phi}^2 = 27 \cdot x \left(\sqrt{a_1 \tau} \right)^3 - 2 \cdot x^3 \sqrt{a_1 \tau}. \quad (\text{III-18})$$

Из последнего уравнения определяем время инкрустации бихромата калия, то есть время, за которое может быть достигнут инкрустационный слой толщиной, например, в один миллиметр или 10 мм.

При $x = 1$ мм следует

$$236,8^2 = 27 \cdot 0,001 \sqrt{3,28 \cdot 10^{-4} \tau} - 2 (0,001)^3 \sqrt{3,28 \cdot 10^{-4} \tau}$$

получаем $\tau = 99$ часов. А при $x = 10$ мм имеем:

$$236,8^2 = 27 \cdot 0,01 \sqrt{3,28 \cdot 10^{-4} \tau} - 2 (0,01)^3 \sqrt{3,28 \cdot 10^{-4} \tau}$$

получаем $\tau = 1012$ часов.

Следовательно, при наличии в процессе кристаллизации процесса инкрустации, толщина инкрустационного слоя $x = 1$ мм будет достигнута примерно за 99 часов, а $x = 10$ мм – за 1012 часов непрерывной работы кристаллизатора при оптимальных условиях его работы.

III.3.5. Процесс агломерации при кристаллизации из растворов

Надежное ведение процесса кристаллизации – это обеспечение выхода годного продукта при стабильной производительности кристаллизатора. Если шире раскрыть это определение, то обеспечение надежности процесса кристаллизации заключается в поддержании определенного процентного содержания требуемого грансостава кристаллизующего продукта при заданной производительности, определенной чистоты продукта (минимальный процент примесей), оптимальных (минимальных) расходов тепла, холода, воды, сырья.

Агломерация интенсифицирует процесс кристаллизации – это положительная ее сторона. Но этот процесс идет в положительном направлении только до определенного момента времени, то есть до роста определенного размера кристалла. После истечения определенного отрезка времени, или до роста кристалла определенного размера возможно отрицательное влияние агломерации, например, больший, чем требуется, процент примесей, привнесенный агломератами.

В зависимости от природы кристаллизующегося вещества могут появляться кристаллы крупного размера, большего, чем требуется по ГОСТ или запросу потребителя. Это нежелательно и также может быть отнесено к факту снижения надежности.

Используя данные Д.А. Разумовского [39], мы построили зависимости роста кристаллов размером 0,7-1,36 мм и распада кристаллов размером 0,1-0,5 мм во времени.

Анализ этих графических зависимостей показывает, что рост кристаллов бихромата калия наиболее интенсивно проходит до времени $\tau = 1800$ с. в зависимости от коэффициента пересыщения ξ_0 , температуры и других параметров процесса. Это время достижения кристаллами критического размера. После этого рост кристаллов замедляется и прекращается.

Вес кристаллов с размером 0,1-0,5 мм растет до промежутка времени от 600 до 900 секунд, затем он начинает уменьшаться. Очевидно, эти кристаллы или растворяются или служат «сырьем» для роста частиц размером свыше 0,7 мм.

В работе В.В. Стрельцова [37] рассматривается процесс агрегирования кристаллов, вносящий существенный вклад в изменение гранулометрического состава массы кристаллов в ходе периодического процесса кристаллизации. Процесс агломерации как физическое явление необходимо учитывать при расчете промышленных аппаратов кристаллизации, гранулирования, десублимации. Автор ориентировался на методику расчета кинетики агрегирования в условиях, когда упомянутый процесс (агрегирование) осложнен основным процессом – кристаллизацией, то есть гранулометрический состав слоя изменяется не только за счет объединения частиц, но и за счет отложения вещества на частицах слоя и появления новых зародышей твердой фазы.

В этой работе для расчета кинетики агломерации предложена математическая модель, которая учитывает влияние гранулометрического состава на скорость изучаемого процесса (см. раздел 3.6).

В ранее проведенной работе по изучению закономерностей явления агрегирования [42] для описания кинетики агломерации была применена модель «рождения и гибели», учитывающая параллельно протекающий процесс дробления агломератов и частиц:

$$\begin{aligned} P_x(\tau) &= [1 - \alpha(\tau)] [1 - \beta(\tau)] [\beta(\tau)]^{x-1}, \\ P_0(\tau) &= \alpha(\tau), \end{aligned} \quad (III.20)$$

где $x(\tau)$ - случайная величина, характеризующая число агломератов в момент времени τ .

$$\alpha(\tau) = \frac{\mu [e^{(\lambda-\mu)\tau} - 1]}{\lambda e^{(\lambda-\mu)\tau} - \mu} \quad (III.21)$$

$$\beta(\tau) = \frac{\lambda [e^{(\lambda-\mu)\tau} - 1]}{\lambda e^{(\lambda-\mu)\tau} - \mu},$$

$P_x(\tau)$ - вероятность изменения грансостава;

$P_o(\tau)$ - вероятность критического режима процесса, когда образуется критическое число агломератов, останавливающее основной процесс;

λ, μ - коэффициенты интенсивности агломерации и дробления.

Если допустить, что $\lambda = K_a = 6,74$, а $\mu = 1$, то есть измельчение отсутствует, то можно рассчитать вероятность отказа – остановка основного процесса, когда агрегирование является нежелательным процессом.

Возьмем $\tau = 20$ минут. Разложив числитель и знаменатель – в формуле для $\lambda(\tau)$ в ряд Маклорена, запишем:

$$\alpha(\tau) = \frac{\mu \left(1 + \frac{y \tau}{1!} + \frac{(y \tau)^2}{2!} - 1 \right)}{\lambda \left(1 + \frac{y \tau}{1!} + \frac{(y \tau)^2}{2!} - \mu \right)}$$

где $y = \lambda - \mu = 6,74 - 1 = 5,74$

$$\alpha(\tau) = \frac{1 \left(1 + \frac{5,74 \cdot 20}{1} + \frac{(5,74 \cdot 20)^2}{2} - 1 \right)}{6,74 \left(1 + \frac{5,74 \cdot 20}{1} + \frac{(5,74 \cdot 20)^2}{2} - 1 \right)} = 0,148$$

$\beta(\tau) = 0$, при $P(\tau) = \alpha(\tau) = 0,148$.

Вероятность отказа при интенсивности процесса агломерации $K_a = 6,74$ составит 14,8% , то есть при таких условиях процесс кристаллизации не работает в критическом режиме, интенсивность агломерации можно повысить, не вызывая отказа основного процесса. Уравнения (III.20), (III.21) не только раскрывают сущность процесса кристаллизации, осложненного побочным процессом агломерации, но и позволяют осуществлять контроль за ходом процесса и тем самым обеспечивать его надежность.

Глава IV. Обеспечение надежности химико-технологического оборудования

IV.1. Проблемы повышения надежности ХТО

Значительной и не менее важной в комплексной системе управления и обеспечения надежности производства (рис.24) является такая составляющая часть этой системы, как технологическое оборудование, которое условно можно разделить на машины и аппараты. Научно-технический прогресс, современный уровень развития науки и техники позволяют создавать машины и аппараты, приборы и конструкции высокой надежности. «Теория надежности – молодая наука, она не насчитывает и пятидесяти лет. Развиваться же ей предстоит столько времени, сколько будет существовать промышленность и массовое производство» [12, том II]. Каждый объект, созданный мыслью и руками человека, обладает определенным жизненным циклом (рис.16). Состояние каждого слагаемого в процессе создания новой техники характеризуется определенным уровнем надежности, т.е. надежность машины (аппарата) определяется не только уровнем надежности при ее эксплуатации, но и должна обеспечиваться с момента зарождения идеи создания этого объекта.

Этому должен служить комплекс мер, применяемых на стадиях проектирования (конструирования), изготовления, монтажа, эксплуатации (в т.ч. ремонта). Всему этому должны предшествовать прогнозные исследования, т.е. необходимо определение перспективности надежной работы оборудования. Эту проблему В.В.Болотин [21] считает наиболее актуальной. Центральное место в указанной монографии занимает проблема прогнозирования ресурса и срока службы машин и конструкций на основании информации о материалах, деталях, узлах, машины и аппарата в целом, также о нагрузках и воздействиях, влияющих на их надежность. В предисловии [21] В.В.Болотин отмечает, что надежность объекта должна создаваться и обеспечиваться на всех этапах (рис.16) жизненного цикла объекта. «На стадии проектирования – это выбор рациональных конструктивных схем и материалов, надлежащий расчет с учетом всех воздействий, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации. На стадиях изготовления и монтажа – это тщательный контроль материалов и комплектующих изделий, высокий уровень организации и контроля технологических процессов, промежуточные контрольные испытания отдельных элементов, узлов и агрегатов, отработанная система приемосдаточных мероприятий. Устранение скрытых дефектов на стадии обкатки и приработки, система технического обслуживания, включающая комплекс диагностических и планово-предупредительных мероприятий, позволяет снизить до минимума вероятность возникновения отказов в процессе эксплуатации».

Специалисты и ученые в своих работах [12, 21 23, 43-46] весьма обстоятельно рассматривают постановку задач о прогнозировании ресурса оборудования на стадии проектирования.

На этапе проектирования (конструирования), а в дальнейшем и подготовки к серийному выпуску современных видов оборудования [21], во-первых, должны быть разработаны технические решения, во-вторых, должны быть разработаны и просчитаны показатели надежности объекта, а также одной из главных задач на стадии проектирования является согласование прогнозируемых показателей надежности с плановыми показателями, т.к. предметом прогнозирования служит идеализированный объект. В.В.Болотин отмечает, что «вероятностный характер прогноза вызван не только отсутствием исчерпывающей информации о проектируемом объекте, но и разбросом показателей долговечности, которые обладают большой чувствительностью к различным факторам».



НИР – научно-исследовательские работы

ТЗ – техническое задание

ОКР – опытно-конструкторские работы

Рис.15 Схема процесса создания новой химической техники

IV.2. Обеспечение надежности ХТО при конструировании

Цель любого проекта – наиболее корректно разработать план, выполнить точные и грамотные расчеты основных узлов оборудования и предусмотреть надежную работу объекта в целом. Большая часть исходной информации для проектирования (конструирования) носит статистический и не всегда полный характер. Этот недостаток может быть восполнен в определенной степени вероятностно-статистическими (вероятностными) моделями надежности объекта. При конструировании возникает, кроме ограниченности информации, еще ряд затруднений. Параметры надежности конструкции в целом зависят от параметров, физико-механических свойств, условий эксплуатации, ремонтпригодности и т.д. элементов (деталей, узлов, блоков и т.п.) конструкции. Необходимо учитывать и то, что элементы могут быть как одинакового, так и разного типов. Следует предусмотреть еще при разработке конструкций разновременность появления дефектов в элементах. Все названные условия и затруднения указывают на сложность решения поставленной задачи, при этом определение наиболее значимых показателей надежности распадается на ряд частных задач (определение показателей надежности элементов). В.В.Болотин [21] для прогнозирования ресурса на стадии проектирования предлагает различные методы, учитывающие особенности проектируемой конструкции и условий эксплуатации: асимптотический метод и полудетерминистический в случае непреодолимости аналитических и вычислительных трудностей; метод, учитывающий стационарный эргодический случайный процесс нагружения; определение характеристических показателей долговечности; разработанные автором формулы для вычисления характеристического ресурса. Воспользовавшись такой математической системой решения, можно выполнить прогнозирование ресурса сложных систем, в том числе объектов, содержащих большое число однотипных элементов. Автор монографии «Прогнозирование ресурса машин и конструкций» В.В.Болотин рекомендует применение объединенной теории замедленного разрушения для решения задач обеспечения надежности конструкций при их разработке.

Расчет показателей $F_T(T)$ – функция распределения и $p_T(T)$ – плотность вероятности величины T – прогнозируемый ресурс при проектировании, а также их параметры $E[T]$ и $D[T]$ – соответственно математическое ожидание ресурса и дисперсия ресурса характеризуют долговечность конструкции, определяют требования к техническому обслуживанию объектов и ремонтной службе предприятий. Срок службы до первого капитального ремонта, продолжительность межремонтного периода должны отвечать оптимальным технико-экономическим решениям.

Повышение эффективности общественного производства является основной линией экономического развития страны. Значительная роль в решении этой проблемы отводится научно-техническому прогрессу в области

создания и внедрения новых технологий, разработки и конструирования новой техники. Для решения таких задач [47, 48] следует весьма обоснованно подходить к выбору вида конструкций и их анализу по следующим направлениям:

I. Техничко-экономическое обоснование (ТЭО) выбора конструкции машины, прибора или аппарата.

II. Прогнозирование и расчет надежности разрабатываемой конструкции.

III. Определение себестоимости изготовления конструкции и величины затрат на ее приобретение и монтаж.

IV. Расчет эксплуатационных затрат машины (аппарата).

V. Определение прогнозируемой экономической эффективности проектируемой конструкции.

I. Прежде чем приступить к разработке той или иной конструкции, необходимо произвести технико-экономическое обоснование выбора этой конструкции. Техничко-экономическая характеристика рассматриваемых машин (аппаратов) охватывает широкий круг вопросов: сравнение энергозатрат, необходимых для работы конструкций; сравнение удобств наладки и обслуживания машин для поддержания необходимой надежности работы ее узлов и механизмов; сопоставление площадей, занимаемых машиной (аппаратом) и т.д.

На основе экономического анализа в сравнении с уже используемыми вариантами представляется возможность определить уровень прогрессивности новой конструкции. Такой же подход можно использовать для ТЭО выбора конструкции.

В качестве показателей анализа эффективности различных конструкций могут быть использованы:

- 1) коэффициент полезного действия протекающего процесса;
- 2) материалоемкость конструкции, а также ее габариты и удельная производительность;
- 3) энергоемкость конструкции, затраты на ремонт машины (аппарата), трудоемкость изготовления конструкции;
- 4) уровень стандартизации и унификации узлов и деталей конструкции;
- 5) уровень производительности труда персонала, обслуживающего конструкцию при ведении технологического процесса;
- 6) качество выпускаемой продукции на данной машине (аппарате);
- 7) уровень механизации и автоматизации, улучшения условий труда и т.д.

При анализе эффективности проектируемой конструкции определяются те из перечисленных показателей, которые изменяются по сравнению с существующей конструкцией. О других показателях упоминается, что они остаются неизменными.

Разберем подробно основные показатели обоснования выбора конструкции.

1. Показателем, характеризующим материалоемкость конструкции, является: а) вес (чистый) детали или узла конструкции, вес конструкции в целом; б) относительный удельный вес конструкции; в) норма расхода и коэффициент использования материалов на изготовление химической продукции.

Чистый вес детали или узла определяется: $G = V d$,
где V - объем детали; d - удельный вес металла.

Условие эффективности новой конструкции по этому показателю выражается неравенством $G_1 > G_2$, где G_1 - чистый вес деталей старой конструкции (аналога); G_2 - чистый вес деталей новой конструкции.

Рассмотренный показатель может быть использован при оценке экономической эффективности только однотипных конструкций, имеющих одинаковое функциональное назначение, равную мощность, производительность и другие параметры.

Во всех остальных случаях сравнивают варианты конструкций и машин по их относительному весу $G_{уд}$. Он характеризует отношение относительного веса конструкции к одному из основных эксплуатационных параметров: мощности (M), производительности (Q) и т.п.

$$G_{уд}^M = \frac{G}{M} \quad \text{или} \quad G_{уд}^Q = \frac{G}{Q}$$

Чем меньше показатель относительного веса, тем прогрессивнее конструкция при прочих равных условиях.

Особое внимание должно быть уделено правильному выбору основного показателя эксплуатационной характеристики машины, по отношению к которому рассчитывается $G_{уд}$. Для большинства машин и аппаратов химического машиностроения данный показатель определяется как отношение G к производительности в единицу времени Q .

Норма расхода и коэффициент использования материалов должны определяться данными исследований, а также данными передовых предприятий машиностроения или по специальной литературе.

2. Показатель трудоемкости конструкции на проектной стадии, когда технологические процессы изготовления конструкции разработаны в общем направлении, а не детально, может быть рассчитан укрупненным методом или по данным завода – изготовителя аналогичных конструкций.

При наличии данных о трудоемкости однотипных деталей существующих конструкций, весе подобных деталей в новой конструкции трудоемкость может быть определена [63] по следующим формулам:

Для кузнечных работ:

$$t_{pk2} = t_{pk1} \sqrt[3]{\left(\frac{G_{уд2}}{G_{уд1}}\right)^2},$$

где t_{pk1} и t_{pk2} - трудоемкость кузнечных работ соответственно существующей и новой конструкции;

Для сварочных работ:

$$t_{pc2} = l_2 \frac{t_{pc1}}{l_1},$$

где l_1 и l_2 - сумма швов старой и новой конструкций;

Для сборочных работ:

$$t_{pcb} = \frac{t_{pi} d_{cb}}{100 - d_{cb}},$$

где t_{pi} - трудоемкость изготовления всех узлов и деталей новой конструкции;

d_{cb} - удельный вес трудоемкости сборки в однотипных конструкциях, %.

Общая трудоемкость изготовления:

$$t_{pob} = t_{pl} + t_{pk} + t_{pc} + t_{pcb} + t_{ppp}$$

Трудоемкость изготовления новой конструкции может быть рассчитана по трудоемкости изготовления одного из ведущих узлов конструкции:

$$t_{pob} = \frac{t_{pvy} 100}{t_{руд}},$$

где t_{pvy} - удельный вес трудоемкости ведущего узла в общей трудоемкости существующей конструкции.

При невозможности получения подробных данных о существующих конструкциях в индивидуальном производстве трудоемкость может быть определена:

$$t_{pob} = G t_{pg} \quad t_{pob} = G t_{pg},$$

где t_{pg} - трудоемкость в человеко-часах, приходящаяся на 1 т веса однотипной или подобной конструкции (берется по справочнику).

Новая конструкция будет экономически эффективней по этому показателю, если $t_{pob2} \leq t_{pob1}$.

Если варианты конструкций отличаются своими эксплуатационными характеристиками (производительность, мощность и т.п.), то сопоставление вариантов проводят по удельной трудоемкости:

$$t_{руд}^M = \frac{t_{pob}}{M} \quad \text{или} \quad t_{руд}^Q = \frac{t_{pob}}{Q} \quad \text{и т.п.}$$

3. Показателем оптимальности новой конструкции служит коэффициент нормализованности, уровень стандартизации и унификации узлов и деталей конструкции. Он характеризует отношение количества стандартных или нормализованных деталей к общему количеству деталей в машине или аппарате. Коэффициент унификации новой конструкции должен быть выше такового в старой конструкции.

4. Уровень производительности труда персонала, обслуживающего различные конструкции, измеряется количеством готовой продукции, выработанной в единицу времени:

$$\Pi_p = \frac{Q_{\phi}}{T \cdot Ч},$$

где Q_{ϕ} - количество продукции, выработанной в единицу времени;

T - время, затраченное на производство данной продукции;

$Ч$ - число обслуживающего персонала в этот же период.

Повышение производительности труда персонала, обслуживающего новую конструкцию достигается, если

$$\frac{Q_{\phi 2}}{Q_{\phi 1}} > \frac{Ч_2}{Ч_1},$$

Рост производительности труда рассчитывается по формуле:

$$\Pi_p = \left(\frac{\Pi_{p2}}{\Pi_{p1}} - 1 \right) 100$$

5. Большую роль в оценке эффективности конструкции играет качество работы или продукции, производимой с помощью данной техники. Для этого необходимо учесть химический состав, удельный вес полезных компонентов готовой химической продукции, процент брака и т.д.

6. Значительный интерес при анализе конструкции представляет сравнение показателей, характеризующих условия труда, технику безопасности, удобство эксплуатации, основными из которых являются: 1) удельный вес ручного труда в общем времени работы конструкции; 2) удельный вес механизированной и автоматизированной работы (расчет коэффициентов механизации и автоматизации; 3) гигиеничность труда обслуживающего персонала.

II. В расчет надежности проектируемой конструкции должна включаться проработка следующих вопросов:

- 1) прогнозирование надежной работы конструкции (краткосрочное прогнозирование);
- 2) расчёт показателей надежности химического оборудования;
- 3) изложение основ диагностирования надежности разрабатываемой конструкции.

1. Прогнозирование надежной работы конструкции

За последние годы возникла необходимость инженерного прогнозирования как развития техники, так и поведения сложных технических систем. Применительно к надежности задача прогнозирования сводится, в основном, к предсказанию вероятности безотказной работы изделия $P(t)$ в зависимости от возможных режимов работы и условий эксплуатации машины или аппарата. Для решения поставленной задачи следует рассматривать случай прогнозирования параметрической надежности химико-технологического

оборудовании (ХТО), когда известна структура формирования области работоспособности, но параметры, определяющие эту область, зависят от большого числа факторов и соответственно имеют рассеивание (разброс данных). При прогнозировании надежности ХТО на стадии проектирования имеется наибольшая неопределенность в оценке возможных состояний изделия по сравнению с прогнозированием на стадии эксплуатации.

Качество прогноза зависит в большой степени от источника информации о надежности изделий (их элементов) и процессах потери ими работоспособности. Эта информация должна относиться к конечным результатам протекающих процессов старения, износа, повреждения, отказа, а также к оценке величины и характера этих процессов. На практике обычно используют три источника информации для суждения о возможной потере работоспособности машины:

а) статистическая обработка данных по эксплуатации и ремонту аналога проектируемой конструкции; б) испытания аналога на надежность; в) аналитические расчеты и прогнозирование надежности.

Определение минимального объема информации также необходимо для инженерного прогнозирования, от этого зависит достоверность прогноза:

$$V = k \cdot t_0 \div 0,73 \cdot k \cdot t_0 ; \quad k = \frac{0,04 \cdot v}{\epsilon}$$

где v - число прогнозируемых элементов;

ϵ - точность (погрешность) прогнозирования;

t_0 - период внедрения (можно принять равным времени от возникновения идеи до начала массового производства аналога).

Обычно конструирование ХТО предусматривает определение размеров изнашиваемых поверхностей элементов, уточнение закономерности изнашивания некоторых элементов, в связи с этим появляется возможность прогнозирования моментов наступления предельных состояний этих элементов и определения законов распределения их наработок до отказа.

Величина износа $I = \xi \cdot T$, где ξ - скорость износа, T - наработка на отказ. Если предполагают, что распределение величины T подчиняется нормальному закону, то вероятность безотказной работы элемента в течение времени t составит

$$P(t) = P(I \leq I_{\max}) = F_0 \frac{(I_{\max} - I)}{G_n}$$

где $I = \xi_{\text{ср}} \cdot t$; $G_n = G_{\xi} \cdot t$;

F_0 - функция нормального распределения (табулирована).

Для проведения краткосрочного прогноза следует давать оценку инженерно-технического уровня прогнозируемого объекта. Для этого предлагается рассчитывать обобщенный критерий технического уровня по формуле:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{i=S} k_n \varphi(i)}{\sum_{i=1}^{i=S} \varphi(i)},$$

где $\varphi(i)$ - функция, нормирующая веса относительных параметров, общее число которых равно S_i ;

k_n - относительные параметры, зависящие от i ;

i - параметр объекта (процесса, изделия и т.п.).

Например, если в новой конструкции предусматривается увеличение параметра (увеличение прочности, надежности и т.п.) тогда

$$k_n = \frac{I}{I_o},$$

где I - прогнозируемый параметр;

I_o - такой же параметр для лучшего существующего образца.

Если в новой конструкции предусматривается уменьшение параметра (уменьшение веса машины, металлоемкости, уменьшение вредного воздействия на основной процесс коррозии или какого-либо побочного процесса):

$$k_n = \frac{I_0}{I}.$$

При $K > 1$ - объект с позиций краткосрочного прогнозирования перспективен.

При $K = 1$ - объект не имеет преимуществ при оценке перспективности его внедрения в производство.

При $K < 1$ - объект разработан ниже уровня имеющихся аналогов и не должен быть реализован.

2. Расчет показателей надежности химического оборудования.

Оценка достигнутого уровня надежности и необходимость его повышения должна решаться, в первую очередь, с экономических позиций, ибо экономика является основным критерием для решения большинства практических вопросов надежности.

Для обоснования надежности конструируемых машин или аппаратов прежде всего следует определить вид и число показателей надежности. Необходимо также рассчитать показатели надежности с целью определения возможности достижения разрабатываемыми конструкциями требуемых значений этих показателей [63].

Расчет показателей надежности проводится на двух стадиях проектирования химического оборудования: технического задания (ТЗ) – и технического проекта (ТП).

Нормируемыми показателями надежности химического оборудования в соответствии с РД РТМ 26-01-135-81 НИИХИММАШ, подлежащими расчету являются:

- наработка на отказ, T ;
- ресурс до капитального ремонта, T_p ;
- срок службы до списания, $T_{сл}$;
- назначенный ресурс между операциями восстановления
 - о техническими обслуживаниями, $T_{то}$;
 - о текущими ремонтами, $T_{рт}$;
- коэффициент технического использования, $K_{ти}$.

Исходными данными для расчета служат техническая характеристика разрабатываемого оборудования и информация о надежности аналогов их элементов (сборочных единиц, деталей, комплектующих изделий) в сходных условиях эксплуатации, получаемая в соответствии с РД РТМ 26-01-136-81 НИИХИММАШ и из технической литературы.

Перед выполнением расчета проводят анализ конструкции разрабатываемого оборудования и возможных его отказов.

При анализе проводят сопоставление разрабатываемой конструкции оборудования с аналогом и относят его к одной из двух нижеперечисленных групп:

- оборудование, не имеющее значительных конструктивных отличий от аналога (изменение второстепенных элементов);
- оборудование, отличающееся от аналога структурой, конструкцией или масштабом основных элементов, т.е. такое оборудование, интенсивность и характер отказов которого может отличаться от отказов элементов аналога. Например, оборудование, отличающееся от аналога рабочими органами, передаточными механизмами, комплектующими изделиями, либо размерами некоторых основных элементов, подобных по конструкции и исполнению.

Показатели надежности химического оборудования принимаются равными показателям надежности аналога, определенным по результатам эксплуатации, или рассчитываются с использованием настоящих указаний (см. эксплуатационную карту, табл.10).

Для выполнения расчета показателей надежности [63] составляется расчетная схема надежности. Основные элементы (отказы которых вызывают отказ оборудования) располагают в расчетной схеме надежности в последовательную цепь. При этом допускается некоторые элементы объединять в комплексы, если их надежность не отличается от надежности аналога. Пример составления расчетной схемы аппарата показан на рис. 16.

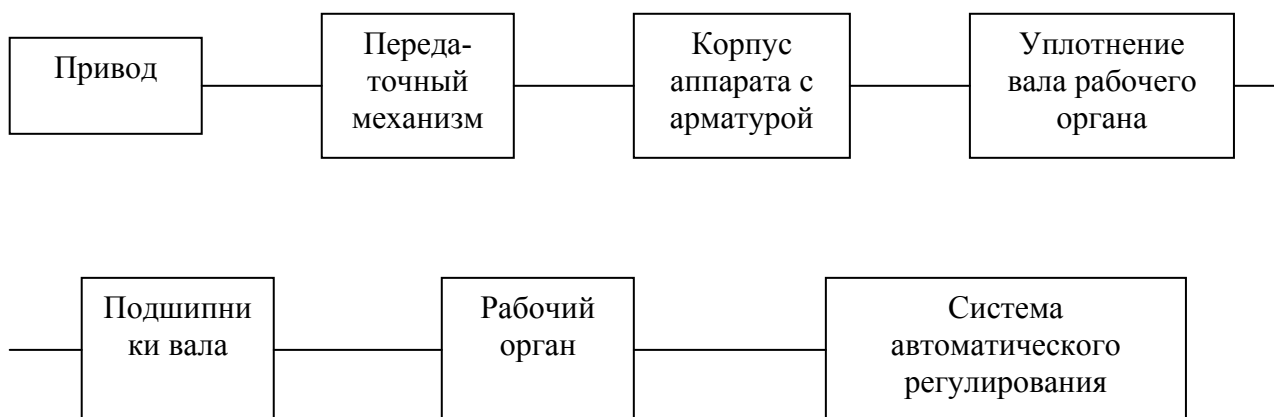


Рис. 16. Расчетная схема надежности химического оборудования

Расчет показателей надежности на стадии технического задания

Расчет целесообразно выполнять в указанной последовательности:

- определение интенсивностей отказов элементов;
- определение назначенного ресурса между текущими ремонтами;
- вычисление наработки на отказ;
- определение ресурса до капитального ремонта и срока службы до списания.

Для удобства выполнения расчета исходные данные следует представить в виде таблицы 5.

Таблица 7

Интенсивности отказов элементов химического оборудования

Наименование элементов	Количество элементов	Средняя интенсивность отказов λ_i , 1/ч	Источник информации

Определение интенсивности отказов элементов следует осуществлять по результатам сбора и обработки эксплуатационной информации о надежности элементов аналогов, используя равенство $\lambda_i = 1 / T_i$; где T_i - средняя наработка до отказа i - го элемента.

Для элементов оборудования измененного масштаба T_i определяется по формуле:

$$T_i = T_{ia} M^{-\frac{1}{b}}, \quad (IV.1)$$

где T_{ia} - средняя наработка до отказа i - го элемента;

M - масштаб элемента, определяемый по табл. 6, разработанной в НИИХИММАШЕ;

b - параметр, определяемый в зависимости от коэффициента вариации наработки на отказ по рис. 17 и приложению II.

Следует иметь в виду, что формула (IV.1) вполне справедлива лишь при сохранении удельных нагрузок на элемент, технологии его изготовления и материала.

Для элементов оборудования, эксплуатационная информация об отказах которых отсутствует, параметры определяют ориентировочно по справочным данным [64], [67], [48], [2], [66] и др.

Так как интенсивность отказов быстроизнашиваемых элементов зависит от частоты планово-предупредительных ремонтов, то определение их осуществляется после определения назначенного ресурса между текущими ремонтами.

Таблица 8

Выбор масштаба элемента

Основная причина разрушения элемента изделия	Величина масштаба (М) определяется отношением
Разрушение сварных швов и других неразъемных соединений поверхности	Длин швов соединений
Коррозионное разрушение поверхностей, гидро- и газоабразивное разрушение поверхностей	Площадей изнашиваемых поверхностей
Истирание рабочих поверхностей (в т.ч. торцевых и сальниковых уплотнений, подшипников скольжения)	Площадей изнашиваемых поверхностей
Усталостное и хрупкое разрушение, пластическое деформирование, деструкция или разупрочнение	Объемов рабочих зон элементов

При наличии в оборудовании быстроизнашиваемых элементов (ресурс которых меньше ресурса до капитального ремонта оборудования), имеющих невысокий коэффициент вариации ресурса (до 0,5 – 0,7), следует предусматривать проведение планово-предупредительных текущих ремонтов, во время которых эти элементы заменяются новыми или восстановленными. При коэффициенте вариации ресурса выше 0,7 предупредительная замена элементов не дает существенного повышения безотказности работы оборудования и поэтому не предусматривается.

Ресурс между текущими ремонтами ($T_{рт}$) следует назначать по гамма-процентному ресурсу (см. приложение II) наименее долговечного быстроизнашиваемого элемента, принимая его кратным месячной наработке (при непрерывном режиме работы - 720 ч).

Средняя интенсивность отказов быстроизнашиваемых элементов в межремонтный период (за время $T_{рт}$) определяется по формуле:

$$\lambda_i = \frac{1}{T_{рт} \ln P(T_{рт})}, \quad (IV.2)$$

где $P(T_{рт})$ - вероятность безотказной работы i -го элемента за наработку $T_{рт}$.

Наработка на отказ определяется по формуле:

$$T = \frac{1}{\sum_{i=1}^N n_i \lambda_i} \quad (IV.3)$$

где N - число элементов, включенных в расчетную схему;

n_i - число одинаковых i -х элементов.

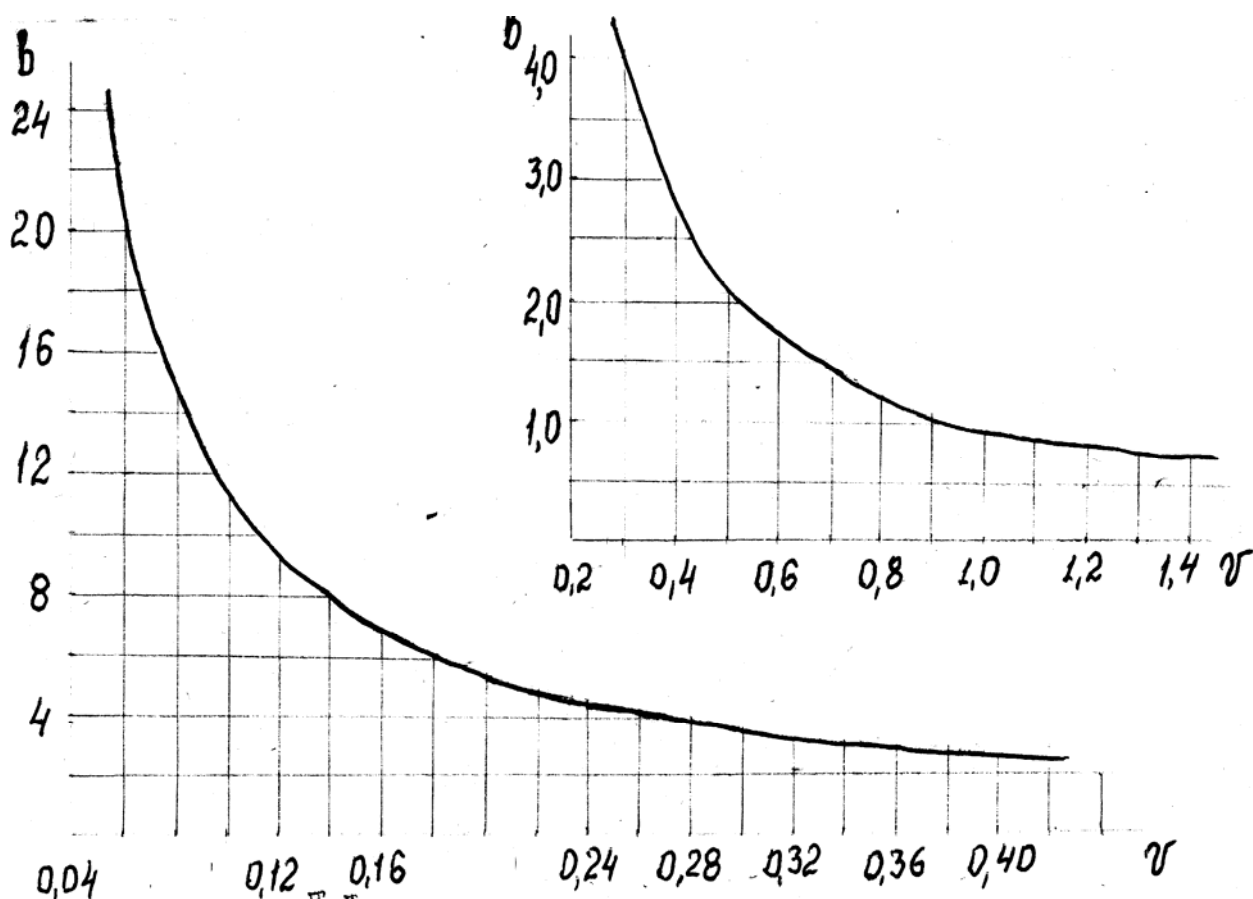


Рис.17. Зависимость параметра «в» от коэффициента вариации V

Ресурс до капитального ремонта оборудования T_p определяется по величине ресурса наименее долговечного базового элемента (привода, передаточного механизма, рабочего органа и др.) разрабатываемого оборудования и принимается равным ресурсу такого же элемента аналога. В случае изменения масштаба этого элемента его ресурс определяется так же, как и средняя наработка до отказа по формуле (IV.1).

Установленный ресурс до капитального ремонта нормируется в тех случаях (РД РТМ 26-01-135-81), когда известны конкретные условия эксплуатации и закономерности изнашивания базовых элементов, позволяющие прогнозировать момент наступления их предельного состояния. Он должен обеспечиваться для каждого изделия данного типоразмера оборудования и

определяется по величине гамма-процентного ресурса (см. приложение II) наименее долговечного базового элемента.

Средний ресурс до капитального ремонта нормируется для тех изделий, условия эксплуатации которых неконкретизированы, и определяется по величине среднего ресурса наименее долговечного базового элемента. Средний ресурс до капитального ремонта следует принимать кратным назначенному ресурсу между текущими ремонтами.

Назначенный ресурс до капитального ремонта нормируется для оборудования, наступление предельного состояния которого может вызвать катастрофические последствия и определяется требованиями Госгортехнадзора.

Срок службы до списания определяется физическим старением оборудования (при расчете показателей надежности моральное старение не учитывается). При капитальном ремонте ресурс оборудования восстанавливается не полностью, а только в среднем на 80% (при регламентированном проведении капитальных ремонтов соответственно увеличиваются затраты на каждый последующий капитальный ремонт), поэтому проведение более 2-3 капитальных ремонтов многих видов химического оборудования экономически невыгодно. С учетом этого срок службы определяется по формуле:

$$T_{\text{сл}} = \frac{T_p (n_k + 1)}{8640 K_{\text{и}}} \text{ лет,} \quad (\text{IV.4})$$

где n_k - целесообразное число капитальных ремонтов данного оборудования;

$K_{\text{и}}$ - коэффициент использования оборудования, зависящий от режима эксплуатации; при непрерывном режиме эксплуатации $K_{\text{и}} = 1$.

Коэффициент технического использования $K_{\text{ти}}$, на стадии технического задания следует принимать равным коэффициенту технического использования аналога, определенного по результатам эксплуатации, либо (в случае предусмотренных специальных мер по его повышению) определять расчетом в соответствии ГОСТ 27.002-89.

Расчет показателей надежности на стадии технического проекта

Расчет следует проводить в указанной последовательности:

- уточнение интенсивностей отказов элементов;
- расчет наработки на отказ;
- уточнение ресурса до капитального ремонта и срока службы;
- определение назначенного ресурса между операциями восстановления;
- вычисление коэффициента технического использования.

В результате проведенного конструирования оборудования и определения размеров изнашиваемых поверхностей элементов, уточнения закономерностей изнашивания некоторых элементов появляется возможность

прогнозирования моментов наступления предельных состояний этих элементов и уточнения законов распределения их наработок до отказа.

Наработка на отказ определяется по формулам (IV.1, IV.3). Если рассчитанная наработка на отказ оборудования оказывается меньше заданной, то необходимо уменьшить назначенный ресурс до текущего ремонта $T_{рт}$, в результате чего уменьшится интенсивность отказов быстроизнашиваемых элементов, и повторить расчет.

Если в ходе конструирования базовые элементы претерпевают изменения, то ресурс до капитального ремонта и срок службы оборудования уточняются в соответствии с (IV.1) и (IV.4).

Определение назначенного ресурса между операциями восстановления: проведение операций восстановления химического оборудования (технических обслуживаний и текущих ремонтов) планируется с целью обеспечения требуемой его безотказности в период эксплуатации между капитальными ремонтами.

Необходимость проведения технических обслуживаний (ТО) оборудования, связанных с его остановками, зависит от особенностей технологического процесса, проводимого в оборудовании, и его конструкции (необходимость прочистки жиклеров, очистки фильтровальных элементов, смазки и т.п.). Величина назначенного ресурса между ТО определяется по опыту эксплуатации аналога либо расчетом, в котором учитывают время, необходимое для остановки оборудования, удаления продуктов, подготовительных операций, выполнения операций технического обслуживания, регулировки, пуска и вывода на заданный режим работы.

При наличии в оборудовании быстроизнашиваемых элементов назначенный ресурс между текущими ремонтами определяется в соответствии с (IV-2). Если таких элементов нет, то ресурс между текущими ремонтами не назначается; планирование текущих ремонтов в этом случае осуществляется по величине наработки на отказ.

Расчет коэффициента технического использования в соответствии с ГОСТ - 27.002-89 осуществляют по формуле:

$$K_{ти} = \frac{t_p}{t_p + t_{п} + t_{в} + t_{то}}, \quad (IV-5)$$

где t_p - суммарная наработка за планируемый срок службы, в соответствии с формулой (IV.4).

$$t_p = T_p (n_k + 1)$$

$t_{п}$ - суммарная продолжительность плановых ремонтов, ч.

$$t_{п} = T_{пт} n_t + T_{пк} n_k,$$

где $T_{пк}$, $T_{пт}$ - соответственно средняя продолжительность одного капитального и текущего ремонтов, ч, определяемая по данным эксплуатации аналога [65], либо расчетом (в расчете необходимо учесть продолжительность остановки оборудования, удаления продуктов, подготовительных операций,

разборки оборудования, замены быстроизнашиваемых и ремонта базовых элементов, сборки, регулировки, пуска и вывода на установленный режим работы);

n_k и n_t - соответственно количество капитальных и текущих ремонтов за срок службы;

$$n_t = n_k \left(\frac{T_p}{T_{pt}} - 1 \right),$$

t_b - суммарная продолжительность неплановых ремонтов, ч.;

$$t_b = T_b \frac{t_p}{T},$$

где T - наработка на отказ, ч, определяемая по формуле (IV.3);

T_b - среднее время восстановления оборудования после отказа, ч, определяемое по формуле:

$$T_b = T \sum_{i=1}^N \frac{n_i T_{bi}}{T_i}, \quad (IV.6)$$

где T_{bi} - среднее время восстановления i -го элемента, определяемое по эксплуатационной информации, либо расчетом, аналогичным расчету $T_{пт}$;

n - число i -х элементов.

При отсутствии эксплуатационных данных о T_{bi} большинства элементов T_b может быть ориентировочно принято равным $T_{пт} / 2$;

$t_{то}$ - суммарная продолжительность технических обслуживаний, связанных с остановками оборудования:

$$t_{то} = T_{пто} \left(\frac{t_p}{T_{то}} - \frac{t_p}{T_{pt}} \right),$$

где $T_{пто}$ - средняя продолжительность одного ТО в часах, определяемая аналогично $T_{пт}$;

$T_{то}$ - назначенный ресурс между ТО.

Так как потребители при непрерывной эксплуатации химического оборудования с целью упрощения ремонтов вместо фактического ресурса записывают срок службы между ремонтами, то $K_{ти}$ для непрерывных производств более правильно определять по формуле:

$$K_{ти} = \frac{T_{сл} \cdot 8640 - (t_{п} + t_{в} + t_{то})}{T_{сл} \cdot 8640} = 1 - \frac{t_{п} + t_{в} + t_{то}}{T_{сл} \cdot 8640} \quad (IV.7)$$

При необходимости определяется коэффициент готовности по формуле:

$$K_{г} = \frac{T}{T_b + T}.$$

Пример расчета показателей надежности аппарата АПГ-16К-02

Аппарат АПГ-16К-02 предназначен для проведения процессов ферментации, отличающийся от аналогов наличием электромагнитного вибратора, который позволяет в несколько раз ускорить проводимый процесс.

Данный аппарат относим к группе с измененной конструкцией и составляем расчетную схему надежности (см. рис. 16).

Определяем интенсивности отказов λ_i элементов и вносим их в табл. 6.

λ_i элементов 1, 2, 4, 5 принимаем по справочным данным, т.к. информация об их надежности в конкретных условиях эксплуатации отсутствует.

По элементам 3 и 6 имеются эксплуатационные данные. Средний срок службы мембраны 6 составляет 8 месяцев, т.е. она является быстроизнашиваемым элементом, поэтому ее интенсивность отказов будет определена после определения ресурса между текущими ремонтами.

Наработка на отказ корпуса с рубашкой 20000 ч, ее коэффициент вариации 0,5 определен по результатам эксплуатации аппаратов емкостью 10 м³. Разрабатываемый аппарат должен иметь емкость 16 м³, поэтому наработку на отказ его корпуса 3 определяем в соответствии (IV-1). Так как основными отказами аппаратов с рубашками являются нарушения их герметичности, то величина масштаба определяется отношением поверхностей оболочек аппаратов. Учитывая, что поверхность аппарата зависит от линейных размеров во второй степени, а объем в третьей, получим выражение отношения поверхностей аппаратов через их объемы:

$$M = \frac{F_2}{F_1} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{2/3} = \left(\frac{16}{10} \right)^{2/3} = 1,37.$$

Наработку на отказ разрабатываемого корпуса 3 определяем по формуле (IV.1):

$$T_3 = T_k M^{\frac{1}{v}} = 20000 \cdot 1,37^{\frac{1}{2,2}} = 17400 \text{ ч},$$

где параметр «v» определен по рис.25 при $V = 0,5$.

Интенсивность отказов корпуса составит:

$$\lambda_3 = \frac{1}{T_3} = \frac{1}{17400} = 57,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Ресурс между текущими ремонтами назначаем в соответствии рис. 17 равным γ % ресурсу быстроизнашиваемого элемента - мембраны 6. Ее средний срок службы составляет 8 месяцев, т.е. 5760 ч. Вид закона распределения (Вейбулла) и коэффициент вариации (0,35) определяем по таблицам приложения II. Параметры распределения, соответствующие коэффициенту вариации 0,35, определяем по [78]:

$$v = 3,1; \quad K = 0,895; \quad A = T_6 / K = 6440 \text{ ч.}$$

Таблица 9

Показатели надежности элементов аппарата АКГ-16К-02

Наименование элементов	Количество элементов	Средняя интенсивность отказов λ_i , 10^{-6} 1/ч	Источник информации
1. Электромагнитный вибратор	6	5	[10]
2. Пружина	6	2,2	[23]
3. Корпус аппарата с рубашкой	1	57,5	[10]
4. Соединительная муфта	1	4,9	[23]
5. Шток с тарелками	1	8,6	[23]
6. Мембрана	1	67,2	расчет по п.2.2.

В соответствии со справочным приложением определяем γ % ресурс мембраны для $\gamma = 0,8$:

$$T_{\gamma} = a \left(\ln \frac{1}{\gamma} \right)^{\frac{1}{B}} = 6440 \left(\ln \frac{1}{0,8} \right)^{\frac{1}{3,1}} = 3970 \text{ ч.}$$

Назначаем ресурс между текущими ремонтами равным 4320 ч, т.е. кратным месячной наработке (720).

Интенсивность отказов мембраны определяем по формуле (IV.2):

$$\lambda_6 = \frac{\ln \frac{1}{P_i(T_{\text{рт}})}}{T_{\text{рт}}} = \frac{\ln \frac{1}{0,748}}{4320} = 67,2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч,}$$

$$\text{где } P_i(T_{\text{рт}}) = e^{-\left(\frac{T_{\text{рт}}}{a}\right)^B} = e^{-\left(\frac{4320}{6440}\right)^{3,1}} = 0,748$$

Вносим полученное значение в таблицу.

Определяем наработку на отказ по формуле (IV.3):

$$T = \frac{1}{\sum_{i=1}^N n_i \lambda_i} = \frac{1}{10^{-6} (6 \cdot 5 + 6 \cdot 2,2 + 57,5 + 4,9 + 8,6 + 67,2)} = 5513 \text{ ч.}$$

Ресурс до капитального ремонта определяем по базовому элементу - корпусу с рубашкой.

Так как условия эксплуатации данного аппарата неконкретизированы (агрессивность среды указана приближенно), то в соответствии (IV.4) нормируется средний ресурс до капитального ремонта аппаратов емкостью 10 м^3 , известный по результатам их эксплуатации, равен 30000 ч.

Определяем средний ресурс аппарата емкостью 16 м³ по формуле (IV.1):

$$T_p = T_{pa} M^{\frac{1}{b}} = 30000 \cdot 1,37^{\frac{1}{2,2}} = 26100 \text{ ч.}$$

Принимаем ресурс до капитального ремонта кратным назначенному ресурсу между текущими ремонтами (4320) и равным 25920 ч (3 года).

Срок службы до списания определяем по формуле (IV.4):

$$T_{сл} = \frac{T_p (n_k + 1)}{8640 K_{и}} = \frac{25920 (3 + 1)}{8640 \cdot 1} = 12 \text{ лет.}$$

Расчет коэффициента технического использования проводим в соответствии с п.2.3.5. по формуле (IV.7).

Определяем суммарную продолжительность ремонтов:

$$t_{п} = T_{пт} n_{т} + T_{пк} n_{к} = 4 \cdot 15 + 48 \cdot 3 = 204 \text{ ч.}$$

$$\text{где } n_{т} = n_{к} \left(\frac{T_p}{T_{пт}} - 1 \right) = 3 \left(\frac{25920}{4320} - 1 \right) = 15,$$

$T_{пт}$ и $T_{пк}$ определены по результатам эксплуатации аналога.

Определяем суммарную продолжительность неплановых ремонтов:

$$t_{в} = T_{в} \frac{t_p}{T} = 2 \frac{103680}{5513} = 36 \text{ ч,}$$

здесь $T_{в}$ принято равным $T_{пт} / 2$.

$$t_p = T_p (n_k + 1) = 25920 (3 + 1) = 103680 \text{ ч.}$$

Определяем суммарную продолжительность технических обслуживаний:

$$t_{то} = T_{пто} \left(\frac{t_p}{T_{то}} - \frac{t_p}{T_{пт}} \right) = 0,7 \left(\frac{103680}{168} - \frac{103680}{4320} \right) = 415 \text{ ч.}$$

$T_{то} = 168 \text{ ч}$ (см. руководство по эксплуатации электромагнитных вибраторов).

Определяем коэффициент технического использования:

$$K_{ти} = 1 - \frac{t_{п} + t_{в} + t_{то}}{T_{сл} \cdot 8640} = 1 - \frac{204 + 36 + 415}{8640 \cdot 12} = 0,994.$$

Расчет показателей надежности фильтра-пресса.

Характеристика аппарата

Фильтрпресс ФПМ 100-1000/45К предназначен для фильтрации раствора ронгалита. Основное его отличие от аналога, установленного в цехе по производству ронгалита АО «Химпром» г.Иваново, - большой размер плит и рам.

Составляем расчетную схему надежности (рис. 18):



Рис. 18. Схема надежности фильтра-пресса ФПМ

Определяем интенсивность отказов λ_i элементов и вносим их в таблицу 8.

Интенсивности отказов элементов 1 и 2 принимаем по справочным данным.

По элементам 3, 4, 5 имеются эксплуатационные данные. Средний срок службы фильтровальной ткани составляет 1 месяц, т.е. она является быстроизнашиваемым элементом, поэтому ее интенсивность отказов будет определена после определения ресурса между текущими ремонтами.

Наработка на отказ рам 40000 часов и ее коэффициент вариации 0,35 определены по результатам эксплуатации фильтра-пресса с рамами размером 0,82 м. Разрабатываемый аппарат должен иметь рамы размером 1×1 м, поэтому наработку на отказ его рам определяем в соответствии с разработанной методикой:

$$T_3 = T_{за} M^{-\frac{1}{B}}$$

Масштаб М определяем отношением изнашиваемых поверхностей:

$$M = \frac{F_2}{F_1} = \frac{1 \cdot 1}{0,82 \cdot 0,82} = 1,5.$$

Наработка на отказ рам разрабатываемого фильтра-пресса:

$$T_3 = T_{за} M^{-\frac{1}{B}} = 40000 \cdot 1,5^{-\frac{1}{3,2}} = 35200,$$

где параметр «в» определен по графику при $V = 0,35$.

Интенсивность отказов рам составит:

$$\lambda_3 = \frac{1}{T_3} = \frac{1}{35200} = 28,4 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Аналогично определяем наработку на отказ плит разрабатываемого фильтра-пресса. Нарботка на отказ фильтра-пресса, установленного на указанном выше предприятии, составляет 55000 часов.

$$T_4 = T_{4а} M^{-\frac{1}{B}} = 55000 \cdot 1,5^{-\frac{1}{3,2}} = 48400.$$

Интенсивность отказов плит λ_4 составит:

$$\lambda_4 = \frac{1}{T_4} = \frac{1}{48400} = 20,6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Таблица 10

Показатели надежности элементов фильтра-пресса

Наименование элементов	Количество элементов	Средняя интенсивность отказов λ_i , 10^{-6} 1/ч	Источник информации
1. Привод	1	2,8	
2. Корпус	1	1,1	
3. Рама	50	20,6	
4. Плита	50	28,4	
5. Фильтровальная ткань	1	990,7	

Ресурс между текущими ремонтами назначаем в соответствии с методикой равным γ % ресурсу изнашиваемого элемента – фильтровальной ткани. Ее средний срок службы составляет 1 месяц, т.е. 720 часов. Вид закона распределения и коэффициент вариации 0,35 определили по таблицам справочного приложения № I. Параметры распределения, соответствующие коэффициенту вариации 0,35 определяем по I [16]: $b = 3,1$; $k = 0,895$;

$$a = T_5 / k = 805 \text{ ч.}$$

Определяем γ % ресурс фильтровальной ткани для $\gamma = 0,8$.

$$T_\gamma = a \left(\ln \frac{1}{\gamma} \right)^{\frac{1}{b}} = 805 \left(\ln \frac{1}{0,8} \right)^{\frac{1}{3,1}} = 495,8 \text{ ч.}$$

Назначаем ресурс между текущими ремонтами равным 720, т.е. кратным месячной наработке.

Интенсивность отказов фильтрующей ткани определяем по формуле:

$$\lambda_5 = \frac{\ln \frac{1}{P_i(T_{pt})}}{T_{pt}} ;$$

$$\text{где } P_i(T_{pt}) = e^{-\left(\frac{T_{pt}}{a}\right)^b} ;$$

$$P_i(T_{pt}) = e^{-\left(\frac{T_{pt}}{a}\right)^b} = e^{-\left(\frac{720}{805}\right)^{3,1}} = 0,49 ,$$

$$\lambda_5 = \frac{\ln \frac{1}{P_i(T_{pt})}}{T_{pt}} = \frac{\ln \frac{1}{0,49}}{720} = 990,7 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Определяем наработку на отказ всего аппарата:

$$T = \frac{1}{\sum_{i=1}^N n_i \lambda_i} = \frac{1}{10^{-6} \cdot (2,8 + 1,1 + 50 \cdot 20,6 + 50 \cdot 28,4 + 990,7)} = 290,3 \text{ ч}$$

Ресурс до капитального ремонта определяем по базовому элементу – раме.

Средний ресурс до капитального ремонта фильтра-пресса с рамами 820×820 мм, известный по результатам эксплуатации, составляет 35000 ч. Определяем средний ресурс до капитального ремонта разрабатываемого фильтра-пресса:

$$T_p = T_{pa} M^{-\frac{1}{b}} = 35000 \cdot 1,49^{-\frac{1}{3,2}} = 30800 \text{ ч.}$$

Принимаем ресурс до капитального ремонта кратным назначенному ресурсу между текущими ремонтами (720) и равным 30960 ч. Срок службы до списания:

$$T_{сл} = \frac{T_p \cdot (n_k + 1)}{8640 \cdot K_n} = \frac{30960 \cdot (3 + 1)}{8640 \cdot 1} = 14,3 \text{ года}$$

Срок службы предлагаем определить по следующей формуле, выведенной из предпосылок, что за срок службы целесообразно экономически эксплуатировать оборудование до достижения равенства:

$$K_{кр} \leq Z_{с.э.}$$

где $K_{кр}$ - капитальные затраты (первоначальная стоимость кристаллизатора);

$Z_{с.э.}$ - затраты на содержание и эксплуатацию.

$Z_{с.э.} = A + Z_{рем}$, где $A = N_a K_{кр}$ – величина амортизационных отчислений;

N_a - норма амортизации,

$A = 0,05 \cdot 33000 = 1650$ руб.

$Z_{рем} = 0,017 \cdot 33000 = 561$ руб., $0,017 = 1,7\% / 100$, 17% - условно принятый процент на неплановый ремонт

$Z_{с.э.} = 1650 + 561 = 2211$ руб.

Тогда срок службы по предлагаемой формуле:

$$T_{сл} \leq \frac{K_{кр} - Z_{с.э.}}{Z_{с.э.}} = \frac{33000 - 2211}{2211} = 13,9 \text{ лет.}$$

Коэффициент технического использования принимаем равным $K_{ти}$ аналога, определенного по результатам эксплуатации ($K_{ти} = 1$).

Определяем суммарную продолжительность ремонтов:

$$t_{п} = T_{пт} n_t + T_{пк} n_k = 4 \cdot 60 + 96 \cdot 3 = 528 \text{ ч.}$$

где $n_t = n_k \left(\frac{T_p}{T_{пт}} - 1 \right) = 6 \left(\frac{15840}{1440} - 1 \right) = 60$ - количество текущих ремонтов.

Определяем суммарную продолжительность неплановых ремонтов:

$$t_{\text{в}} = T_{\text{в}} \frac{t_{\text{р}}}{T} = 2 \frac{110880}{4671} = 48 \text{ ч},$$

здесь $T_{\text{в}}$ принято равным $T_{\text{пт}} / 2$.

$$t_{\text{р}} = T_{\text{р}} (n_{\text{к}} + 1) = 15840 (6 + 1) = 110880 \text{ ч}.$$

Определяем суммарную продолжительность техобслуживаний:

$$t_{\text{то}} = n_{\text{то}} \left(\frac{t_{\text{р}}}{T_{\text{то}}} - \frac{t_{\text{р}}}{T_{\text{рт}}} \right) = 0,4 \left(\frac{110880}{168} - \frac{110880}{1440} \right) = 233 \text{ ч}.$$

Коэффициент технического использования кристаллизатора:

$$K_{\text{ти}} = 1 - \frac{t_{\text{п}} + t_{\text{в}} + t_{\text{то}}}{T_{\text{сл}} \cdot 8640} = 1 - \frac{528 + 48 + 233}{8640 \cdot 13,9} = 0,993.$$

IV.3. Надежность ХТО на стадиях изготовления и эксплуатации

IV.3.1. Надежность при изготовлении ХТО, виды отказов при эксплуатации

Прирост производительности общественного труда не менее чем на 2/3 может быть получен за счет достижений науки и техники, а это, в свою очередь, связано с успешным решением технических, организационных и экономических проблем повышения надежности и качества машин, механизмов, аппаратов.

Необходимо отметить, что обеспечение надежности изделий на стадии изготовления зависит прежде всего от надежности технологического процесса, его параметров и влияния их на износостойкость поверхностей, на усталостную прочность деталей, на коррозионную стойкость изделий [18]. А.С.Проников в своей монографии дает весьма четкое определение надежности технологического процесса изготовления оборудования. Обстоятельно рассматривает обеспечение надежности при производстве машин. В эту главу он включил рассмотрение, вернее даже анализ, роли технологии в обеспечении надежности машин, надежности самого технологического процесса, контроля качества и надежности продукции в процессе её изготовления, технологической надежности оборудования, а также, что является необходимым и важным, знание и описание остаточных и побочных явлений технологических процессов, снижающих надежность изделий машиностроения. Надо отметить, что связь параметров технологического процесса с надежностью готового изделия очень сложная, требования надежности иногда вступают в противоречие с требованиями технологического процесса, производительностью и экономичностью.

Все эти специфичные направления обеспечения надежности изделий машиностроительными предприятиями должны учитываться при изучении вопросов обеспечения надежности химико-технологического оборудования на стадии его эксплуатации, а также при разработке комплексной системы управления надежностью на химических предприятиях.

Учитывая изложенное, чтобы не вносить существенных ошибок в разработку КСУОНП (рис.24), а затем и в ее работу, следует включить в систему обеспечения надежности единичные и интегральные показатели надежности и качества оборудования (гл.І, п.І.2.1; гл.ІІ, п.І.1.5; приложение І).

Интегральный показатель качества в ГОСТе 15467-70 трактуется как комплексный показатель качества продукции, который может проявиться (т.е. может быть установлен уровень его величины) только в процессе эксплуатации машины, т.к. он представляет собой соотношение суммарного полезного эффекта от эксплуатации машины и суммарных затрат на ее создание и эксплуатацию. Следовательно, в таком случае весьма важно и, по-видимому, обязательно заводу-изготовителю надо с большой достоверностью использовать перспективные характеристики, параметры изделия (машины, аппарата), которые, являясь единичными показателями

надежности, определяют интегральный показатель. Для изделий машиностроения можно представить интегральный показатель надежности и качества как стоимость единицы работы машины [17]. В системе управления надежностью производства данный показатель является экономическим критерием надежности и качества, т.к., во-первых, является характеристикой эффективности работы производства, во-вторых, является фактором повышения потребительской стоимости машины, в-третьих, определяет величину роста производительности труда на данном производстве.

Практическое значение проблемы обеспечения надежности химико-технологического оборудования весьма велико. «Хотя при современных темпах научно-технического прогресса моральное старение машин происходит быстрее, чем раньше, во многих отраслях фактический уровень еще не достигает оптимальных с экономической точки зрения значений. Увеличение ресурса машин приводит к существенной экономии материалов, энергетических и трудовых затрат, которые в настоящее время идут на пополнение парка машин и их ремонт. Особый интерес представляет проблема прогнозирования индивидуального ресурса машин и конструкций по результатам наблюдений за их состоянием в процессе эксплуатации» [21].

Постановка задачи о прогнозировании ресурса на стадии эксплуатации [21] основывается на информации, получать которую В.В.Болотин рекомендует из трех источников: данные текущего (оперативного) поиска дефектов в процессе эксплуатации; данные о нагрузках и других условиях взаимодействия объекта с окружающей средой; весь объем априорных данных о материалах, элементах, узлах, нагрузках и т.п., то есть информация, которая лежит в основе прогнозирования ресурса и оценки показателей надежности на стадии проектирования (конструирования).

Разработанная методика сбора и обработки информации о надежности химико-технологических систем, химико-технологических процессов и оборудования излагается в гл. I и III данной книги и может быть использована для расчета и обоснования надежности ХТС (ХТП и ХТО). Шифрование (таблицы 1, 2 приложения III), блок-схема (рис.1 приложения III) и расчет надежности по данным цеха ронгалита АО «Химпром» приводятся также в приложении III.

В расчете надежности машин и аппаратов в обязательном порядке следует применять нормативные материалы (ГОСТы, документы и разработки по надежности конструкторских бюро промышленных предприятий, проектных организаций и т.д.).

В каждой отрасли проблему надежности решают по-разному, однако применяют методические разработки общего характера. В расчетах эксплуатационной надежности следует учитывать три категории отказов [21].

К первой категории относятся отказы, не приводящие к длительным или опасным простоям в работе техники. Это отказы второстепенных элементов или агрегатов, которые по своему характеру являются сменными. Надежность по отношению к этой группе В.В.Болотин называет эксплуатационной и показателями надежности считает: среднюю наработку

на отказ или интенсивность отказов. Последний показатель должен удовлетворять условию:

$$\lambda(t) \leq \lambda_*; t \in [0, T_*], \quad (a)$$

где λ_* - предельно допустимая (назначенная) интенсивность отказов;

T_* - назначенный ресурс или срок службы.

Вторая категория отказов – это предельные состояния основных элементов оборудования [21]. Они лимитируют ресурс объекта в целом. Выработка ресурса происходит при нормальных условиях эксплуатации и нормальных условиях окружающей среды. Физико-химические и механические процессы, сопровождающие выработку ресурса носят необратимый характер, развиваются медленно. Последнее делает их относительно легко предсказуемыми (в вероятностном смысле).

$$P(T_*) \geq P_* \quad (б) - \text{вероятность того, что}$$

предельное состояние не будет достигнуто на отрезке $[0, t]$.

Здесь P_* - предельно допустимое (нормативное) значение вероятности $P(t)$. Если необходимо обеспечить гарантированный ресурс $T_g \leq T_*$, то $P(T_g)=1$.

К третьей категории отказов В.В.Болотин относит аварийные ситуации, которые являются результатом редко встречающихся неблагоприятных сочетаний, нагрузок и воздействий, стихийных явлений:

$$H(t) \leq H_*; t \in (0, T_*), \quad (в)$$

где H_* - предельно допустимое (нормативное) значение риска.

Уравнения (а), (б), (в) характеризуют указанные категории отказов и определяют задачу оптимизации (общую и сложную), которая включает в себя модель объекта, модель условий его эксплуатации, экономико-математическую модель, а также условие безопасности (в). Технические условия типа неравенства (а) являются граничными условиями.

В [21] рассматривается задача оптимизации, как одна из задач в теории надежности конструкций, при этом сказано, что «расчетам на надежность нетрудно придать форму, которая соответствует выбору параметров и конструктивных решений на стадии проектирования... Типичная ситуация при проектировании, когда в распоряжении конструктора имеется большее число параметров, чем уравнений и ограничений, а решение задачи не является единственным. Математический путь для устранения неединственности решений основан на использовании оптимизационных критериев, обобщающих конструктивные, технологические, эксплуатационные и другие требования и ограничения. Показатели надежности естественным образом входят либо в целевые функции, либо в ограничения». Решение находится определенной постановкой оптимизации задачи [81]. Решая такого рода задачи, следует более строго подходить к информации статистического и качественного характера. Если неопределенность статистического характера можно уменьшить, увеличивая объем статистических данных, то неопределенность качественного характера может быть разрешена путем использования практического опыта, волевого

решения, интуиции разработчика технического объекта. Анализируя приведенные примеры [21], автор приходит к выводу, что основное затруднение при использовании вероятностно-статистических методов – неполнота и недостоверность статистической информации для выбора вероятностных моделей и оценки их параметров. «Назначение теории в таких случаях – дать общую схему расчета и указать направления, по которым должно идти совершенствование нормативных материалов и накопление статистической информации» [21].

IV.3.2. Эксплуатационная надежность некоторых видов химико-технологического оборудования

Большинство химических предприятий, как известно, представляют собой крупные машинные производства и относятся в системах АСУП к системам большого масштаба. Это означает, что любое химическое предприятие оснащается не просто большим количеством, а огромным (до 1000 и более) количеством различных видов оборудования. Поэтому далее в данной книге мы попытаемся осветить поставленный вопрос только по наиболее широко используемым в химической промышленности видам оборудования.

Рассмотрим эксплуатацию надежности химического оборудования на примере работы кристаллизаторов.

Основные виды кристаллизаторов, недостатки в их работе

Простейшими аппаратами для кристаллизации являются ящичные кристаллизаторы. Они представляют собой открытые прямоугольные ящики, в которых подвешиваются ленты или нити. Кристаллизация происходит путем естественного охлаждения раствора и испарения части растворителя в воздух. Основная масса чистых кристаллов осаждается на поверхности лент или нитей и удаляется с маточником. Такие кристаллизаторы работают периодически и неинтенсивно, отличаются громоздкостью и требуют применения ручного труда [38].

В современных кристаллизаторах применяют водяное или воздушное охлаждение, либо ведут кристаллизацию в вакууме.

Кристаллизаторы с водяным охлаждением

В этих кристаллизаторах тепло от раствора к охлаждающей воде передается через стенку, причем кристаллизация происходит вследствие охлаждения раствора.

В случае необходимости получения более низких температур, чем это возможно при водяном охлаждении, применяют охлаждение при помощи холодильных рассолов.

Кристаллизатор с мешалкой состоит из сосуда, в котором вращается мешалка. Охлаждающий агент движется по змеевику. Благодаря вращению мешалки выпадающие кристаллы не осаждаются на дне, а остаются в растворе во взвешенном состоянии. Такие кристаллизаторы работают периодически и непрерывно. При периодической работе аппарат заполняют

раствором. По окончании работы производят разгрузку через патрубок, имеющий клапан. При непрерывной работе соединяют последовательно несколько аппаратов. Благодаря простоте эти кристаллизаторы имеют широкое распространение.

Кристаллизаторы такого типа изготавливают иногда с рубашками (вместо змеевиков), чтобы устранить выпадение кристаллов на стенках аппарата. Лопасти мешалки снабжают скребками или металлическими щетками.

Недостатками кристаллизаторов такого типа являются их громоздкость и небольшая производительность.

Кристаллизаторы с воздушным охлаждением

В таких кристаллизаторах охлаждение раствора производится путем непосредственного соприкосновения его с воздухом. Вследствие этого одновременно с охлаждением происходит испарение части растворителя в воздух.

Барабанный вращающийся кристаллизатор представляет собой цилиндрический аппарат, наклонный к горизонту. Барабан опирается на 2 пары вращающихся опорных роликов и приводится во вращение при помощи зубчатого венца. Раствор подается с одного конца барабана, а кристаллы и маточный раствор выводят с другого конца. Воздух нагнетается вентилятором и движется противотоком движению раствора. Недостатком вращающихся барабанных кристаллизаторов является их громоздкость.

Вакуум - кристаллизаторы

Они конструируются как для периодического, так и для непрерывного процессов. В аппаратах непрерывного действия поддерживается постоянный вакуум, отвечающий заданной конечной температуре кристаллизации.

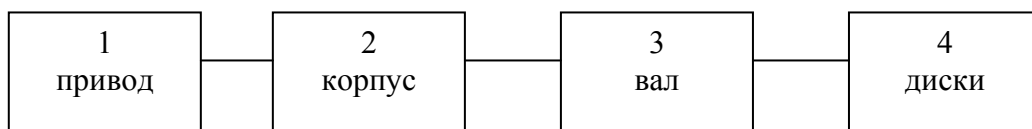
Вакуум – кристаллизаторы являются экономичными и удобными в обслуживании аппаратами. Они герметичны, не имеют теплопередающих поверхностей.

Расчет показателей надежности кристаллизатора

в производстве ронгалита (барабанный, дисковый кристаллизатор)

Характеристика аппарата

Кристаллизатор ПМК-30 предназначен для кристаллизации ронгалита. Кристаллизатор имеет 12 элементов теплообмена (дисков). Составляем расчетную схему надежности:



Определяем интенсивность отказов элементов.

Интенсивность отказов элементов 1 и 2 принимаем по справочным данным. По элементам 3 и 4 имеются эксплуатационные данные. Средний срок службы диска составляет 6 месяцев, т.е. он является наиболее быстроизнашиваемым элементом, поэтому его интенсивность отказов будет определена после определения ресурса между текущими ремонтами.

Ресурс между текущими ремонтами назначаем равным γ -% ресурсу изнашиваемого элемента – диска. Его средний срок службы составляет 6 месяцев, т.е. 4320 ч. Вид закона распределения и коэффициента вариации 0,35 определили по таблицам справочного приложения [68]. Параметры распределения, соответствующие коэффициенту вариации 0,35, определяем по [12]:

$$B = 3,1; \quad K = 0,895; \quad a = T_4 / K = 4827 \text{ ч.}$$

Определяем γ -% ресурс диска для $\gamma = 0,8$ в соответствии с [20]:

$$T_\gamma = a \left(\ln \frac{1}{\gamma} \right)^{\frac{1}{B}} = 4827 \left(\ln \frac{1}{0,8} \right)^{\frac{1}{3,1}} = 2992,74 \text{ ч.}$$

Назначаем ресурс между текущими ремонтами равным 1440 часов, т.е. кратным месячной наработке (720).

Интенсивность отказа диска определяем по формуле:

$$\lambda_4 = \frac{\ln \frac{1}{P_i(T_{\text{пр}})}}{T_{\text{пр}}} = \frac{\ln \frac{1}{0,976}}{1440} = 16,8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч,}$$

$$P_i(T_{\text{пр}}) = e^{-\left(\frac{T_{\text{пр}}}{a}\right)^B}.$$

Определяем наработку на отказ всего аппарата:

$$T = \frac{1}{\sum_{i=1}^N n_i \lambda_i} = \frac{1}{10^{-6} (2,8 + 1,1 + 8,6 + 12 + 16,8)} = 4671 \text{ ч.}$$

Ресурс до капитального ремонта определяем по базовому элементу (корпус). Средний ресурс до капитального ремонта кристаллизатора установленного на заводе, известный по результатам эксплуатации составляет 17280 ч. Определяем средний ресурс до капитального ремонта разрабатываемого кристаллизатора.

$$T_p = T_{\text{ра}} M^{\frac{1}{B}} = 17280 \cdot 1,37^{\frac{1}{3,1}} = 15609 \text{ ч.}$$

Принимаем ресурс до капитального ремонта кратным назначенному ресурсу между текущими ремонтами (1440) и равным 15840 ч. Срок службы до списания:

$$T_{\text{сл}} = \frac{T_p (n_k + 1)}{8640 K_{\text{и}}} = \frac{15840 (6 + 1)}{8640 \cdot 1} = 13 \text{ лет.}$$

Срок службы предлагаем определить по следующей формуле, выведенной из предпосылок, что за срок службы целесообразно экономически эксплуатировать оборудование до достижения равенства:

$$K_{\text{кр}} \leq Z_{\text{с.э}},$$

где $K_{\text{кр}}$ - капитальные затраты (первоначальная стоимость кристаллизатора);

$Z_{\text{с.э}}$ - затраты на содержание и эксплуатацию.

$Z_{\text{с.э}} = A + Z_{\text{рем}}$, где $A = N_a K_{\text{кр}}$ – величина амортизационных отчислений;

H_a - норма амортизации,

$A = 0,05 \cdot 33000 = 1650$ руб.

$З_{рем} = 0,017 \cdot 33000 = 561$ руб., $0,017 = 1,7\% / 100$, 17% - условно принятый процент на неплановый ремонт.

$З_{с.э.} = 1650 + 561 = 2211$ руб.

Тогда срок службы по предлагаемой формуле:

$$T_{сл} \leq \frac{K_{кр} - З_{с.э.}}{З_{с.э.}} = \frac{33000 - 2211}{2211} = 13,9 \text{ лет.}$$

Коэффициент технического использования принимаем равным $K_{ти}$ аналога, определенного по результатам эксплуатации ($K_{ти} = 1$).

Определяем суммарную продолжительность ремонтов:

$$t_{п} = T_{пт} n_T + T_{пк} n_K = 4 \cdot 60 + 96 \cdot 3 = 528 \text{ ч.}$$

где $n_T = n_K \left(\frac{T_p}{T_{рт}} - 1 \right) = 6 \left(\frac{15840}{1440} - 1 \right) = 60$ - количество текущих ремонтов.

Определяем суммарную продолжительность неплановых ремонтов:

$$t_B = T_B \cdot \frac{t_p}{T} = 2 \cdot \frac{110880}{4671} = 48 \text{ ч,}$$

здесь T_B принято равным $T_{пт} / 2$.

$$t_p = T_p (n_K + 1) = 15840 (6 + 1) = 110880 \text{ ч.}$$

Определяем суммарную продолжительность техобслуживаний:

$$t_{то} = n_{то} \left(\frac{t_p}{T_{то}} - \frac{t_p}{T_{рт}} \right) = 0,4 \left(\frac{110880}{168} - \frac{110880}{1440} \right) = 233 \text{ ч.}$$

Коэффициент технического использования кристаллизатора:

$$K_{ти} = 1 - \frac{t_{п} + t_B + t_{то}}{T_{сл} \cdot 8640} = 1 - \frac{528 + 48 + 233}{8640 \cdot 13,9} = 0,993.$$

IV.4. Обеспечение надежности химико-технологического оборудования ремонтной службой предприятия

Решение проблем повышения надежности и эффективности технических систем необходимо для разработки (создания) обоснованной стратегии эксплуатации, которая должна строиться на основании объективных характеристик безотказности и ремонтпригодности, данных в условиях эксплуатации, структуры системы, характеристик индикации отказов и т.п. Выбор оптимальной стратегии позволяет достичь наилучших результатов эксплуатации без привлечения дополнительных средств. В теорию надежности некоторые специалисты и ученые ввели понятие «живучесть». Этот термин применяется для характеристики сложных и ответственных систем, к числу которых относятся транспортные и энергетические средства, системы связи, к их числу можно отнести химико-технологические производства.

Живучесть – свойство системы продолжать нормальное функционирование с допустимыми показателями эффективности при непрогнозируемых или преднамеренных воздействиях. Такими воздействиями могут быть либо стихийные (природные) явления, либо активные внешние вмешательства [1].

Важным отличием задачи оценки живучести от других близких задач (оценки безотказности, устойчивости и т.п.) является то, что для этой задачи невозможно использовать вероятностные характеристики, вероятностные критерии оценок. Одним из показателей количественного измерения живучести является показатель эффективности или противоположный ему – минимальный ущерб после фиксированной совокупности воздействий. Предусмотренная на промышленных предприятиях инфраструктура и, в частности, ремонтное производство повышают работоспособность химико-технологического оборудования, увеличивают его долговечность.

IV.4.1. Эффективность ремонтного обслуживания и его влияние на надежность ХТО

Надежность основного производства, рост производительности труда и объема продукции на химических предприятиях существенно зависят от эффективности работы вспомогательных служб и главным образом ремонтно-механической. Следствием внедрения мероприятий по реорганизации ремонтного хозяйства на основе централизации и специализации ремонтов, изготовления запчастей на специализированных предприятиях является повышение производительности труда ремонтных рабочих, уменьшение времени простоя оборудования в ремонте, улучшение качества ремонта, улучшение контроля за эксплуатацией и удлинение межремонтного периода. Анализ факторов, влияющих на эффективность данных мероприятий, позволяет из всего их многообразия выделить наиболее существенные:

- а) повышение квалификации рабочих-ремонтников ремонтно-механических цехов (РМЦ);
- б) совершенствование системы оплаты труда и материального стимулирования;
- в) улучшение планирования, изготовления и распределения материалов и запасных частей;
- г) совершенствование плановых показателей РМЦ и внедрение службы хозрасчета во всех звеньях данного производства.

Итак, повышение надежности работы ремслужбы увеличивает надежность основного производства.

Для повышения эффективности ремонтного обслуживания необходимо исследовать роль системы ремонтного обслуживания в формировании эффективности функционирования предприятий, надежности их работы, необходимо изучить связь между сроками службы и параметрами системы

ремонтного обслуживания, разработать соответствующий механизм управления, способствующий повышению эффективности.

Действие физического и морального износа основных фондов (в т.ч. оборудования) носит нелинейный характер во времени. Это обстоятельство подтверждает то, что имеет место оптимальный срок эксплуатации изделия при определенной системе использования и определенной системе ремонтно-эксплуатационного обслуживания и, следовательно, необходимо обосновать для характеристики влияния качества ремонта оборудования на надежность функционирования химического производства следующее:

- 1) понятие и сущность оптимальности срока службы;
- 2) критерий оптимизации;
- 3) методика расчета оптимального срока службы;
- 4) оптимальные затраты на ремонтное обслуживание.

Для решения такой задачи выдвигаются следующие требования:

- народнохозяйственный подход для определения оптимальных сроков службы;
- учет параметров системы ремонтного обслуживания, т.к. на продолжительность функционирования оборудования кроме чисто экономических требований в реальных условиях накладываются ограничения двух видов: функциональные (необходимые оптимальные показатели качества работы) и производственные (возможности по производительности главным образом ведущих видов ХТО);
- учет различий плановых и внеплановых ремонтов;
- минимизация затрат на осуществление определенных производственных функций, т.е. функционально-системный подход к решению данной проблемы.

Руководствуясь вышеуказанными требованиями, можно сказать, что под оптимальным сроком службы оборудования следует понимать срок службы оборудования с определенными технико-экономическими показателями, функционирующего в определенном промышленно-хозяйственном регионе со сложившимися экономическими и производственно-хозяйственными связями и определенной производственной и ремонтной возможностями, посредством которых достигается наиболее экономичная реализация заданных производственных функций [27].

Наличие внеплановых ремонтов или принятие каких-либо других внеплановых мер по устранению непредвиденных остановов (отказов) оборудования сокращает его оптимальный срок службы и увеличивает затраты по обслуживанию оборудования. Следовательно, рассматривая систему ремонтного обслуживания как фактор, формирующий срок службы оборудования в определенных производственно-хозяйственных условиях эксплуатации, необходимо изучить ее с точки зрения содержания, сущности результата, взаимосвязи с основным производством. Тогда показатель качества и надежности функционирования системы (изделия) должен

характеризоваться математической моделью, учитывающей качество объекта в определенной сфере эксплуатации [27]:

$$K_{\phi} = F(k_1, k_2, k_3 \dots k_n, J_1, J_2 \dots J_m), \quad (IV.8)$$

где k_i - показатель качества и надежности изделия;

J_j - характеристика сферы эксплуатации.

Методика расчета показателя качества и надежности функционирования системы (изделия, оборудования) предполагает:

$$K_{\phi} = \frac{P_{\kappa.\phi}}{\sum Z_0} \quad (IV.9)$$

где $P_{\kappa.\phi}$ - результаты качественного функционирования основного и вспомогательного производств;

$\sum Z_0$ - суммарные приведенные затраты на проектирование, производство и эксплуатацию.

Обобщенный показатель $P_{\kappa.\phi}$ может быть учтен в формуле (IV.9) в зависимости от требований к характеристике показателя K_{ϕ} (формула (IV.8)) по-разному. Например, при повышении безотказности работы оборудования основного производства в результате повышения качества ремонта этого оборудования $P_{\kappa.\phi}$ будет равен показателю безотказности работы оборудования.

За характеристику качественного функционирования системы или какого-либо объекта $P_{\kappa.\phi}$ можно принять также и следующие показатели:

1. Удельные затраты ремонтной службы в себестоимости выпускаемой химической продукции:

$$Z_{\text{уд.}}^{\text{рмц}} = \frac{Z^{\text{рмц}}}{C}, \quad (IV.10)$$

где C - себестоимость химической продукции.

2. Дополнительная прибыль, получаемая в основном производстве (от реализации химической продукции) за счет сокращения издержек в ремонтном хозяйстве:

$$\Delta\Pi = (Z_1^{\text{рмц}} - Z_2^{\text{рмц}}) B \quad (IV.11)$$

где $Z_1^{\text{рмц}}$, $Z_2^{\text{рмц}}$ - издержки ремонтного хозяйства соответственно до и после повышения надежности функционирования системы (оборудования);

B - выпуск химической продукции за год.

$Z_i^{\text{рмц}}$ можно укрупненно определить исходя из первоначальной стоимости основных фондов (оборудования) - $ОФ$ и нормы амортизации объекта на реновацию и капитальный ремонт - H_a по зависимости:

$$Z_i^{\text{рмц}} = H_a \cdot ОФ. \quad (IV.12)$$

3. Важным является показатель производительности труда – $Пт$, определяемый как объем выполненных ремонтных работ в единицу времени одним рабочим-ремонтником или одной бригадой рабочих-ремонтников. При увеличении $Пт$ не должен страдать показатель качества ремонта, иначе это

может привести к уменьшению продолжительности межремонтного цикла $T_{ц}$.

4. Еще одним показателем для расчета $K_{р.ф}$ можно считать срок службы изделия (оборудования), определяемый при учете количества средств, истраченных на содержание, эксплуатацию, ремонт и восстановление объекта за весь срок его эксплуатации:

$$T_{сл} = \frac{ОФ - (A_{рен} + H_a ОФ)}{(A_{рен} + H_a ОФ)}, \quad (IV.13)$$

где $A_{рен}$ - часть амортизационных отчислений, предназначенных на реновацию.

Зависимость (IV.13), предложенная для расчета $T_{сл}$, является следствием предпосылки экономической целесообразности эксплуатации оборудования (изделия) до достижения равенства расходов:

$$ОФ \leq (A_{рен} + H_a ОФ). \quad (IV.14)$$

В формуле (IV-9) суммарные приведенные затраты на проектирование, производство и эксплуатацию объекта Z_0 могут быть определены:

$$Z_0 = ОФ + (A_{рен} + Z^{рмц}). \quad (IV.15)$$

В показателе $ОФ$ - первоначальная стоимость основных фондов - содержатся затраты на проектирование и изготовление изделия (оборудования).

Рассматривая показатель качества и надежности функционирования системы (IV.8) как общий комплексный показатель, можно определить объективный и точный срок службы объекта (оборудования), как функцию $K_{ф}$,

$$\text{т.е. } T_{сл} = f(K_{ф}). \quad (IV.16)$$

Показатель срока службы оборудования, рассчитанный по предложенной методике, будет являться основным показателем надежности и качества, обобщающим технические и экономические факторы функционирования производства и воздействия их на величину данного показателя.

Итак, моделью (IV.8) доказано, что система ремонтного обслуживания при воздействии ее на эффективность производственно-хозяйственной деятельности предприятий должна рассматриваться в двух направлениях:

$$\mathcal{E}_{пр} = f(K_{ф}^{рем}), \quad (IV.17)$$

$$\mathcal{E}_{пр} = f(K_{ф}^{пр}), \quad (IV.18)$$

где $K_{ф}^{рем}$ - показатель качества и надежности функционирования системы ремонта объекта (оборудования), т.е. ремонтного хозяйства;

$K_{ф}^{пр}$ - показатель качества и надежности функционирования системы основного производства (в частности, оборудования, подвергавшегося ремонту).

Анализ эффективности действующих производств показал, что в настоящее время оценки показателя эффективности ремонта, оценки показателя эффективности работы ремонтной службы имеют существенные недостатки, обусловленные тем, что они не учитывают влияния их на эффективность работы основного производства. Для ликвидации такого положения в разрабатываемой системе комплексного управления надежностью производств необходимо предусмотреть оценки эффективности производств, в которых бы учитывались показатели $Z_{уд}^{рмц}$, $\Delta П$, $T_{сл}$, $P_{тр}^{рем}$ – производительность труда рабочих-ремонтников и др., характеризующие эффективность ремонта и эффективность работы ремонтных служб, т.е. необходимо включить эти показатели в общую оценочную систему показателей КСУОМП. А это, в свою очередь, предусматривает развитие изучения вопросов управления ремонтного обслуживания, экономического и организационного механизма управления ремонтной службой.

Прежде всего необходимо рассмотреть структуру управления системой ремонтного обслуживания (рис.19).

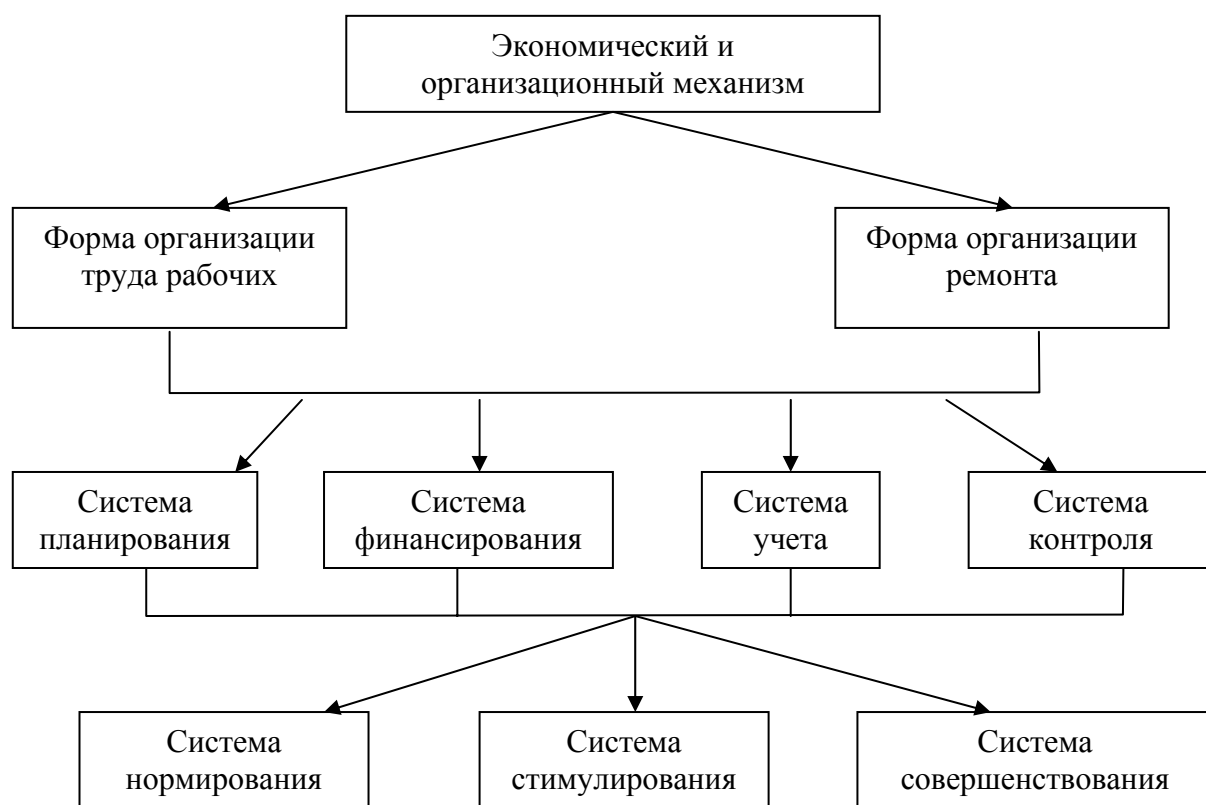


Рис. 19. Управление системой ремонтного обслуживания

Главными в структуре управления (рис.19) являются форма организации труда рабочих и форма (способ) организации ремонта объекта (оборудования).

В настоящее время наиболее перспективными являются коллективные формы организации труда. Анализ литературы по этому вопросу и

фактических материалов работы предприятия показал, что существуют различные виды коллективного труда и их организации, имеющие свои особенности формирования коллективных форм труда.

IV.4.2. Коррозионный износ и оценка старения химико-технологического оборудования (ХТО)

Известно, что в процессе эксплуатации изменяются свойства функционирующего объекта, в том числе изменяются показатели его надежности. Оборудование химико-технологических производств изготавливается в основном из различного вида металлов. В химических производствах оно особенно сильно подвергается коррозионному износу из-за воздействия агрессивных химических сред, высоких температур и давлений. Проблеме коррозии посвящено много исследований, накоплен большой опыт работниками химической, металлургической, пищевой и др. отраслей промышленности, где коррозия проявляется как угроза катастрофических последствий, имеется ряд публикаций, освещающих коррозию.[12, 84–96 и др.]. Определение коррозии металла и других материалов, коррозионные процессы, их классификация, природа происхождения и протекания, влияние коррозии на состояние технических устройств, - вот неполный перечень проблем и причин, оказывающих влияние на надежность ХТО и подлежащих в определенной степени освещению, для принятия соответствующих мер с целью уменьшения (исключения) этого явления. Борьба с коррозией занимает важное место при ведении химико-технологических процессов и поддержании технологического оборудования в работоспособном (надежном) состоянии. Потери от коррозии составляют значительную долю средств, вкладываемых в производство. Они связаны, во-первых, с преждевременным выходом из строя технологической аппаратуры, что требует или полной замены такого оборудования, или дополнительных расходов на восстановление (ремонт) неисправного аппарата, машины. Во-вторых, убытки обуславливаются необходимостью затрат на борьбу с коррозией, защиту технических средств от потери надежности вследствие коррозионных процессов. Прогнозирование возникновения коррозии, динамики развития и протекания этого процесса, а также результаты испытаний и справочные материалы могут помочь в решении вопроса повышения надежности оборудования, подвергающегося коррозионному износу.

Государственные стандарты СтсЭВ 3630-82; 9.039-74; 9.080-77; 9.901.1-89; 9.905-82; 9.917-91 и др. определяют классификацию и обозначения в коррозии, общие требования к металлам и сплавам, шкалу коррозионной стойкости материалов, методы испытаний на коррозионную стойкость, средства и способы защиты от коррозии.

Проблемы, которые приходится решать в связи с появлением (возникновением) и развитием коррозионных процессов, определяются государственными стандартами.

ГОСТ 9.101-78 устанавливает определение, назначение, структуру и состав единой системы защиты изделий и материалов от коррозии, старения и биоповреждений (ЕСЗКС), правила наименования и обозначения стандартов системы.

ЕСЗКС – комплекс взаимосвязанных государственных стандартов, устанавливающих общие для всех видов материалов и изделий требования, правила, нормы и методы по обеспечению защиты их от коррозии, старения и биоповреждений на стадиях разработки, производства и эксплуатации (хранения).

Стандарты ЕСЗКС способствуют решению следующих задач:

- повышению сохраняемости и долговечности изделий за счет применения комплексной защиты от коррозии, старения и биоповреждений;
- увеличению сроков хранения изделий без переконсервации;
- унификации и сокращению номенклатуры применяемых средств и методов защиты, методов испытаний;
- сокращению расходов на мероприятия по защите изделий и материалов от коррозии, старения и биоповреждений в результате рационального конструирования изделий, повышения качества и совершенствования технологии применения средств и методов защиты.

Структура ЕСЗКС включает группы взаимоувязанных государственных стандартов (дополнительный пункт 2.3.), объединенных по видам защиты изделий и материалов от коррозии, старения и биоповреждений, а также группы по агрессивности условий эксплуатации, выбору конструкционных материалов, методам коррозионных испытаний металлов и сплавов.

Структура стандартов ЕСЗКС приводится в таблице ГОСТ 9.101-78. Обозначение стандартов ЕСЗКС по ГОСТ 1-0-85. Регистрационный номер должен начинаться с цифры 9, определяющей комплекс стандартов.

ГОСТ 9.311-87 определяет метод оценки коррозионных поражений металлических и неметаллических неорганических покрытий по изменению внешнего вида после коррозионных испытаний, дефектации образцов при эксплуатации и хранении. Метод заключается в визуальном определении вида коррозионных поражений образцов с последующим измерением площади, занятой этими поражениями. Виды коррозионных поражений образцов с различными покрытиями и их условные обозначения приводятся в таблице 1 данного ГОСТа.

При невозможности непосредственного измерения очаг очерчивают прямоугольной фигурой и вычисляют ее площадь по формуле:

$$S_i = \frac{\sum_{k=1}^n S_{ik}}{S_{\text{оцен.}}} 100 ,$$

где i – А, Б, ... N – виды коррозионных поражений по табл.1;

n – количество коррозионных очагов i -го вида поражения;
 S_{ik} – площадь одного k -го коррозионного очага i -го вида поражения, см^2 .

Текущая информация о вновь утвержденных и пересмотренных стандартах, а также принятым к ним изменениям публикуется в выпускаемом ежемесячно информационном указателе «Государственные стандарты» [97].

Слово коррозия латинского происхождения, в переводе означает «разъедание». Коррозией называют разрушение металлов или сплавов в результате химического или электрохимического взаимодействия с окружающей средой [84]. Химическая коррозия металлов имеет место в неэлектролитах. В электролитах коррозия сопровождается возникновением электрического тока и поэтому называется электрохимической. Известно, что коррозия определяется следующими факторами: материал, из которого изготавливают химико-технологическое оборудование и состояние его поверхности; параметры проводимого в этом оборудовании химико-технологического процесса; сырье и материалы, находящиеся в оборудовании в процессе обработки и т.д. Это и определяет надежность оборудования. Сырье и материалы, перерабатываемые для получения продукции, являются той агрессивной средой, которая вызывает коррозионные процессы. Влияние различных факторов и особенно окружающей среды, условий, способствующих возникновению и развитию коррозии, следует учитывать при проектировании оборудования для надежной его эксплуатации.

Объекты, подвергающиеся коррозии и рассматриваемые в данной книге, являются техническими изделиями, это оборудование химико-технологических производств. Технологическое оборудование других отраслей промышленности (производство строительных материалов, отделочное производство в текстильной и легкой промышленности, пищевой и металлургической промышленности и т.д.) и тем более химической промышленности, в основном, изготавливается, как было сказано выше, из металла. Но не только металл служит исходным материалом для изготовления технологического оборудования в названных и других отраслях промышленности.

Современное развитие многих отраслей промышленности стало возможным благодаря внедрению таких материалов, как высококачественная керамика, пластмассы, кислотоупорные цементы, дерево, уголь, графит, битумные материалы, материалы на основе каучука, литые силикатные материалы, лакокрасочные покрытия и т.д. В производствах, где применялись высоколегированные стали, цветные металлы, в настоящее время применяют неметаллические материалы неорганического и органического происхождения.

Физико-химические свойства таких материалов представлены в справочнике [84], опубликованном под редакцией Н.А.Доллежала. Помимо низкой стоимости и доступности к неметаллическим химически стойким материалам предъявляются следующие требования:

- 1) химическая стойкость, т.е. способность материала противостоять химическому воздействию агрессивной среды;
- 2) термическая стойкость, т.е. способность материала противостоять действию повышенной температуры и резкой перемене ее без изменения свойств и формы;
- 3) непроницаемость, т.е. свойства металла не пропускать жидкость или газы;
- 4) механическая прочность, т.е. способность материала сопротивляться растяжению, сжатию, изгибу и т.д.;
- 5) небольшой объемный вес;
- 6) легкость обработки;
- 7) хорошая сцепляемость с другими материалами (для футеровки, покрытия, облицовки и т.д.)

Перечисленными свойствами идеально не может обладать ни один материал (металлический, неметаллический). Поэтому, для соответствующей коррозионной среды должен быть выбран определенный вид материала. Например, растворы едких и углекислых щелочей действуют разрушающе на все силикатные материалы, кремнезем которых образует с гидроокисью щелочного металла растворимые соединения. Портландцемент и др. марки гидравлических вяжущих, в основном состоящие из силикатов кальция и нестойкие во всех минеральных кислотах (кроме фосфорной), стойки в щелочных растворах. Химическая стойкость материалов органического происхождения зависит от строения их молекул и молекулярного веса. Чем больше молекулярный вес вещества, тем оно более инертно. Высокомолекулярные вещества (фенолформальдегидные смолы, поливинилхлорид и т.д.) химически весьма стойки. Химическая стойкость бутумных материалов объясняется преобладанием в их составе сложных углеводородов. Насыщенные высокомолекулярные соединения (парафин, полиэтилен) более стойки, чем ненасыщенные. На физико-механические свойства высокополимерных конструкционных материалов оказывают влияние степень полимеризации, разветвленность цепей и другие причины.

Всякого рода включения и прожилки ослабляют химическую стойкость материала, т.к. разрушение обычно начинается на их границах.

Материалы органического происхождения, стойкие в химическом отношении, нельзя использовать при температуре свыше 200-250⁰С, т.к. в таких условиях начинается полный распад органического вещества.

Характер и степень разрушения неметаллических материалов органического и неорганического происхождения отличаются. Разрушение материалов неорганического происхождения сопровождается убылью веса и объема материала, а материалы органического происхождения при разрушении увеличиваются в весе и объеме.

Эффективность неметаллических материалов зависит также от техники нанесения покрытий на аппаратуру, что определяет степень обеспечения надежности химико-технологического оборудования на стадии его изготовления.

Для изготовления различных технических средств используют металлы, специальные стали и сплавы. Введение в обычную углеродистую сталь примесей различных элементов существенно влияет на ее свойства. Добавка кремния сказывается на увеличении эластичности, марганца – вязкости, вольфрама – твердости и т.д. [95]. Комбинируя подобные легирующие добавки (присадки) в определенных соотношениях, получают специальные стали с самыми разнообразными свойствами. Большой химической стойкостью и механической прочностью при высоких температурах обладает «пирофераль» (68 вес % Fe, 30 – Al, 1 – C, 0,5 – Mn, 0,5 – Si). Сталь с содержанием 18%W, 4 – Cr, 1 – V называется «быстрорежущейся», сохраняет свою твердость до температуры красного каления и поэтому применяется для изготовления инструментов (резцы, сверла и т.п.). Азотирование стали – насыщение ее поверхности на глубину 0,2 – 0,4 мм азотом (путем длительного нагревания в атмосфере аммиака до 500-600⁰C) - придает твердость значительно большую, чем лучшая инструментальная сталь, устойчивость по отношению к истиранию. Некоторые сорта сталей содержат большое количество никеля, например, обычная нержавеющая сталь включает 18% Cr и 9% Ni. Сталь с содержанием 36% Ni, 0,5% Mn и 0,5% C («инвар») характеризуется очень малым термическим коэффициентом расширения и поэтому служит материалом для изготовления различных точных приборов. Кроме специальных сталей, никель входит в состав ряда технических важных сплавов с Cu, Mn, Cr и т.д. Сплав состава 68вес.% Ni, 28 – Cu, 2,5 – Fe, 1,5 – Mn («монельметалл») обладает большой устойчивостью по отношению к различным химическим воздействиям и применяется при изготовлении некоторых частей аппаратуры химических заводов. Сплав состава 53,8вес.% Fe, 29 – Ni, 17 – CO, 0,2 – Mn («ковар») обладает высокой устойчивостью по отношению к действию ртутных паров.

Выбор материала для изготовления машин и аппаратов, как уже было сказано выше, играет значительную роль в обеспечении надежности ХТО, но основным материалом все-таки является металл. Конструкторы пользуются справочными материалами [84÷94] при определении коррозионной стойкости металла. Классификация стойкости металлов разделяет их на шесть групп: I – совершенно стойкие (скорость коррозии < 0,001 мм/год), II – весьма стойкие (до 0,01 мм/год), III – стойкие (до 0,1 мм/год), IV – относительно стойкие (до 1,0 мм/год), V – малостойкие (от 1,0мм/год до 10 мм/год), VI –нестойкие (свыше 10 мм/год).

Скорость коррозии какого-либо металла выражается в г/(м²ч) по данным потери веса образца металла, отнесенной к единице площади за определенный промежуток времени (в случае равномерной коррозии).

Возникновение, развитие и протекание коррозии возможно под влиянием агрессивной-коррозионной среды – это газы, неэлектролиты (химическая коррозия) и электролиты (электрохимическая коррозия). Для протекания процессов коррозии необходимо наличие воды или водного раствора за исключением высокотемпературной коррозии, при которой

металлы в условиях повышенных температур реагируют непосредственно с газовой фазой [12 т.Х].

Присутствие воды значительно повышает скорость коррозии: вода, выделяющаяся в ходе реакций, влажные сырье и материалы, водяной пар на поверхности раздела фаз и т.д.

При этом совершенно не обязательно, чтобы на поверхности стенок аппарата (машины) находились капли воды, достаточно тонкой пленки влаги, адсорбированной на поверхности, как это может происходить при относительной влажности более 60-70% [12, т.Х].

Ввиду слабой растворимости воды в органических соединениях и ее способности образовывать азеотропы, мельчайшие примеси воды могут конденсироваться в виде капелек, если это происходит в стальных сосудах, то может возникнуть сильная местная коррозия [89]. Коррозия сталей в воде обусловлена электрохимической реакцией. На поверхности металла протекают два сопряженных процесса – анодный и катодный [87]. В ходе анодного процесса атомы металла переходят в электролит в виде ионов. Катодный процесс сводится к восстановлению деполяризаторов: восстановление ионов водорода (водородная деполяризация), восстановление кислорода (кислородная деполяризация). В пресной, речной, морской воде и во влажной атмосфере коррозия металлов происходит преимущественно с кислородной деполяризацией. А.М.Сухотин, А.Ф.Богачев и др.[87] обстоятельно рассматривают коррозионные процессы в таких коррозионных средах, как водные среды; агрессивные газы (кислород, диоксид углерода, азот и др.); органические вещества и ионы металлов в системах теплоснабжения; продукты сгорания топлива; высокотемпературные теплоносители (расплавы хлоридов и бромидов алюминия, титана, сурьмы, эвтектические смеси галогенидов и нитратов различных металлов); хладоносители (фреон, аммиак, различного рода рассолы, водные растворы хлоридов натрия, кальция, магния и т.д.). В химической промышленности все технологические процессы осуществляются в агрессивных, коррозионных средах.

А.Г.Кульман [94], формулируя понятие коррозии, предлагает три основных признака: 1) коррозия по своей химической природе – процесс окислительный; 2) коррозия – топохимически (греч. *topos* – место, местность) поверхностный процесс; 3) коррозионные процессы возникают и протекают самопроизвольно (разрушение, вызываемое химическим или электрохимическим взаимодействием металла (материала) с окружающей средой).

А.Г.Кульман, называя эти три признака коррозии, по существу предлагает классификацию коррозии в зависимости от природы этого явления. Классификация коррозионных процессов является составляющей теории коррозии. Согласно [73, 84÷96 и др.], ГОСТ 9.101-78 различают виды коррозии по условиям протекания и по характеру разрушения, наносимого коррозией.

По условиям протекания можно назвать следующие виды коррозии: атмосферную, подводную, подземную, биокоррозию, контактную, щелевую, под напряжением, при трении, газовую и др.

Атмосферная – коррозия металлов в атмосфере воздуха, а также любого влажного газа.

Подводная – коррозия металла, полностью погруженного в воду.

Подземная – коррозия металла в почвах и грунтах.

Названным выше видам коррозии подвергаются металлоконструкции, устанавливаемые для ограждения технологического оборудования, для установки на них химико-технологического оборудования (на открытых площадках), некоторые из видов ХТО, установленного и работающего на открытых площадках (градирни, ректификационные колонны и др.)

Биокоррозия – коррозия металлов под влиянием продуктов жизнедеятельности микроорганизмов или при наличии в действующей среде (почве, воде и т.д.) сульфатвосстанавливающих бактерий. Ряд почвенных бактерий вырабатывает вещества, агрессивно действующие на металлы: CO_2 , SO_2 , H_2S и др.

Контактная – электрохимическая коррозия, вызванная контактом металлов, имеющих разные стационарные потенциалы в данном электролите.

Щелевая – коррозия в щелях и зазорах между двумя металлами, а также в местах нежесткого контакта металла с неметаллическим материалом (крепежные соединения – резьбовые, фланцевые), которые имеются на машинах и аппаратах.

Коррозия под напряжением – коррозия металлов при одновременном воздействии коррозионной среды и механических напряжений.

Газовая – коррозия, протекающая при высоких температурах.

Газовая коррозия часто встречается в промышленности [12 т.Х], например, коррозия металлов при термообработке, коррозия металлов нагревательных печей и др. Большое влияние на скорость газовой коррозии (а это всегда снижение надежности технических средств) оказывают температура и состав газовой среды. Зависимость газовой коррозии от температуры приближенно описывается уравнением Аррениуса [92]:

$$\ln k = A - \frac{B}{T},$$

где k – скорость реакции; A и B – константы; T – абсолютная температура, K° .

Дополнительное влияние оказывают вторичные реакции, вид и свойства продуктов коррозии, которые стимулируют снижение надежности химико-технологического оборудования.

Щелевая и газовая коррозии под напряжением характерны для аппаратуры химико-технологических производств. Машины и аппараты в этих производствах всегда работают с коррозионными средствами и под воздействием механических нагрузок (реакторы, центрифуги, аппараты с мешалками, фильтры-прессы и т.д.).

Химическую и электрохимическую коррозии относят к видам коррозии, различающимся по механизму окислительных процессов. Химическая коррозия имеет место в средах, не проводящих электрический ток (газы, нефть, керосин, бензин и т.д.). Электрохимическая коррозия протекает в средах, проводящих электроток (в электролитах). Химическая коррозия может быть газовой и жидкостной. Газовая коррозия – окисление металла кислородом воздуха, продуктами сгорания различных видов топлива, проведение химических процессов при высокой температуре. В основе коррозии, протекающей в газовой среде при невысокой температуре, лежит хемосорбция атмосферного кислорода. При этом на ряде металлов может образовываться тончайшая окисная пленка (толщина – десятки ангстрем), но она не может защищать металл от дальнейшей коррозии.

Жидкостная коррозия – коррозия металла в жидкостной среде, не проводящей ток (смазочные масла, нефть, керосин, мазут и т.д.). Наличие небольших количеств влаги в названных средах (в неэлектролитах) может придать коррозии электрохимический характер.

Электрохимические коррозии имеют характер анодного окисления металла [94], протекающего по двум различным механизмам: а) окисление металла, являющегося анодом самопроизвольно возникающей гальванической цепи, - гальванокоррозия; б) окисление металла, являющегося анодом своеобразной электролизной системы, самопроизвольно возникающей под влиянием тока от внешнего источника – электрокоррозия. В зависимости от размеров электродных участков на корродирующем металле различают микро- и макрогальванокоррозию. Примером микрогальванокоррозии (часто называют микрокоррозия) может служить процесс растворения технического железа в серной кислоте, техническое железо ржавеет во влажной атмосфере (белая и бурая ржавчина).

Макрогальванокоррозия (обычное название – гальванокоррозия) протекает в кислой среде железа в контакте с цинком или с оловом. На практике подобные явления встречаются при коррозии оцинкованного и луженого железа.

Электрокоррозия (коррозия внешним током и коррозия блуждающими токами) – это электрохимическая коррозия, протекающая под влиянием электрического тока от внешнего источника. Примеры: электрокоррозия железного трубопровода во влажной почве; износ и коррозия рельсов электрифицированного транспорта; свинцовые кабели (голые и бронированные) и т.д.

А.Г.Кульман [94], сопоставляя различные виды коррозии, для наглядности приводит на стр. 349 схему коррозии металлов по внутреннему механизму процессов, лежащих в их основе. На практике коррозия металлов не всегда протекает по какому-нибудь одному механизму, часто этот процесс имеет комплексный характер, и далее отмечается, что многие сложные комплексные процессы полностью не выяснены до сих пор.

По характеру коррозионного разрушения различают сплошную (общую) и местную коррозии [12 том X]. В справочнике «Надежность и эффективность в технике» т.Х (ред.В.С.Адуевский) приводятся иллюстрации сплошной (рис.1) и местной (рис.2) коррозии. Сплошная коррозия охватывает всю поверхность металла, находящегося под ее воздействием и разделяется: на равномерную, протекающую с неодинаковой скоростью на различных участках поверхности металла; избирательную, при которой разрушается одна структурная составляющая сплава или один компонент сплава.

Местная коррозия охватывает отдельные участки поверхности металла: коррозия пятнами; коррозия язвами (в виде отдельной раковины); точечная (питтинг) – коррозия в виде отдельных точечных поражений; сквозная, вызывающая разрушение металла насквозь; нитевидная, распространяющаяся в виде нитей, преимущественно под неметаллическими защитными покрытиями; межкристаллитная коррозия, распространяющаяся по границам кристаллов (зерен) металла и т.д.

Многие металлы имеют высокие положительные окислительные потенциалы и при взаимодействии с кислородом и водой образуют соответственно окиси и гидроокиси [96]. При технологической обработке металлов, при хранении и эксплуатации металлических изделий, аппаратов, машин и орудий металл, вступая в химическое или электрохимическое взаимодействие с окружающей средой, корродирует, при этом образуются вещества, обладающие иными свойствами нежели исходный материал (металл). При обжиге стали она покрывается слоем окалина Fe_3O_4 . Бурая ржавчина имеет состав, отвечающий формуле $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Из сказанного выше можно сделать вывод, что коррозия металлов является процессом, обратным получению его из руд. Итак, металл при коррозии как бы снова превращается в руду [94], т.е. происходит потеря металла.

Все изложенное выше имеет прямое отношение к решению вопросов обеспечения надежности химико-технологических систем. Но при анализе состояния ХТС (по отношению к коррозии) нельзя строго однозначно отнести к положительному или отрицательному влиянию на надежность составляющих этой системы (машины и аппараты, химико-технологический процесс изготовления продукции, среда в аппарате – сырье и материалы, полученный, но невыгруженный продукт). Например, бывает весьма сложно выдерживать требования технологического регламента по поддержанию параметров процесса на соответствующем уровне (изменение температуры, давления, концентрации веществ и т.п.). Отклонения параметров могут привести к возникновению коррозии, росту ее скорости, т.е. к снижению надежности работы не только отдельных элементов, но и всей химико-технологической системы. Поэтому, исследование процессов коррозии и разработка эффективных средств защиты от коррозии являются важными задачами обеспечения надежности работы химико-технологического оборудования, ведения химико-технологических процессов, функционирования всей химико-технологической системы.

Коррозионные исследования и испытания являются как бы составной частью (одним из методов) защиты от коррозии. Это определение опытным путем скорости и характера коррозии металлов и сплавов, различных материалов, применяемых для изготовления техники. Во многих случаях при коррозионных испытаниях изучают состав и свойства продуктов коррозии. Коррозионные испытания разделяются [12 том X, 93] на эксплуатационные и лабораторные. Эксплуатационные представляют собой испытания образцов или небольших элементов конструкций в действующих установках (производственные испытания) или в природных условиях (полевые испытания). Натурные коррозионные испытания сводятся к тщательному обследованию технических средств (машин, конструкций) после определенных периодов их работы.

Лабораторные испытания проводят в искусственно созданных (приближенных к реальным) и контролируемых условиях. Они проводятся для возможно более точного определения скорости коррозии (на специально изготовленных образцах) в процессе эксплуатации, выяснения влияния отдельных факторов, влияющих на коррозионную стойкость. Схематические изображения способов (около пятнадцати) коррозионных испытаний приводятся в краткой химической энциклопедии [93].

Ускоренные испытания проводят в условиях, близких к эксплуатационным, результат получают в более короткий срок по сравнению с полевыми испытаниями [73, т. X]. Здесь же приводятся положения для правильного выбора режима и длительности ускоренных испытаний материалов и изделий. Результаты испытаний рекомендуется сопоставлять с данными по эксплуатации изделий, чтобы правильно определять коэффициенты пересчета для выбора лучшего способа защиты от коррозии.

Все используемые в практике методы защиты от коррозии классифицируются по характеру их воздействия:

1. на металлы;
2. среду;
3. конструкцию [12 т. X].

Методы воздействия на металл применяют еще на стадии производства металла. Легирование металла понижает эффективность катодного и анодного коррозионных процессов. Скорость коррозии металла можно уменьшить путем создания сплавов, образующих на своей поверхности под влиянием агрессивной среды слой продуктов коррозии с высокими защитными свойствами (легирование конструкционных сталей молибденом). Использование защитных покрытий предохраняет от проникновения коррозионной среды к поверхности металла. Защитные покрытия применяют металлические и неметаллические. В ряде случаев для повышения защитного действия покрытий используют комбинации органических (лаковые, битумные, пластмассовые, эпоксидные, резиновые и др.) и неорганических материалов (цементные, асбестовые, сульфитные, сульфатные и др.). По способу защитного действия металлические покрытия делятся на катодные и анодные. Катодные покрытия имеют более положительный, а анодные более

электроотрицательный электродные потенциалы по сравнению с потенциалом металла на который они нанесены. Анодные покрытия защищают металл изделия электрохимически. Одним из методов воздействия на металл для его защиты от коррозии является обработка коррозионной среды путем введения ингибиторов – веществ, снижающих агрессивность среды. Ингибиторы делятся на пленкообразующие (пассиваторы) и адсорбирующиеся.

К пассиваторам относят кислород гидроксильные ионы, нитрат-, нитрит-, фосфат-, молибдат-, бензоат-ионы и др. Адсорбирующиеся ингибиторы (физическая и химическая адсорбция – хемсорбция) представляют собой главным образом органические вещества (этанолamines, альдегиды, спирты, карбамиды, амины и их производные и др.). Применяется для защиты также и электрохимический метод.

Методы воздействия на среду, понижающие агрессивность коррозионной среды: осушение атмосферы специальными адсорбентами в замкнутом пространстве; консервация – специальная защита изделий на период их хранения или транспортировки. В качестве осушителя часто используют силикагель. Для консервации изделий авиационной техники применяют инертные атмосферы (азот, гелий, прошедшие глубокую осушку, летучие ингибиторы). Все летучие ингибиторы (нитрит дециклогексиламина, метанитробензоат гексаметиленамин и др.) используют в виде ингибиторной бумаги, порошка или растворов.

Методы воздействия на конструкцию могут оказать существенное влияние на защищенность изделия (машины, аппарата, прибора, инструмента и т.д.) от коррозионного воздействия. При конструировании, во-первых, выбирается материал для изделия (коррозионно-стойкие металлы и сплавы), во-вторых, большое значение имеет то или иное покрытие поверхности изделий, т.к. контакт с металлами и неметаллами может вызвать опасность контактной коррозии. При использовании в конструкциях неметаллических изоляционных материалов, которые впитывают влагу (войлок, асбест, древесина), можно вызвать очаги усиленной коррозии. Опасным в коррозионном отношении является наличие на изделиях шероховатой (негладкой) поверхности, зазоров, щелей и т.д. При конструировании специалисты обращают усиленное внимание на характер крепежных соединений (сварка, клепка, болтовые соединения). Особенности эксплуатации изделий должны учитываться конструкторами для защиты изделий от коррозии, необходимо создавать специальные приспособления, использовать специфические методы защиты [93, стр.86,87].

Защита от коррозии при эксплуатации химико-технологического оборудования повышает его долговечность, эксплуатационную надежность, снижает количество отказов, поломок, сокращает количество ремонтов и затрат на ремонтные работы.

Методика расчета надежности химико-технологического оборудования, работающего в условиях с участием коррозионной среды, должна предусматривать определение и анализ условий и факторов,

влияющих на надежность ХТО. Итак, прежде всего для определения надежности технологического оборудования, функционирующего под воздействием коррозии надо установить, по-возможности, все характеризующие коррозию факторы: материал, из которого изготавливается ХТО; начальное (исходное) состояние поверхности, подвергающейся коррозии; параметры технологического процесса, проводимого в оборудовании; природу и состав коррозионной среды; время ведения технологического процесса; вид коррозии (атмосферная, контактная, щелевая и т.д.)

Вышеназванные факторы не только характеризуют и констатируют появление коррозии, но и сами своими изменениями определяют величину надежности ХТО. Для обеспечения надежности технического объекта следует поддерживать постоянными (сохранять начальное состояние) все факторы (исключая коррозию).

Надежность может быть в данном случае охарактеризована следующими показателями: время работы оборудования t_k до появления первых признаков коррозии, время работы ХТО $t_{пред}$ до полного его отказа вследствие коррозии, скорость коррозионного процесса, площадь коррозионного повреждения при относительно равномерном типе разрушения, параметры химико-технологического процесса, коррозионная стойкость материала и т.д.

Рассмотрим вышеназванные временные показатели, подчеркнув их значимость для надежности химико-технологического оборудования, подвергающегося коррозии. Подобный анализ позволит определить целевую функцию, иначе, решить задачу обеспечения надежности ХТО, функционирующего в названных сложных условиях.

Время работы оборудования до полного отказа является больше теоретической величиной, т.к. работать до аварийного состояния оборудованию не только нецелесообразно, но и непозволительно, слишком тяжелы последствия такого результата воздействия коррозии. Поэтому более корректно и оперативно воспользоваться такой временной характеристикой надежности, как время работы оборудования t_k до появления первых признаков коррозии, а оно определяется вышеназванными факторами.

Первый фактор, названный выше, это материал, из которого изготавливается оборудование, подбирается конструктором с учетом условий, в которых будет работать технический объект, в том числе и коррозионная среда. В специальной литературе, справочниках указываются характеристики коррозионной стойкости материалов [84]. Для определения времени работы оборудования до появления первых признаков коррозии t_k имеет значение такой показатель, как степень повреждения металла, т.е. состояние поверхности на данный t_k момент времени по сравнению с начальным (исходным) состоянием.

Химико-технологическое оборудование разрабатывается с учетом параметров технологического процесса. Обеспечение постоянства технологических параметров является условием надежной работы ХТО и

всей химико-технологической системы вообще (глава III). Для работы с коррозионными средствами и поддержания стабильности параметров ХТП разрабатываются соответствующие виды технологического оборудования или предусматриваются какие-либо конструкционные особенности (антикоррозийные покрытия, сопряжение деталей, узлов, специальные защитные от коррозии приспособления и т.д.).

Для оценки скорости коррозии следует считать, что коррозионный процесс разделяется на три стадии: во-первых, для начала рассматриваемого процесса необходимо подведение коррозионно-активных частиц к поверхности материала (к стенке аппарата), во-вторых, протекание реакции частиц с материалом стенки и, в-третьих, отведение продуктов коррозии от поверхности, что осуществляется в соответствии с законом диффузии. Последняя стадия в какой-то степени тормозит процесс коррозии, т.к. продукты коррозии создают своего рода преграду для проникновения коррозионно-активных частиц к поверхности стенки аппарата.

Скорость процесса коррозии [12, т.X] на первой стадии определяется количеством вещества (коррозионно-активные частицы), перенесенного в единицу времени:

$$v_n = k_g S \frac{dc}{dx}, \quad (a)$$

где

k_g – коэффициент диффузии;

S – площадь сечения, через которое протекает диффузия;

dc/dx – градиент концентрации;

v_n – скорость диффузии (с увеличением температуры возрастает).

Вторая стадия может быть выражена зависимостью:

$$v_p = k_p C \exp\left[-\frac{W}{RT}\right], \quad (б)$$

где

k_p – константа скорости реакции;

C – концентрация коррозионно-активных частиц;

W – энергия активации;

R – универсальная газовая постоянная;

T – абсолютная температура.

Из уравнений (а) и (б) следует, что показатели, увеличивающие скорость диффузии и коррозии (C , T), снижают надежность работы химико-технологического оборудования, т.е. являются показателями надежности (ненадежности), и поэтому подлежат расчету в методике определения надежности ХТО, работающего в условиях коррозионных сред.

В таблицах различных справочников по коррозионной стойкости и литературных источниках наименьшей величиной скорости коррозии считают потерю веса металла $< 0,1^2 / (м^2 \cdot ч)$ или в пересчете на глубину коррозии $< 0,1$ мм/год. Для получения среднего (глубинного) показателя коррозии расчет производится по следующей формуле [84]:

$$\pi = \frac{8,76 \cdot K}{\gamma} \quad \text{мм/год},$$

где π - проникаемость, мм/год;

K – потеря веса металла (скорость коррозии), г/(м²ч);

γ - удельный вес металла, г/см³;

8,76 – переводной коэффициент.

Коррозионный процесс, протекающий на границе металл (или любой материал, из которого изготавливают оборудование, техническое средство) – окружающая среда, является гетерогенным процессом взаимодействия жидкой или газообразной фазы с металлом (материалом). Причиной коррозии является термодинамическая неустойчивость металла (материала). Возможность протекания коррозии можно определить по изменению энергии Гиббса (изменение изобарно-изотермического потенциала) – G_1 :

$\Delta G = G_2 - G_1$, где ΔG – изменение энергии системы, G_2 – энергия Гиббса продуктов реакции. В [73, т. X] сказано, что самопроизвольно протекают лишь те процессы, в результате которых происходит уменьшение энергии Гиббса, т.е. $G_1 > G_2$ или $\Delta G < 0$. Последнее условие означает, что термодинамический расчет позволяет определить возможность или невозможность протекания коррозии и, следовательно, возможное снижение надежности функционирования оборудования.

Коррозия металла (материала), возникающая на поверхности стенок аппаратов или вызывающая местное «разъедание» из-за изъянов, допущенных при изготовлении технического средства, является фактором, снижающим работоспособность, долговечность и другие характеристики надежности.

Площадь повреждения (рассчитывается в соответствии с ГОСТ 9.101-78) и скорость коррозионного процесса непосредственно связаны с временем работы оборудования [93]. При относительно равномерном типе коррозионного разрушения (местная коррозия, равномерно протекающая коррозия) скорость коррозии может быть выражена весовым показателем коррозии (K), равным весу металла (в граммах), превращенного в продукты коррозии за единицу времени (час или сутки) с единицы его поверхности (м² или дм²). Иногда скорость коррозии выражается также глубинным показателем (Π), т.е. средним проникновением коррозии в металл (материал) в миллиметрах за единицу времени (1 год). Пересчет скорости коррозии от весового показателя (K) в глубинный (Π) или обратно производится по формуле:

$$\Pi = \frac{8,76}{\gamma} K,$$

где γ – плотность металла (материала),

K – весовой показатель коррозии, г/(м² · ч),

Π – глубинный показатель коррозии, мм/год.

Однако при резко выраженной местной (точечной) коррозии скорость коррозионного разрушения, а следовательно, снижения надежности ХТО, не

может быть достаточно точно характеризована этими (К, П) показателями. При точечной коррозии необходимо определять максимальный глубинный показатель [93].

Скорости межкристаллической коррозии, коррозионного растрескивания могут количественно характеризоваться потерей прочности металла (в%) за определенное время. Прочностной показатель коррозии K_σ определяется по формуле:

$$K_\sigma = \frac{\sigma_B^0 - \sigma_B'}{\sigma_B^0} 100,$$

где σ_B^0 – предел прочности металла до коррозии;

σ_B' – кажущийся предел прочности после коррозии (т.е. рассчитанный на начальное сечение образца).

Указанный в справочниках показатель коррозионной стойкости металла (материала) может заранее предсказать уровень надежности оборудования, изготавливаемого из этого материала, чем и пользуются конструкторы при разработке химико-технологического оборудования.

В предложенной нами методике расчета надежности химико-технологического оборудования, подвергающегося воздействию коррозионной среды, во-первых, надо было определить факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на его надежность. Во-вторых, выполнить анализ параметров, характеризующих воздействие коррозии. Далее следует сформулировать целевую функцию поставленной задачи (обеспечение надежности ХТО, работающего в условиях коррозионной среды).

Исходя из всего изложенного выше, очевидно, что наиболее общей целевой функцией для решения поставленной задачи является минимальная величина разрушения поверхности материала S_k (металла), из которого изготовлено оборудование, за максимально возможный период его работы t_k .

Если принять S_n – начальное состояние поверхности материала при $t_n = 0$ – начало периода работы ХТО, то через t_k – некоторый отрезок времени работы оборудования в коррозионной среде, состояние поверхности материала $S_k = S_n - \Delta S$. ΔS – величина разрушенного слоя материала (металла). Итак, целевая функция: $\Delta S = S_n - S_k \rightarrow \min$ за время работы

$t_k \leq t_k' < t_n$, где $\Delta S = f(t_k)$. При известной величине скорости коррозии ν_k : $\Delta S = \nu_k t_k$. Конструктор, разрабатывая тот или иной вид оборудования, предназначенного для функционирования в коррозионных средах, должен всегда предусматривать определенный запас прочности (надежной, безотказной работы ХТО), т.е. показатель t_k должен быть максимальным при минимизации величины ΔS . Этого можно достигнуть уменьшением скорости коррозионного процесса; предусматривая те или иные способы защиты от коррозии.

Параметры химико-технологического процесса обычно определяются в технологическом регламенте, именно они обеспечивают в первую очередь надежную, стабильную и эффективную работу не только ХТО, но и всего

химико-технологического производства в соответствующих условиях, в том числе с участием различных коррозионных сред.

IV.4.3. Общая модель надежности эксплуатации и ремонта химико-технологического оборудования. Показатели эксплуатации технических систем

Б.В.Гнеденко [12 гл.II] дает математические основы теории надежности и эффективности, рассматривая надежность невосстанавливаемых и восстанавливаемых элементов. Для невосстанавливаемых элементов предлагаем считать, что время безотказной работы какого-либо элемента (детали, узла или химико-технологического оборудования в системе КСУОНП) есть случайная величина с функцией распределения $F(t) = P\{\xi < t\}$, которая предполагается абсолютно непрерывной, т.е. существует плотность $f(t) = F'(t)$ и $F(t) = \int_0^t f'(x)dx$.

Дополнительную вероятность $P\{\xi \geq t\} = 1 - \bar{F}(t) = \bar{F}(t)$ Б.В.Гнеденко называет вероятностью безотказной работы. При условии, что элемент функционировал до момента t , вероятность его отказа на интервале $(t, t + \Delta t)$:

$$P\{\xi_t < \Delta t\} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\bar{F}(t)} = \frac{f(t)}{\bar{F}(t)} \Delta t + O(\Delta t),$$

где ξ_t – остаточное время жизни (функционирования) элемента при условии $\xi \geq t$ и ξ_t – случайная величина $(\xi - t)$.

Интенсивность отказа элемента $\lambda(t) = \frac{f(t)}{\bar{F}(t)}$ трактуется как

вероятность того, что элемент «доживший» до момента t , откажет за последнюю (малую) единицу времени.

Кроме функциональных характеристик $F(t), f(t), \bar{F}(t), \lambda(t)$, надежность элемента характеризуют числовыми величинами [73 гл.II]: среднее время безотказной работы элемента T и его дисперсия $D\xi$:

$$T = M\xi = \int_0^{\infty} t dF(t) = \int_0^{\infty} \bar{F}(t) dt,$$

$$D\xi = \sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - T)^2 dF(t),$$

Для оценки надежности при разработке математических моделей могут использоваться различные распределения, характеризующие те или иные условия состояния и эксплуатации элемента: экспоненциальный (показательный) закон, когда

$$P\{\xi_t \geq x\} = \frac{\exp[-\lambda(t+x)]}{\exp[-\lambda t]} = \exp(-\lambda x)$$

при условии, что остаточное время жизни ξ_t , имеющее данное распределение, не зависящее от момента t . Показательный закон используется в тех случаях, когда элемент не стареет.

Нормальный закон $f(t) = \frac{c}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}}$, который Б.В.Гнеденко называет «усеченным» нормальным законом и $f(t)$ – плотность распределения, $c = \int_0^{\infty} f(t)dt = 1$ – постоянная, используются тогда, когда отказы носят постепенный характер и являются следствием физико-химических изменений в элементе.

В случаях, когда плотность распределения отказа имеет несимметрический вид, используют закон Вейбулла – Гнеденко:

$$\bar{F}(t) = e^{-(\lambda t)^p}, p > 0, \lambda > 0.$$

Здесь интенсивность отказа $\lambda(t) = p \cdot \lambda^p t^{p-1}$, $T = \frac{1}{\lambda} \Gamma(1 + \frac{1}{p})$.

Гамма-распределение имеет плотность $f(t) = \frac{\lambda^p \cdot t^{p-1}}{\Gamma(p)} e^{-\lambda t}$, $p > 0, \lambda > 0$.

Среднее время безотказной работы $T = p/\lambda$, дисперсия $D\xi = \sigma^2 = p/\lambda^2$. Гамма-распределением удобно аппроксимировать распределения таких задач, которые решаются преобразованием Лапласа, т.к. при $p=1$ получается показательное распределение и преобразование Лапласа этого распределения имеет простой вид:

$$\int_0^{\infty} e^{-zt} f(t) dt = \frac{\lambda^p}{(\lambda + z)^p}.$$

Для характеристики и разработки математических моделей надежности восстанавливаемых элементов рассматривается три случая [12, II гл.]: 1) мгновенное восстановление (два типа восстановления – замена и ремонт); 2) асимптотическое поведение процесса восстановления (функционирование элемента в течение времени во много раз большего, чем среднее время безотказной работы элемента); 3) восстанавливаемый элемент с конечным временем восстановления. Для последнего случая можно воспользоваться характеристиками (показателями), которые соответствуют первому случаю (мгновенное восстановление), т.к. это не противоречит доказательствам различных теорем в теории восстановления. В.В.Болотин своей монографией [21] вносит значительный вклад в развитие теории надежности машин и конструкций, где разрабатывает полуэмпирические и структурные модели накопления повреждений. Он формирует понятие о мере повреждений, приводит линейное правило суммирования повреждений и гипотезу об автомодельности процесса накопления повреждений. Рекомендуемые В.В.Болотиным нелинейные законы суммирования повреждений и разработанные многостадийные модели позволяют интерпретировать,

например, изменение износа при постоянных нагрузках (рис.20). Первая начальная стадия – приработка. При значении $t = T_{в1}(q)$ износ достигает значения $\psi = \psi_1$, после чего наступает вторая стадия, в течение которой скорость изнашивания почти постоянная. Большинство элементов (деталей) вырабатывают свой ресурс на этой стадии. При $t = T_{в2}(q)$ и $\psi = \psi_2$ начинается заключительная стадия – интенсивное изнашивание, после чего наступает отказ при $t = T_{в3}(q)$ (предельное состояние).

Общая модель эксплуатации и ремонта системы, а также и ее составляющих (например, химико-технологического оборудования) предполагает полное восстановление ее свойств. В процессе эксплуатации происходит ухудшение свойств системы, что выражается в виде коррозионного износа [73, т. X, гл.6], различного рода механических повреждений (механическое

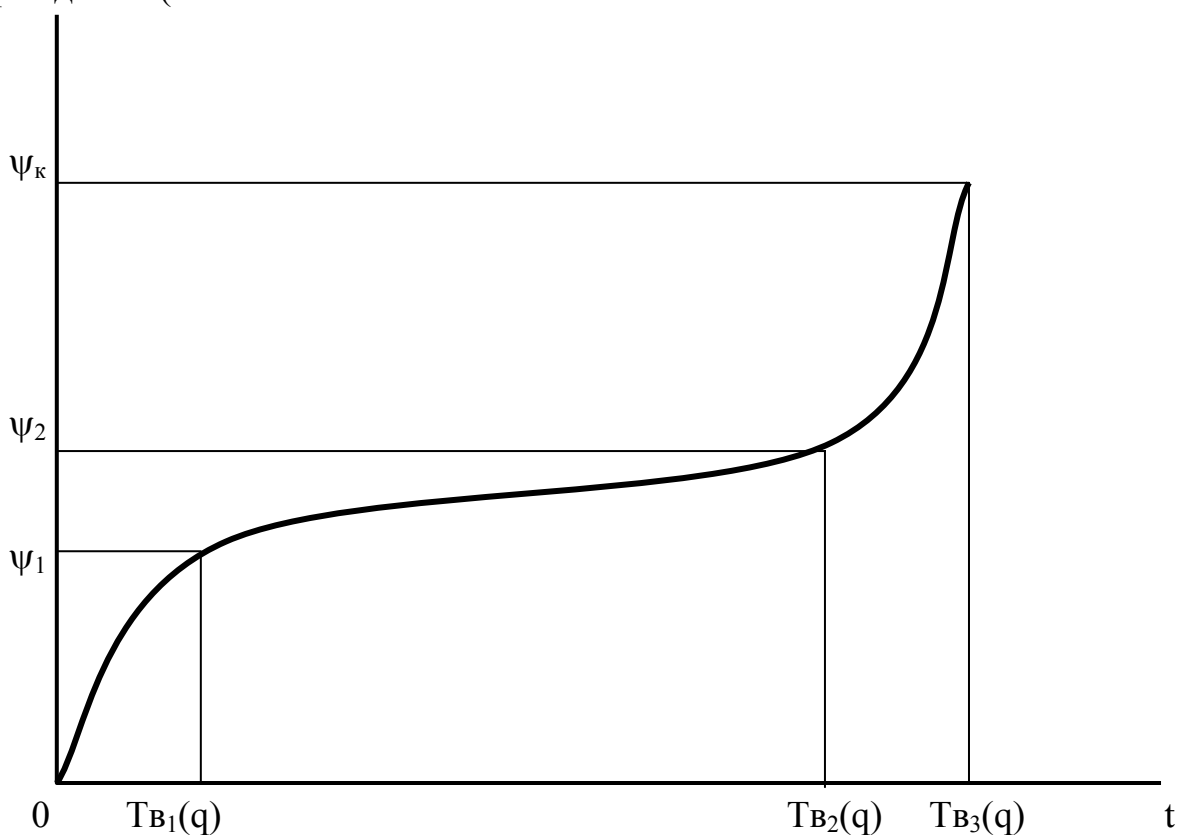


Рис. 20. Стадии износа машин и конструкций

изнашивание, накопление микро- и макроскопических трещин, хрупкое и пластическое разрушение), многоцикловая (классическая) и малоцикловая усталость и т.д. Ухудшение свойств системы со временем приводит к отказам системы. Для поддержания в рабочем состоянии при эксплуатации, для восстановления прежних свойств, начальных или близких к ним свойств, нарушенных из-за отказов, на предприятии организуется ремонтная служба, задачи которой и показатели эффективной ее работы сформулированы и названы в п. 4.1. данной главы. В функции ремонтной службы входит не только наблюдение и контроль за работой объекта (системы и ее элементов), поддержание и обеспечение рабочего состояния системы, устранение различного рода отказов, но и планирование своей деятельности (разработка

графиков технического обслуживания, ремонта и замены элементов системы и системы в целом, расчет затрат РМЦ и т.д.), даже предвидение результатов, а это означает работу на основе использования математических моделей. Управление в математической модели эксплуатации и ремонта системы сводится к выбору оптимальных сроков проведения планово-предупредительных ремонтов (составление графиков ППР), определению показателей качества функционирования, например, коэффициента готовности (k_r), средней удельной прибыли S , средних удельных затрат, времени безотказной работы и др.

$$k_r = \frac{MX^{(0)}}{M\tilde{X}},$$

где $X^{(0)}$ – случайное время, в течение которого процесс ремонта (регенерирующий процесс) находится во множестве состояний, принятых за работоспособные;

$\tilde{X}$ - длительность периода ремонта (восстановления).

Средняя удельная прибыль определяется как математическое ожидание прибыли за единицу календарного времени. Средние удельные затраты c определяются как математические ожидания затрат за единицу времени исправного функционирования системы. Соотношение между показателями качества функционирования:

$$S = k_r (\bar{S}_0 - c)$$

где $\bar{S}_0(t)$ - прибыль, полученная на периоде регенерации.

В.А.Каштановым [12, том VIII] разработаны модели технического обслуживания системы с учетом и без учета ее структуры, в которых приводятся математические основы решения минимаксных задач технического обслуживания, оптимальной периодичности плановых восстановительных работ. Разработанные математические модели надежности эксплуатации позволяют определить объем запасных элементов для обеспечения эксплуатации по заданному ресурсу и количество запасных элементов при эксплуатации системы по уровню надежности (Е.Ю.Барвилович и Е.Б.Барвилович), получить оценку [12, том VIII] количества запасных элементов при эксплуатации по состоянию.

Таким образом, достоверная и полная информация по анализу, планированию и управлению процессом ремонта объекта (техническая система и ее элементы) позволяют разрабатывать математические модели эксплуатации и обслуживания (профилактика и ремонт), которые обеспечивают разработку автоматизированных систем эксплуатации и ремонта техники (в т.ч. ХТО), дают экономическое обоснование целесообразности ремонта и эффективной работы ремонтного подразделения предприятия.

ГЛАВА V. ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

V.1. Прогнозирование надежности производства

За последние годы отечественная прогностика сформировалась как научное направление, прочно опирающееся на фундаментальные предпосылки теории предвидения. Повышение качества и эффективности производства – это одна из важнейших задач научно-технического прогресса. В современных условиях, когда наука становится производительной силой общества, приобретает особое значение прогнозирование тематики новых научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок, от результативности которых во многом зависит дальнейшее развитие техники и технологии [52].

Можно определить, что в настоящее время прогностика условно находится на III этапе своего развития, который характеризуется исключительно интенсивным использованием методов прогнозирования развития практически любых разделов техники и технологии, управления народным хозяйством. Поэтому нельзя исключить из круга вопросов обеспечения надежности вопросы прогнозирования надежности производства. Главной целью инженерного прогнозирования является разработка базы для обоснованного планирования и управления народным хозяйством [52-54]. Исходя из этой общей и главной задачи инженерного прогнозирования, можно определить задачу прогнозирования надежности, как частную, но имеющую также весьма важное значение в деле повышения эффективности производства и качества работы.

Задачей прогнозирования надежности является прежде всего определение границ (пределов) устойчивой работы всей КСУОНП, а также предсказание устойчивости функционирования всех составляющих элементов этой системы на основании современных методов прогнозирования: экономико-математического моделирования, методов прогнозного графа. Оба направления в настоящее время успешно развиваются. Экономико-математическое моделирование применяется в прогнозировании развития производства, для создания моделей межотраслевого баланса. Экономико-математическое моделирование основывается на системе уравнений с соответствующими ограничениями и условиями оптимизации, в которых прогнозируемые факторы входят в качестве неизвестных величин [52]. Методы прогнозного графа [2] основаны на дальнейшем развитии теории графов и сетевых методов.

При прогнозировании ресурса на стадии проектирования [21], в-первых, должны быть разработаны технические решения, обеспечивающие выполнение объектом всех назначенных функций при высоких показателях эффективности и экономичности. Заложенное при проектировании (конструировании) объекта снижение материальных и трудовых затрат на его изготовление может явиться основной характеристикой качества

проектирования. Во-вторых, такие показатели надежности, как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость, заложенные в расчеты при прогнозировании, обеспечивают снижение до минимума вероятности наступления отказов, снижают продолжительность простоев в ремонте. В.В. Болотин [21] отмечает, что увеличение показателей долговечности всех без исключения элементов, узлов и агрегатов до уровня, установленного для объекта в целом, нерационально и нерентабельно, часть элементов более целесообразно заменить, отремонтировать или восстановить. Проверка на безотказность также входит в задачу прогнозирования, т.к. при эксплуатации объекта снижается его сопротивляемость воздействиям из-за изнашивания, коррозии и т.д. «Таким образом, – подводит итог В.В.Болотин в [21], расчет на безопасность и прогнозирование ресурса – это тесно связанные задачи».

В основу программного и инженерного прогнозирования мы рекомендуем заложить модификацию средств математического моделирования с исследованием операций. Проведенный анализ структуры инженерного прогнозирования, которая разработана В.Г.Гмошинским [19], позволяет сделать вывод, что именно этот метод прогнозирования больше всего подойдет для прогнозирования надежности производства, поскольку, во-первых, инженерное прогнозирование позволяет решать две задачи: программное прогнозирование развития техники; прогнозирование, основанное на анализе информационных источников. Во-вторых, целью инженерного прогнозирования является разработка базы для обоснованного планирования и управления отраслями народного хозяйства.

Прогноз развития дефекта, информация о котором поступает в службу КСУКП (КСУОНП) (приложение 1), должен производиться для ХТО, ХТП, ХТС раздельно, т.к. он будет зависеть от различного ряда переменных прогнозирования, в число которых входят как типично экономические (объем производства, экономическая эффективность, производительность труда и т.д.), так и технические характеристики (уровень технологии, комплексной механизации и автоматизации, прогрессивность конструкций ХТО и т.д.). При прогнозировании учитывается от 10 до 12 переменных, прогноз по каждой из которых необходимо выражать самое малое в двух вариантах, а по важнейшим параметрам – даже до пяти вариантов. Поэтому, как рекомендует В.Г.Гмошинский [52], следует воспользоваться общей теорией действия с операторами, разработанной Л.Д.Ландау [55]. Прогноз в соответствии с этой теорией необходимо определять в зависимости от двух операторов, от которых, в свою очередь, зависят технические и экономические параметры и переменные. Под переменной прогнозирования следует понимать любой технический, технологический или экономический фактор, подлежащий прогнозированию. Задачу об изменении прогнозируемой переменной рассматривают как временную, т.к. процесс трансформации идеи в конкретный результат происходит во времени. Поэтому ось времени (ось абсцисс) представляется простирающейся безгранично влево и вправо от начала координат, принимаемого за базис. На

оси координат откладываются базисные (начальные) значения прогнозируемой переменной, а также число информационных источников, имеющих отношение к объекту прогнозирования, В такой постановке вся область, расположенная влево от базиса, будет соответствовать ретроспективе (ретроспективный динамический ряд, отражающий состояние объекта в предпрогнозный период), а вправо – перспективе, т.е. значениям прогнозируемой переменной.

Как было рассмотрено выше, основы инженерного прогнозирования используются для прогнозирования развития практически любых разделов техники и технологии [52]. В этой работе рассматриваются инвариантные алгоритмы инженерного прогнозирования, реализуемые в каждом конкретном случае в зависимости от имеющейся информации. Применим предлагаемую методику для прогнозирования развития дефекта в работе ХТС. В динамическом плане зависимость между величиной прогнозируемой переменной $Q(t)$, объемом технической информации $V(t-\tau)$ и неизвестной пока функцией $\pi(t)$ выражается в элементарных приращениях, т.к. приращение переменной $\Delta Q(t)$ на элементарном отрезке времени Δt будет пропорционально объему накопившейся за время $t - \tau$ информации $V(t-\tau)$, (где τ - время в прошлом, t - время в будущем) и некоторой функции $\pi(t)$, стимулирующей изменение переменной прогнозирования на участке Δt , т.е.

$$\Delta Q(t) = V(t-\tau)\pi(t)\Delta t . \quad (V.1)$$

Предположив, что процесс накопления информации непрерывен (принцип кумуляты), можно просуммировать элементарные приращения.

$$\sum_{t=0}^t \Delta Q(t) = \sum_{t=0}^t V(t-\tau)\pi(t)\Delta t . \quad (V.2)$$

После перехода от приращений к дифференциалам и интегрирования этого уравнения получаем:

$$Q(t) = \int_0^t V(t-\tau)\pi(t)dt , \quad (V.3)$$

где $T = t - \tau$ (V.4) – период прогнозирования (информационный период).

Уравнение (V.3) – это интегральное уравнение Фердгольма, в котором функция $V(t-\tau)$ называется ядром. Поскольку функция $\pi(t)$ неизвестна в уравнении (V.3), значит, это определяет данное уравнение, как интегральное. В.Г.Гмошинский показывает, что решить это уравнение методом итераций не удастся, и доказывает возможность решения уравнения (V.3), т.е. определения вида функции $\pi(t)$, исходя из задания на прогноз и модели прогнозирования. При нахождении функции $\pi(t)$, говорится в [52], решение уравнения (V.3) сводится к квадратурам. Выполнив соответствующие преобразования и подстановки, окончательное уравнение для определения значения переменной прогнозирования запишем:

$$Q(t) = Q_0(1 + \dot{V}) \left[1 + \sum_{i=1}^{i=n} \phi(i) \dot{U}_i \right] , \quad (V.5)$$

где Q_0 - базисное значение прогнозируемого параметра;

$\dot{V}$ - кумулята относительной скорости поступления информации;

$\dot{U}$ - относительная скорость обеспечения потребностей (поставок) для прогнозируемого объекта;

$\varphi(i)$ - веса поставок.

Если принять $1 + \dot{V} = \Omega_1(t)$, а выражение в квадратных скобках уравнения (V.5) за $\Omega_2(t)$, то

$$Q(t) = Q_0 \Omega_1(t) \Omega_2(t) \quad (V.6) -$$

операторное уравнение, отражающее связь переменной прогнозирования с основными факторами (операторами), обеспечивающими переход от ретроспективной информации к объекту прогнозирования в будущем.

Ω_1 и Ω_2 - операторы Ландау [55].

Ω_1 - безразмерная величина, определяющая величину изменения прогнозируемой $Q(t)$ к моменту времени t .

Оператор $\Omega_2(t)_{\min}$ соответствует минимальному значению функции $\varphi(i)$, т.е. технологическая потребность в будущем обеспечивается в пропорциях, сложившихся в базисном году. Максимальному значению функции $\varphi(i)$ соответствует оператор $\Omega_2(t)_{\max}$, т.е. технологическое обеспечение не ограничивается на всем временном периоде прогнозирования. Прогнозный смысл уравнения (V.6): развитие объекта зависит не столько от абсолютного объема информации и требующейся необходимости, сколько от скорости (темпа) их изменения для прогнозируемого объекта.

Для случая, когда природа изменения функции переменной неизвестна, В.Г.Гмошинский предлагает решение на основе использования разработанной им модели программного прогнозирования. Эта модель построена по блочно-функциональному принципу, т.е. в блоках формируется задание на прогноз: (I блок), определяются виды технологии и объекты, подлежащие прогнозированию (II блок), выявляются переменные прогнозирования – параметры, коэффициенты и т.д. (III блок), фиксируются базисные значения прогнозируемых величин (IV блок). Блоки модели V-X содержат промежуточные результаты прогнозирования, а связи между блоками отражают математические операции, на основе которых получены эти результаты.

Модель программного прогнозирования В.Г.Гмошинского интерпретируется в двух модификациях: полной и сокращенной. Поскольку в модели имеются блоки по оценке погрешности, прогнозирование по сокращенной и полной моделям, как утверждает автор, эквивалентно. Достоинствами сокращенного моделирования являются: простота, оперативность, доступность и наглядность. Поэтому для прогнозирования надежности следует использовать именно эту модель. Одной из характеристик надежности является наработка до отказа (до появления

первого дефекта в работе). Для надежности какого-либо объекта характерна прогнозная ситуация: $\dot{V} \neq 0$, $\dot{U} \neq 0$ (развитие производства зависит и от новой, и от существующей техники). Этим условиям удовлетворяет операторное уравнение общего вида (V.6), т.е. в процессе прогнозирования участвуют оба оператора $[\Omega_1(t) \text{ и } \Omega_2(t)]$. При таких условиях алгоритм прогнозирования представляется в виде произведения операторов:

$$\begin{aligned} Q(t)_{\min} &= Q_0 \Omega_1(t) \Omega_2(t)_{\min}, \\ Q(t)_{\max} &= Q_0 \Omega_1(t) \Omega_2(t)_{\max}, \end{aligned} \quad (V.7)$$

Q_0 - базисное значение надежности (наработка до отказа в базисном году).

Из вышеизложенного следует, что использование операторов составляет основу инженерного прогнозирования. Оператор информационного потенциала определяется по формуле: $\Omega_1(t) = 1 + \dot{V}$ (6а), в которой основной переменной является $\dot{V}$ - кумюлята генерирования скорости информации. Определение $\dot{V}$ лучше следует осуществлять по способу конечных разностей:

$$\dot{V}(t) = \frac{2(V_m - V_{m-1})}{\Delta \tau \cdot V_{\text{пол}}}, \quad (V.8)$$

где V_{m-1} и V_m - соответственно последующий и предыдущий объемы информации; $\Delta \tau$ - интервал времени; $V_{\text{пол}}$ - полный объем информации.

Составление параметрических рядов начинается с установления периода прогнозирования T . Обозначив дату в ретроспективе T_p , а дату (год) прогнозирования T_n , получаем $T = T_n - T_p$. (V.9).

Предположим, что за первый месяц из прогнозируемого года было отмечено в работе цеха пять дефектов (технологические, технические, организационные), т.е. $V_1(I) = 5$, а всего за год 75. Итак, по месяцам:

I. $V_1 = 5$; II. $V_2 = 8$; III. $V_3 = 5$; IV. $V_4 = 9$; V. $V_5 = 8$; VI. $V_6 = 7$;
VII. $V_7 = 6$; VIII. $V_8 = 8$; IX. $V_9 = 9$; X. $V_{10} = 10$; XI. $V_{11} = 0$; XII.
 $V_{12} = 0$.

Для определения скорости поступления информации применим формулу конечных разностей:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(I) &= \frac{2(V_2 - V_1)}{\Delta \tau V_{\text{пол}}} = \frac{2}{1 \cdot 75} (8 - 5) = 0,080; \\ \dot{V}_2(II) &= \frac{2(V_3 - V_2)}{\Delta \tau V_{\text{пол}}} = \frac{2}{1 \cdot 75} (5 - 8) = -0,080; \\ \dot{V}_3(III) &= \frac{2(V_4 - V_3)}{\Delta \tau V_{\text{пол}}} = \frac{2}{1 \cdot 75} (9 - 5) = 0,106; \end{aligned}$$

и т.д.

$$\dot{V}_{12}(XII) = \frac{2}{1 \cdot 75} (0 - 0) = 0,000.$$

Образуем кумюляту скоростей генерирования информации

$$\begin{aligned}\dot{V}_1(I) &= 0,080 & \dot{V}_2(II) &= \dot{V}_1 + \dot{V}_2 = 0,080 + (-0,080) = 0, \\ \dot{V}_3(III) &= \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dot{V}_3 = 0,080 + (-0,080) + 0,106 = 0,106\end{aligned}$$

и т.д.

А затем по формуле $\Omega_1(t) = 1 + \dot{V}$ получим:

$$\Omega_1(I) = 1 + \dot{V}_1 = 1 + 0,080 = 1,08,$$

$$\Omega_1(II) = 1 + \dot{V}_2 = 1 + 0 = 1$$

и т. д. до

$$\Omega_1(XII) = 1 - 0,134 = 0,866.$$

Определение оператора $\Omega_2(t)$ для уровней max и min основывается на непосредственном применении формулы

$$\Omega_2(t) = 1 + \sum_{i=1}^{i=n} \varphi(i) \dot{U}_I, \quad (6б)$$

вытекающей из решения (V.6). Расчет производим с применением относительной скорости (темпа) появления дефектов: $\bar{V}_1 = 5$, $\bar{V}_2 = V_2 - V_1 = 8 - 5 = 3$ и т.д. Расчетные данные, а также значения нормирующей функции $\varphi(i)$ max и $\varphi(i)$ min приведены в таблице 10а.

$$\dot{U} \max = \sum_{i=1}^{i=n} \varphi(i) \dot{U}_i \max,$$

$$\dot{U} \min = \sum_{i=1}^{i=n} \varphi(i) \dot{U}_i \min.$$

$\dot{U}_i \max$ определяется перемножением значения величины темпа появления дефекта $\bar{V}_i$ на значение величины нормирующей функции в соответствующей $\bar{V}_i$ строке таблицы 8а. Нормирующая функция по абсолютной величине определяется из уравнения (V.10), по относительной величине – из уравнения (V.11):

$$\varphi(i) = \frac{i}{2^{i-1}} \quad (V.10), \quad \varphi_o(i) = \frac{\varphi(i)}{\sum_{i=0}^{i=n} \varphi(i)} \quad (V.11).$$

Таблица 10а.

Оценка прогнозного значения надежности

Месяц	Темп появления дефекта	Нормирующая функция		Относительные скорости появления дефектов	
		$\varphi(i) \max$	$\varphi(i) \min$	$\dot{U} \max$	$\dot{U} \min$
I	5	0,253	0,0007	1,265	0,0035
II	3	0,247	0,0027	0,741	0,0071
III	-3	0,172	0,006	-0,516	-0,018
IV	4	0,134	0,008	0,536	0,032
V	-1	0,081	0,014	-0,081	-0,014
VI	-1	0,052	0,031	-0,052	-0,031

VII	-1	0,032	0,051	-0,032	-0,051
VIII	2	0,015	0,086	0,090	0,172
IX	1	0,009	0,129	0,009	0,129
X	1	0,005	0,178	0,005	0,178
XI	-10	0,0027	0,237	-0,027	-2,370
XII	0	0,0007	0,260	0	0
Σ		1,0	1,0	2,098	-1,865

Таким образом, по формуле (6б) $\Omega_2(i) \max = 1 + 2,098 = 3,098$,
 $\Omega_2(i) \min = 1 + (-1,865) = -0,865$.

Оценка прогнозного значения надежности:

$$Q(t) \max = Q_o 3,098,$$

$$Q(t) \min = Q_o (-0,865).$$

Последняя строчка расчета оценки прогноза надежности производства свидетельствует, что нет никакого смысла давать минимальную оценку надежности производства, если имеют место дефекты в работе техники, технологии, организации производства.

Таким образом, инженерное прогнозирование позволяет в вероятностной постановке решить основные вопросы, связанные с прогнозированием надежности всего производства. Рассматривая программное прогнозирование как начальное исследование, можно изыскать технические, технологические и организационные средства для повышения надежности всего производства. Разработанная В.Г.Гмошинским [52] методика инженерного прогнозирования и примененная нами для оценки надежности производства, легко реализуется с помощью ЭВМ.

V.2. Диагностика надежности

Готовность сложных систем ухудшается не только с ростом интенсивности отказов $\lambda(t)$, но и с увеличением продолжительности восстановлений технических устройств. В связи с этим весьма актуальной становится задача повышения готовности сложных систем в результате улучшения характеристик восстанавливаемости: времени поиска отказавшего элемента / узла, блока / и времени устранения отказа. Опыт эксплуатации показывает, что наиболее продолжительным этапом процесса восстановления работоспособности технических устройств является процесс поиска отказавшего элемента. Поэтому вопросам поиска отказавших элементов / технической диагностике / в последнее время стало уделяться большое внимание [18, 19, 56].

Диагностический процесс – это процесс логического мышления, процесс обработки исходной информации для получения вывода о состоянии исследуемой системы. Вероятность возникновения одновременного в системе двух и большего числа отказов пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью возникновения одного отказа. Поэтому, если в системе,

состоящей из N элементов, отказал i -й элемент, то будем считать, что система находится в одном из N состояний, а именно, в i -м состоянии. Таким образом, целью диагностического процесса является определение отказавшего элемента или, что то же самое, определение номера состояния системы.

В качестве исходной информации при решении диагностической задачи используются симптомы отказа и признаки нормального функционирования / ПНФ / системы. Симптомом отказа системы является информация об отклонениях от норм параметров, характеризующих ее работоспособность или состояние, а также об изменении этих отклонений во времени.

Например, симптомы отказа и признаки нормального функционирования не всегда однозначно определяют состояние системы. Основной характерной чертой диагностического процесса является анализ симптомов отказа и ПНФ системы, позволяющей уточнить ситуацию, т.е. локализовать места или блоки, в которых находится отказавший элемент.

Важное значение в процессе диагностики имеет предыстория, т.е. предыдущие наблюдения и сведения о том, как, сколько, в каких условиях работала система и при каких условиях наступил отказ. Симптом, учитывающий постепенное изменение параметра с течением времени, назовем интегральным. Дополнительный симптом, учитывающий внезапность отказа, называется дифференциальным. Таким образом, второй характерной чертой диагностического процесса является использование информации, содержащейся в интегральных и дифференциальных симптомах. Для получения дополнительной информации прибегают к различным испытаниям. Третьей характерной чертой диагностического процесса является выбор наиболее эффективной программы испытаний (проверок), обеспечивающей решение проблемы недостатка информации о состоянии отказавшей системы.

Диагностические процессы характеризуются различной эффективностью. Задача состоит в том, чтобы добиться наиболее эффективного диагностического процесса по определенному критерию.

Диагностический процесс – это процесс, связанный с получением и переработкой информации, при его исследовании можно применять методы теории информации: метод поэлементных проверок, метод групповых проверок, метод логического анализа симптомов отказа, создание поисковых схем, методы рациональной технической диагностики. Эти методы диагностирования позволяют определить степень удаленности от предельного состояния объекта, установить вид и место повреждения и т.п., что позволяет, в свою очередь, получить большой экономический эффект за счет более полного использования потенциальных возможностей технического устройства и учета конкретных его свойств и условий эксплуатации. Технической диагностике должны подвергаться не только технические устройства, но также и технологические процессы, все химическое производство, как сфера деятельности человека, состоящая из

значительного числа материальных объектов. Данные диагностики можно использовать при прогнозировании надежности работы техники, технологии, управления и планирования производства. При внедрении комплексной системы управления и обеспечения надежности химико-технологических систем применение автоматизированных диагностических систем существенно облегчит эксплуатацию производства. Оснащение оборудования и технологии приборами, оценивающими параметры ХТО, ХТП и вообще ХТС, дает возможность обеспечить нужды диагностики и периодически осуществлять контроль этих параметров. Системы, предназначенные для диагностирования, несмотря на свое разнообразие и уровень развития, имеют общие черты и одинаковый характер решаемых ими задач. Особенно высокого совершенства достигли автоматизированные системы с использованием ЭВМ и с решением в процессе диагностирования логических задач при учете вероятностных характеристик диагностических сигналов. Пример решения нами логической задачи был приведен для раскрытия вопроса по обеспечению надежности технических устройств на стадии их конструирования. В общем виде можно представить следующую структурную схему диагностики технических объектов, рассмотренную в работах [18, 57].

Данная схема может быть реализована с различной степенью автоматизации. На тех предприятиях, где внедрена КСУКП, имеет место и автоматизированная система технической диагностики. Применение средств технической диагностики способствует повышению безотказности работы технических устройств, т.е. использование является важным элементом системы управления качеством и надежностью. Техническая диагностика позволяет сокращать затраты на ремонт за счет более точного использования долговечности ХТО и осуществления ремонта по потребности [25]. Следовательно, техническая диагностика – это один из элементов КСУОНП.

Широкий диапазон условий и режимов эксплуатации, а также вариация начальных показателей качества машины приводят к значительной дисперсии в скоростях потери ею работоспособности. Поэтому весьма важно своевременное выявление причин нарушения работоспособности, установление вида и места возникновения повреждения, а при конструировании машины – предусмотрение возможных неполадок.



Рис.21 Структурная схема диагностики технических объектов

Эти задачи решаются методами диагностирования, применение которых, особенно для сложных систем, позволяет получить большой экономический эффект за счет более полного использования потенциальных возможностей машины и учета конкретных ее свойств и условий эксплуатации. Результаты диагностирования могут быть использованы для прогнозирования надежности объекта и для принятия решений о проведении ремонта или ТО.

Имеются различные методы и средства диагностики объекта в условиях эксплуатации. При конструировании машины или аппарата необходимо предусмотреть возможный контроль работоспособности изделия по косвенным признакам, т.к. непосредственное измерение выходных параметров невозможно. В этом случае применяется метод логического анализа симптомов отказа, для проведения которого потребуются результаты обследований работоспособности аналога проектируемого объекта. Сведения о состоянии обследуемого аппарата заносят в эксплуатационную карту (табл.10).

Рассмотрим сравнительно простую систему, состоящую из N элементов, при отказе которой может наблюдаться n или меньше различных симптомов отказа. Кроме того, отказы различных элементов могут иметь один и тот же симптом, а отказ одного и того же элемента – различные симптомы.

Например, в результате обследования работы фильтра-пресса были установлены отказы элементов и их симптомы, которые представлены в таблице 10б.

Отказы элементов и симптомы

Отказы	Симптомы
Сломалась плита (A_1)	Засорены щели твердой фазой и солями из фильтрата, плохо очищены привалочные поверхности, повреждены коррозией привалочные поверхности, перекосясь весь набор плит, повреждены защитные покрытия плит – C_5 .
Перекосялась нажимная плита (A_2)	Различная толщина прокладок на плите и приливах (C_6), плохая центровка зажима с плитой (C_7), изношен винт или гайка (C_8).
Прорвалась ткань по периметру (A_3)	Перекося плит и рам при перемещении (ударах) (C_9), острые кромки привалочных поверхностей (C_{10}).
Сломалась рама (A_4)	Засорены щели солями из фильтра (C_1), плохо очищены привалочные поверхности (C_2), повреждены коррозией привалочные поверхности (C_3), перекосясь весь набор рам (C_{11}), повреждены защитные покрытия рам (C_{12}).

Взаимосвязь между элементами и симптомами можно представить в виде матрицы, имеющей N строк и n граф. В клетке на пересечении строки, соответствующей данному элементу, и графы, соответствующей наблюдаемому симптому, ставится единица, если отказ элемента сопровождается данным симптомом, и нуль – в противном случае (табл. 11).

Таблица 11

Матрица зависимости симптомов и отказов фильтра-пресса.

Отказы элементов	Симптомы												Кодовые числа
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	
A_1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	123911
A_2	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	456
A_3	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	78
A_4	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1231012

При анализе достаточности симптомов для однозначного определения отказа любого элемента системы составляют кодовые числа, присущие

каждому элементу. Цифры кодового числа составляют из номеров симптомов, наблюдающихся при отказе элемента и записывают в правую часть таблицы 9. Поиск отказавшего элемента в системе осуществляется по кодовому числу.

В некоторых случаях процесс поиска отказавшего элемента по симптомам можно упростить, используя специальные поисковые схемы, которые составляются заранее с помощью математической логики (булевы алгебры) на основании анализа возможных отказов системы и наблюдаемых при этом симптомов. Это позволяет осуществлять поиск отказавшего элемента без непосредственной проверки элементов. Составим поисковую схему, для чего рассмотрим фильтр-пресс, обозначив через A_1, A_2, A_3, A_4 – элементы аппарата, а через $C_1, C_2, C_3, \dots, C_{12}$ – симптомы отказов. Отказу каждого элемента сопутствует определенная группа симптомов. При этом возможны различные связи между отказом элемента и его симптомами, например, при отказе элемента A_1 наблюдается симптом C_1 или C_2 , или C_3 , или все одновременно. Такая связь между симптомами и отказом элемента означает сложение и обозначается:

$$A_1 = C_1 \vee C_2 \vee C_3,$$

где $\vee$ - знак логического сложения (связь типа «или»).

Эта формула выражает необходимые и достаточные условия отказа элемента A_1 и читается так: в системе отказал элемент A_1 , если имеет место симптом C_1 или C_2 , или C_3 , или все одновременно.

Если при отказе элемента A_1 одновременно наблюдаются симптомы C_1, C_2, C_3 , такая связь означает логическое умножение и обозначается:

$$A_1 = C_1 \wedge C_2 \wedge C_3 = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3$$

где $\wedge$ - знак логического умножения (связь типа «и»).

Данное выражение читается так: в системе отказал элемент A_1 , если одновременно наблюдаются симптомы C_1 и C_2 и C_3 .

Используя понятие математической логики, связь между отказом элементов и их симптомами можно представить в виде следующей логической формулы (см. табл.9):

$$A_1 = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_9 \cdot C_{11} \vee C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_{10} \cdot C_{12} = \\ = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot (C_9 \cdot C_{11} \vee C_{10} \cdot C_{12})$$

Эта формула показывает (табл. 9), что отказ состоит в поломке плиты и рамы.

Достоинством данного метода является возможность принципиального его использования в системах любой сложности.

V.3. Идентификация надежности

Идентификация – это один из этапов управления, т.к. задача идентификации объекта управления подчинена целям управления и входит составной частью в задачу управления. Поэтому в процессе идентификации создается такая модель, которая может и не отражать внутренних механизмов явления, ей достаточно лишь констатировать наличие

определенной связи между входом и выходом объекта [30]. Характер и особенности этой связи составляют основу модели, получаемой в процессе идентификации объекта управления. На рис.22 показана общая схема управления объектом.

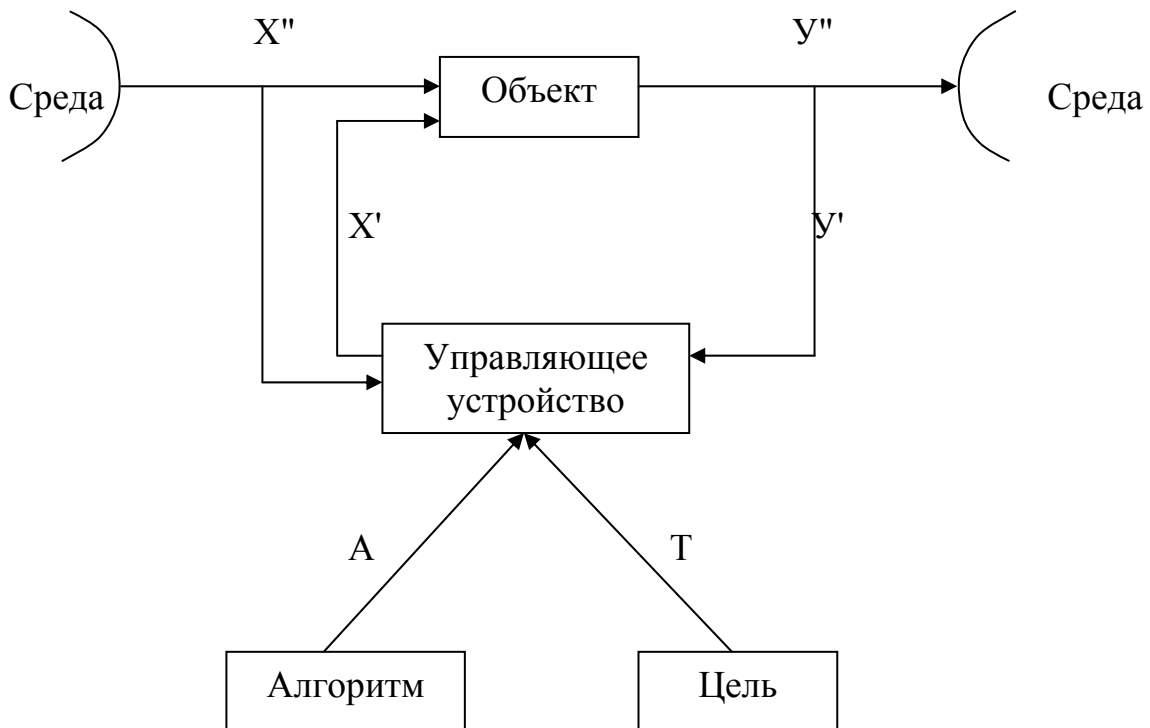


Рис.22. Схема управление объектом

Управление реализуется:

$$\langle X', Y = \langle X'' Y' \rangle, A, T \rangle,$$

где X' - управляющее воздействие;

X'' - неуправляемая, но контролируемая составляющая воздействия;

$\langle X'', Y' \rangle$ - информация о состоянии среды и объекта;

A – алгоритм;

T – цель управления.

Задача идентификации, как задача построения оператора модели, отражающего качественные и количественные стороны объекта, формулируется и соответственно решается в рамках трех различных подходов [30]. Первые и простейшие объекты, которые подвергаются идентификации, это нестохастические объекты, т.е. регулярные функции, связывающие вход и выход объекта. Примером этого является теория приближения функций многочленами в математическом анализе (теория приближения имеет две ветви: теорию аппроксимации и теорию интерполяции).

Для идентификации стохастических объектов были применены методы математической статистики, т.е. два ее направления. Первое – теория

оценивания, основной задачей которой является оценка параметров статистического объекта по наблюдениям в обстановке случайных помех. Другим направлением для целей идентификации статистических стохастических объектов стала теория планирования экспериментов.

Третьим подходом к решению задач идентификации являются методы теории систем автоматического управления. Эта теория дала специальные методы идентификации динамических объектов управления в режиме нормальной эксплуатации (т.е. в обстановке случайных возмущений и помех). Эти методы идентификации Л.А.Растрингин и Н.Е.Маджаров [31] называют методами автоматического управления (МАУ). Именно эти методы необходимо рекомендовать для функционирования КСУОНП.

На базе МАУ были разработаны и освоены производством автоматизированные системы управления производством (АСУП). Впервые это нашло применение на Львовском п/о “Электрон”.

Производственно-техническое объединение “Электрон” можно назвать флагманом отечественной радиотехники [61]. Центром объединения, его основой является Львовский телевизионный завод. Созданный в 1957 г. он представляет собой высокомеханизированное современное предприятие.

Уже в 70-х годах завод являлся крупнейшим предприятием с десятками конвейерных линий сборочных цехов, связанных единым технологическим ритмом. Это мощные заготовительные цехи с высоким уровнем механизации и автоматизации.

Еще в 1963 году стало ясно, что предприятием, оснащенным передовой техникой, высокопроизводительным оборудованием, уже нельзя управлять традиционными методами.

Массовое производство для оптимального управления требует на любой момент времени совершенно точных и оперативных сведений о наличии запасов тех или иных материалов, деталей, узлов, инструмента, оснастки, полуфабрикатов, их движения в производстве.

Для того чтобы иметь такие сведения, необходимо оперировать десятками тысяч данных учета. Однако выполнить столь большой объем вычислений без новейшей электронно-вычислительной и организационной техники чаще, чем один раз в месяц, невозможно. Результат неоперативности учета – накопление запасов сверхнормативных материалов или, наоборот, угроза появления «неожиданного» дефицита.

По инициативе и предложению директора института кибернетики АН УССР академика В.М.Глушкова была начата работа по созданию и внедрению автоматизированной системы управления предприятием, которая и получила название АСУП «Львов».

Опыт показывает насколько целесообразно применение ЭВМ в экономике. Особенно эффективно использование электронно-вычислительной техники, когда задачи учета и управления решаются в едином комплексе, при охвате всей системы движения информации в целом – от первичной до выдачи данных управляющим органам.

Для решения подобных экономических и производственных задач и рассчитана АСУП «Львов». Она представляет собой единый комплекс: технических средств, программ вычислений и схем организации работ.

Целью внедрения системы является повышение эффективности управления производством за счет совершенствования информационного обеспечения руководства предприятием, улучшение ритмичности его работы, согласованности работы участков, цехов и служб, рационального использования имеющихся ресурсов, осуществление методов оптимального планирования.

АСУП «Львов» обеспечивает оперативный сбор информации о фактическом состоянии производства; первичную подготовку данных для решения задач управления заводом; оптимальное решение задач управления и доведение результатов их решения до производственных и административно-хозяйственных подразделений завода. Однако эту систему ни в коем случае не следует рассматривать как некий сверхавтомат. Она не заменит человека, не подменяет экономическое и административное руководство, а лишь обеспечивает руководителей систематизированной информацией, необходимой для принятия наиболее целесообразных решений.

В системе можно выделить следующие основные функциональные звенья:

- средства сбора первичной информации (датчики информации);
- средства переработки информации (вычислительный комплекс);
- массивы нормативно-справочных и оперативных данных;
- программный аппарат для работы с массивами информации.

Сбор информации осуществляют периферийные устройства, которые установлены во всех подразделениях завода.

Важной особенностью АСУП «Львов» является то, что она работает в реальном масштабе времени, т.е. отражает действительное состояние производства в данный момент времени. Постоянный динамический анализ состояния деятельности отдельных участков, цехов в условиях производства телевизоров, которое представляет собой последовательный процесс, дает возможность выработать соответствующие рекомендации тем звеньям управления, от которых зависит в определенные моменты непрерывность производства. Достигается это тем, что в АСУП «Львов» происходит непрерывный сбор, контроль и экспресс-обработка данных о ходе производственного процесса. Причем процесс управления и прием информации происходят без нарушения вычислительных процессов с минимальной затратой времени.

Для каждой программы в системе имеется описание, в котором заложены основные ее характеристики. В соответствии с ходом производственного процесса и описанием программы управляющие блоки системы «выстраивают» задачи в очередь и производят их последовательное решение.

При обнаружении каких-либо отключений от производственного процесса (во время экспресс-анализа поступающих данных) управляющие блоки системы оценивают сложившуюся обстановку, пересматривают очередь программ, ожидающих обслуживания, и передают управление тем программам, задачей которых является поиск оптимальных путей нормализации производственного процесса в сложившейся ситуации. Большинство критических ситуаций прогнозируется системой заранее благодаря единой информационной основе.

Важную определяющую роль играет АСУП «Львов» в производственном планировании.

По строгому графику и по специальным запросам она решает широкий комплекс задач, позволяющих вести производство в оптимальном режиме.

С помощью системы определяют наиболее экономичные размеры партии деталей и узлов и периодичность их запуска в производство, наиболее рациональную загрузку оборудования, строятся оптимальные планы-графики производства.

Работа служб материально-технического снабжения также строится на основе документации, вырабатываемой АСУП.

Опыт показывает, что широкое использование электронно-вычислительной техники на предприятиях позволяет поднять эффективность производства.

Управлять надежностью технологического процесса, оборудования и всего производства можно и необходимо на основе применения АСУП, т.е. более рационально не создание специальной, отдельной системы обеспечения надежности, а встраивание блоков сбора, обработки информации и контроля надежности в имеющиеся и работающие АСУП. Это расширение возможности АСУП обеспечит не только повышение надежности производства, но и еще более повысит эффективность производства.

Проблема идентификации не нова. Для эффективного функционирования КСУОНП необходимо применять методы автоматического управления, на базе которых впервые были разработаны и освоены АСУП на Львовском п/о «Электрон». Несмотря на разработанность этих методов, они нуждаются в конкретной «доводке» для решения поставленной задачи внедрения и применения КСУОНП. Эффективность оптимизации объектов управления зависит от удачного сочетания формальных и неформальных приемов идентификации [5, 10, 59, 62, 63, 66]. Эта задача решается в диалоге исследователь-ЭВМ. Инженерное прогнозирование, идентификация, совершенствование и широкое применение АСУП образуют реальную базу для управления надежностью современного производства.

V.4. Система оценочных показателей надежности ХТС

Данная система должна включать в себя следующие группы показателей:

- 1) определенные ГОСТом показатели надежности;
- 2) специальные показатели, позволяющие охарактеризовать надежность химико-технологического производства в целом и отдельных его элементов;
- 3) показатели, характеризующие организацию производства и оказывающие влияние на надежность всей ХТС и ее элементов.

Первая группа показателей: вероятность отказа, вероятность безотказной работы, наработка на отказ и др. рассматривались в I главе. Количественная величина данных показателей рассчитана в разделе «Сбор и обработка информации об отказах ХТС», «Расчет показателей надежности». Эти показатели были использованы при оценке надежности всей ХТС, ХТП и ХТО. Вторая группа показателей, разработанная нами, характеризует воздействие специфических факторов, влияющих на надежность ХТС.

Основные причины, определяющие надежность, связаны как со случайными явлениями и факторами, так и с неслучайными. Ресурс – величина неслучайная, а вот время наработки на отказ – величина случайная. Поэтому и показатели, применяемые для оценки надежности, должны описываться либо аналитическими зависимостями, либо математическим аппаратом теории вероятностей (например, теория марковских процессов). Для оценки надежности ХТС следует применять не только показатели, базирующиеся на теории вероятностей, но и характеризующие физико-химическую особенность их надежности. Статистические (вероятностные) показатели надежности ХТС занесены в таблицу 3 приложения I.

Влияние отказов на надежную работу ХТС особенно велико при ведении интенсивных ХТП. Поэтому следует изучить природу и величину отказов интенсивных процессов. Природа, происхождение, физико-химия побочных процессов будут находиться в прямой зависимости от основного процесса, а надежность последнего будет определяться наличием побочных процессов (глава III). Мы предлагаем примерный перечень показателей для оценки надежности химико-технологических процессов при наличии побочных процессов (ПП), снижающих надежность основного процесса (см. таблицу 4, приложение I). Разнообразие ХТП и ПП определяет специфику расчетных и графических зависимостей и сам перечень показателей. Классификация отказов ХТС по причинам их возникновения приведена в таблице 5 приложения I.

Третья группа показателей, характеризующих надежность, разработана нами в соответствии со стандартами СТП 1.0251-79 производственного объединения «Ижорский завод». В этом документе дается оценка деятельности объединения по повышению качества продукции. Но поскольку надежность является одним из показателей качества, а также является первичным, определяющим показателем, поэтому мы воспользовались этим

стандартом для оценки деятельности предприятия по обеспечению надежности ХТС. Показатели надежности этой группы характеризуют организацию работы производства, достигнутые им результаты. Результаты деятельности производства по повышению качества продукции определяют [63]:

- по уровню качества выпускаемой продукции;
- выполнению планов по выпуску продукции;
- состоянию разработки, внедрения КСУКП и КСУОНП;
- выпуску продукции с Государственным знаком качества (до 1991г.)

Номенклатура показателей, применяемых для оценки надежности производства, деятельности производства по повышению качества продукции, коэффициенты весомости и формулы определения численных значений этих показателей сведены в таблицу 6 приложения I.

V.5. Основы разработки комплексной системы управления и обеспечения надежности производства

Наиболее эффективным в решении вопроса повышения надежности производства является системный анализ, предложенный В.В. Кафаровым [2] для изучения химико-технологических процессов. Подобный системный анализ предполагает проведение работы в три этапа: 1 – стратегический анализ надежности производства, 2 – качественное и количественное исследование надежности химико-технологического производства, 3 – составление топологических и математических моделей и принятие инженерных решений.

V.5.1. Статистический анализ надежности производства

На I этапе разработки КСУОНП необходимо исследование действующего производства и обработка результатов обследования, на основании чего затем разрабатываются мероприятия повышения надежности действующего производства.

На II этапе идет внедрение разработанных мероприятий, а III этап предусматривает внедрение КСУОНП, которая предполагает освоение новых технологических процессов, оборудования, приборов, новых методов организации труда на основе идентификации процессов и производства в целом. Конкретный пример разработки и внедрения КСУОНП можно привести по производству ронгалита на АО «Химпром» г. Иваново.

Комплексная система управления и обеспечения надежности химико-технологических производств имеет сложную структуру, состоящую из большого количества элементов, а следовательно, в ней может происходить такое же большое число отказов, оптимальное обнаружение и поиск которых предлагают Г.С.Пашковский и И.А.Ушаков [1]. Каждый из элементов системы может находиться в одном из двух состояний: работоспособности или отказа. Вероятность работоспособного состояния i -го элемента - p_i ,

вероятность отказа $q_i = 1 - p_i$. Далее предлагается контроль системы с помощью специальных тестов, каждый из которых проверяет работоспособность определенного подмножества элементов и преследует следующие цели: проверить работоспособность системы и отыскать отказы (отыскание всех отказавших элементов). Процессы контроля классифицируются авторами по семи признакам, что позволяет упростить задачу диагностирования (обнаружения и отыскания) отказов.

Комплексная система управления и обеспечения надежности производства, как уже было сказано ранее, должна быть подсистемой АСУП. Методическая помощь предприятию по разработке и внедрению комплексной системы управления качеством продукции оказывается рядом организаций, в настоящее время занимающихся и вопросами надежности (рис.23).

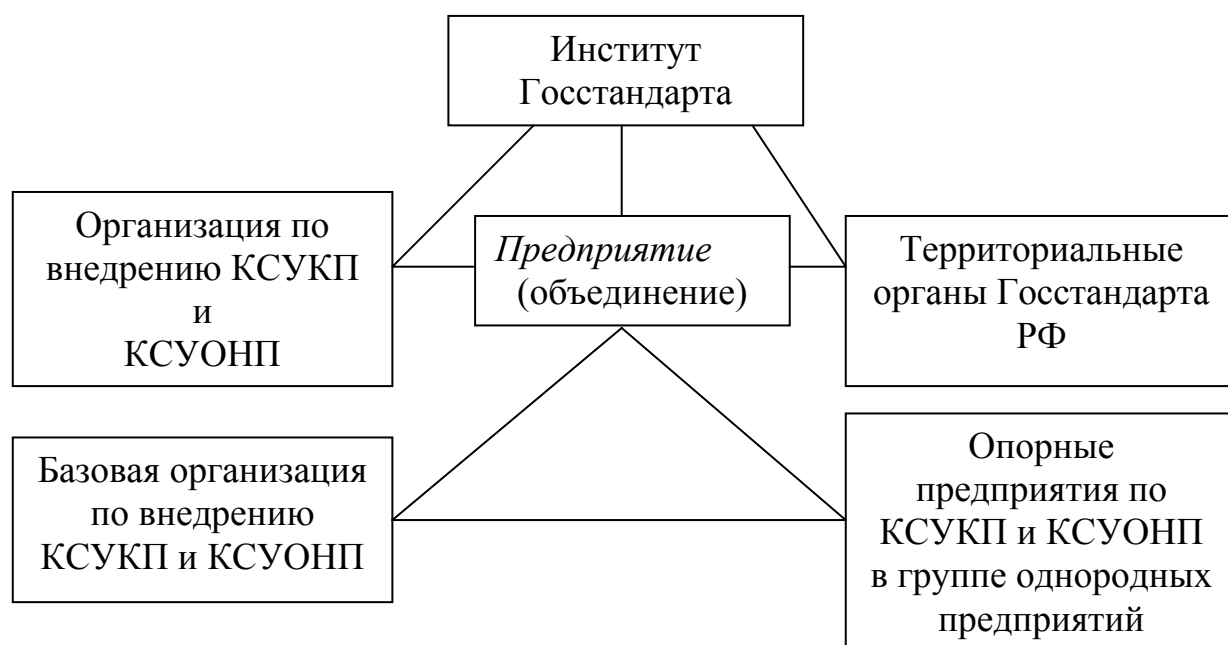


Рис.23. Методическое руководство внедрения КСУКП и КСУОНП

Повышение надежности производства ронгалита следует проводить в соответствии с разработанной нами методикой, которая заключается в проведении следующих мероприятий:

I. Обследование ХТС с целью выявления “узких” мест (отказы технологические, технические, организационные).

1.Обследование химико-технологических процессов:

- а) дать перечень и классификацию процессов производства,
- б) выявить ХТП, в которых происходят отказы,
- в) определить причину отказа, его сущность, закономерности, приводящие к отказу,

г) провести статистическую обработку данных по отказам ХТС.

2. Обследование химико-технологического оборудования:

а) привести перечень оборудования данного производства и его классификацию по группам сложности,

б) выявить ХТО, в которых происходят отказы (или велики простои ХТО),

в) определить причину отказа, его физико-механические закономерности,

г) провести статистическую обработку данных по отказам ХТО,

3. Обследование состояния организации производства и труда:

а) выявить причины организационных отказов и привести их классификацию,

б) провести статистический анализ данных по отказам вследствие организационных причин.

II. Разработка мероприятий, повышающих надежность ХТС.

1. Прогнозирование надежности ХТС, профилактика надежности.

2. Математическое моделирование надежности ХТП:

а) на основе теории графов (например, рассмотрение порядка повышения надежности) или

б) на базе теории вероятностей (например, статистический анализ состояния ХТС) или

в) на основе какого-либо другого математического аппарата (например, описание закономерностей причин надежности ХТС).

3. Усовершенствование (исключение причин отказов) работающих ХТП.

4. Разработка и внедрение новых ХТП (высокоэффективных, интенсивных, безотказных).

5. Повышение надежности ХТО:

а) при конструировании (разработка новых конструкций, включение в методику конструирования показателей надежности и т.д.),

б) при изготовлении (внедрение новых методов и новых форм организации труда, приспособлений, инструментов)

в) при эксплуатации (внедрение новых конструкций ХТО, ХТП, повышение надежности ХТО при его ремонте, организация труда при эксплуатации ХТС),

г) разработка и внедрение единых форм учетной документации для обеспечения эксплуатационной надежности ХТС).

III. Техничко-экономическое обоснование (ТЭО) надежности ХТС производства.

1. Расчет технико-экономических показателей (ТЭП), характеризующих надежность ХТС.

2. Разработка блок-схемы расчета и расчет ТЭО надежности производства ронгалита.

3. Создание и внедрение комплексной системы обеспечения и управления надежностью ХТС (идентификация).

Внедрение КСУОНП позволит предприятию:

1. Увеличить выпуск продукции, в т.ч. продукции улучшенного качества в общем объеме производства;
2. Освоить в минимальные сроки новые виды продукции, технический уровень и качество которой будут соответствовать мировым стандартам;
3. Снизить потери от брака и экономить различные виды ресурсов;
4. Улучшить основные экономические показатели деятельности предприятия.

Таким образом, методика разработки и внедрения КСУОНП предусматривает дифференцированный подход к изучению, разработке и внедрению КСУОНП соответственно для ХТО, ХТП, а также для организационно-управленческой службы предприятий с целью повышения надежности всей химико-технологической системы предприятия и должна базироваться (основываться) на системе стандартов «Надежность в технике» [67]. Основные положения ГОСТа 27.001-81 «предназначены для нормативного обеспечения методов, мероприятий и средств, направленных на достижение уровня надежности объектов» [9]. В этом стандарте в качестве одного из методов обеспечения надежности указывается «Сбор и обработка информации по надежности». С этой целью надо использовать технические условия, заводские стандарты по качеству и надежности технологических процессов и организации производства, оценки деятельности предприятий в области надежности и качества, например, СТП 1.0251-79 п/о «Ижорский завод».

В ГОСТе 27.204-83 устанавливается система сбора и обработки информации о надежности серийно-выпускаемых изделий всех отраслей машиностроения, формируются цели и задачи, общие положения сбора и обработки информации, порядка сбора информации.

В ГОСТе 27.002-89 «Формы учета результатов обработки эксплуатационной информации» устанавливается единое для всех отраслей машиностроения содержание форм учета эксплуатационной информации о надежности изделий: сводного перечня видов отказов изделий, сводного перечня оценок показателей надежности изделия и его составных частей.

Государственной стандартизации по разделу «Надежность в технике» подвергаются также проведение испытаний на надежность изделий машиностроения (ГОСТ 27.410-87), перечень терминов, показателей и расчетных зависимостей оценки надежности (ГОСТ 27.002-89).

Критерии отказа указываются в нормативно-технической документации на объект. Причинами отказов могут быть дефекты (ГОСТ 15467-79), допущенные при конструировании, производстве и ремонтах, нарушении правил и норм эксплуатации, а также естественные процессы изнашивания и старения.

Признаками возникновения отказа являются недопустимые изменения параметров работоспособности. К последствиям отказа относят явления, процессы, возникшие при отказе и находящиеся в непосредственной причинной связи с ним.

Итак, в соответствии с вышеизложенным и на основании СТП 1.0251-79 п/о «Ижорский завод» была разработана методика сбора эксплуатационной информации по надежности производства (система сбора, обработки и хранения информации о качестве и надежности ХТС), направленная:

- 1) на повышение дисциплины,
- 2) усовершенствование конструкций,
- 3) повышение качества обслуживания оборудования,
- 4) выдачу рекомендаций на ремонт оборудования при его эксплуатации.

Первоисточниками или носителями информации являются следующие документы:

1. Протокол результатов контроля, выданный специализированной организацией.
2. Технический акт, составляемый по результатам контроля оборудования, ХТП и ХТС на их соответствие требованиям чертежно-технологической документации.
3. Служебная записка руководителя по наладке и надзору при эксплуатации оборудования, ХТП и ХТС.
4. Техническое решение.
5. Акт-предписание.
6. Извещение об изменениях.
7. Акт о браке, допущенном заводом-изготовителем.

Носители информации должны содержать следующие данные:

- 1) место обнаружения дефекта (цех, участок и т.д.);
- 2) дату выявления дефекта (число, месяц, год);
- 3) подробное описание дефекта, количество, месторасположение;
- 4) на каком этапе создания или эксплуатации обнаружен дефект;
- 5) предполагаемую причину появления дефекта.

Источниками выдачи информации являются:

- 1) заказчик на ХТО, ХТП, ХТС;
- 2) проектные и научно-исследовательские организации;
- 3) контролирующие организации;
- 4) головная организация по сбору, обработке информации министерства;
- 5) служба главного инженера (технолога цеха), главного механика предприятия;
- 6) Отделы завода-изготовителя.

Получателями информации являются:

- 1) ОТК предприятия;
- 2) отделы заводоуправления;
- 3) отдел главного механика предприятия (в т. ч. СКБ);
- 4) служба надежности и качества предприятия.

По характеру содержания полученная информация подразделяется на оперативную (требуемая ответа в течение 10 дней), текущую (требуемая

ответа по согласованию с другими организациями) и исследовательскую (требующая мер для улучшения технологии, конструкции).

Собранная информация заносится в эксплуатационную карту, форма которой указана в таблице 12.

Таблица 12

Эксплуатационная карта химического производства

Время наблюдения (год, месяц, число)	Наименование состояния ХТС (ХТП, ХТО) на время начала	Шифр начального состояния ХТС (ХТП, ХТО)	Дата перехода в новое состояние	Наименование нового состояния ХТС (ХТП, ХТО)	Шифр нового состояния ХТС (ХТП, ХТО)	Причина простоя ХТС (ХТП, ХТО)	Шифр причины простоя	Место (объект) отказа ХТС (ХТС, ХТО)	Шифр отказавшего объекта	Причина возникновения отказа	Шифр причины возникновения отказа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

V.5.2. Цели и задачи комплексной системы управления и обеспечения надежности производства

Основной целью комплексной системы управления и обеспечения надежности производства (КСУОНП) является установление, обеспечение и поддержание необходимого уровня надежности производства на протяжении всего жизненного цикла его существования от проектирования (конструирования), создания (изготовления) и функционирования (работы) (рис.16).

Формирование такого комплексного показателя качества, как надежность, является сложным многоэтапным процессом, ход которого зависит от многих технических и организационных факторов, поэтому для достижения поставленной перед КСУОНП цели предполагается решение весьма большого ряда задач. Основными наиболее важными и крупными являются следующие задачи.

1. Дальнейшее изучение и исследование теоретических вопросов надежности, разработка классификации направлений обязательного применения теории надежности на различных уровнях управления

производством, разработка методики решения вопросов обеспечения надежности по этим направлениям.

2. Дать теоретически и экономически обоснованное определение надежности технологических процессов, организации, планирования и управления промышленным производством, сформулировать определение показателей их надежности, дать аналитические (буквенные) и графические (если это целесообразно) их обозначения.

3. Разработать подсистемы обеспечения и управления надежностью:

- а) оборудования;
- б) технологических процессов;
- в) организации производства;
- г) планирования производства, учета и контроля.

4. Разработать методику прогнозирования надежности технологического оборудования, приборов, процессов, организации, планирования, управления производством.

5. Обеспечить надежность в организации и проведении ремонта оборудования.

6. Выполнить технико-экономическое обоснование разработки и внедрения КСУОНП.

V.5.3. Основные принципы и функции КСУОНП

Исходя из задач и основной цели функционирования КСУОНП, предлагаем установить следующие ее принципы и функции. Мы считаем, что основными принципами КСУОНП являются:

- 1) непосредственная связь управления качеством и надежностью каждого конкретного производства с системой управления предприятием;
- 2) единство управления качеством и надежностью на всех уровнях: объединение – предприятие – цех – участок – бригада;
- 3) непрерывность управления надежностью на всех стадиях жизненного цикла: исследование и проектирование, изготовление, эксплуатация;
- 4) использование стандартов предприятия (СТП) в качестве нормативно-технической основы КСУОНП.

Основой КСУОНП должна являться определенная система сбора, обработки и хранения информации о качестве и надежности химико-технологической системы (ХТС). Служба КСУОНП должна разрабатывать мероприятия по совершенствованию работы обеспечения надежности ХТС и качества продукции, создавать системы оценочных показателей состояния надежности и качества на производстве, выполнять расчет и обоснование эффективности функционирования КСУОНП.

Приведенная выше программа (рис.24) разработки и внедрения КСУОНП условно состоит как бы из трех крупных блоков, каждый из которых предполагает изучение, исследование, анализ фактического положения по надежности на производстве и повышение надежности в той или иной области производства. Это является по существу принципиальной схемой организационной структуры службы обеспечения надежности производства.

Мы считаем целесообразным применение КСУОНП на следующих уровнях управления (рис.25). Такая постановка дела по внедрению КСУОНП в различных областях реально и весьма эффективно позволяет обеспечить надежность производства.

Система КСУОНП будет надежно функционировать, если будут последовательно и параллельно решаться все основные взаимосвязанные задачи, схематично изображенные на рис.2.

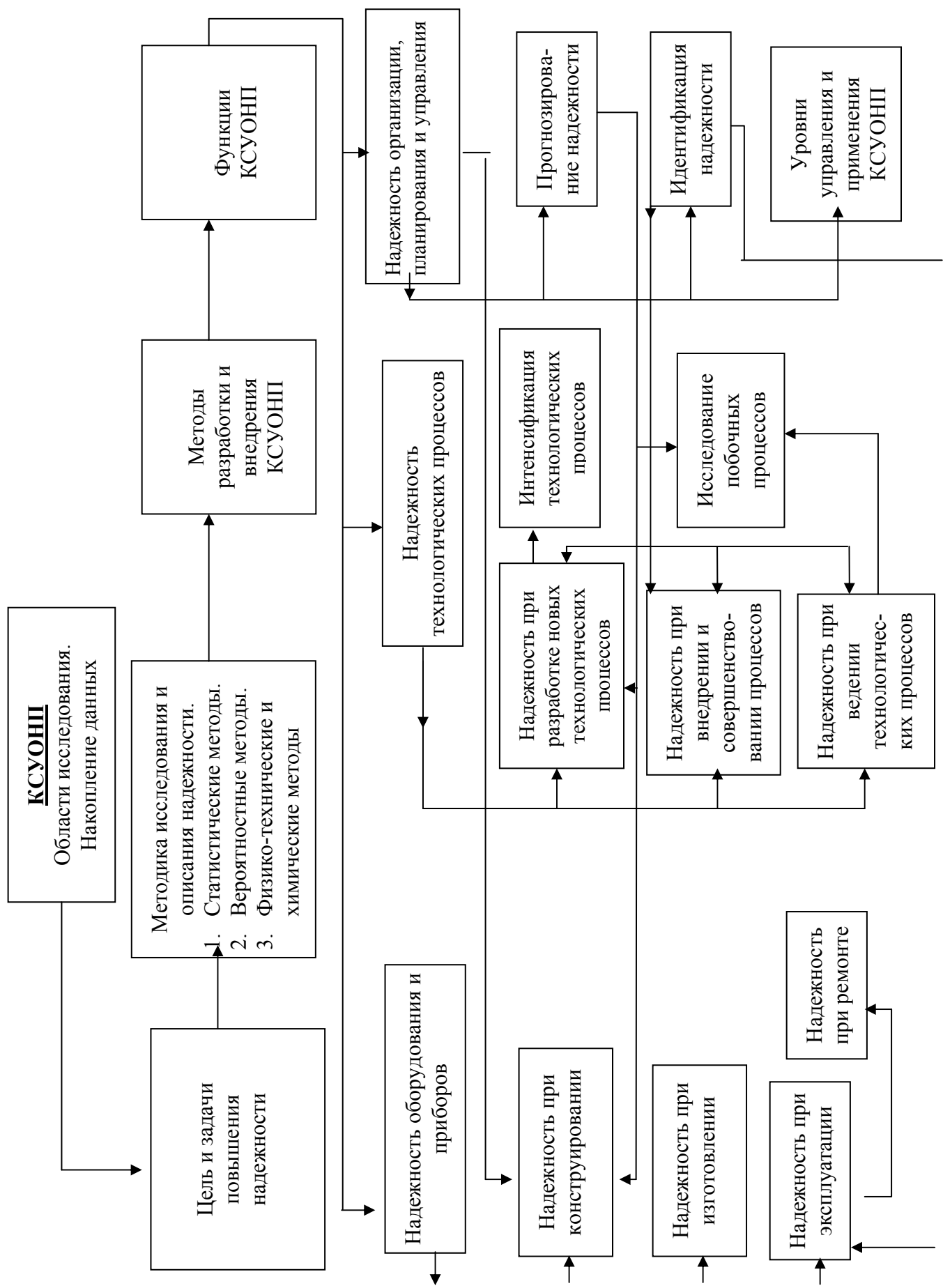


Рис.24. Система КСУОНП

Уровни управления	Результаты анализа	
	Использование системы управления и обеспечения надежности	
I	п/о	1. создание службы КСУОНП; 2. планирование выпуска продукции и ее качества; 3. планирование повышения технического уровня п/о*, предприятия и его подразделений;
II	предприятие	1. создание службы КСУОНП; 2. планирование повышения качества выпускаемой продукции; 3. планирование освоения новых видов продукции; 4. разработка и внедрение ХТО*, модернизация действующего оборудования
III	цех	1. планирование повышения качества и надежности выпускаемой продукции; 2. планирование технического и организационного развития производства; 3. внедрение новой технологии производства продукции; 4. освоение системы управления надежностью производства
IV	участок	1. усовершенствование ХТП* и операций; 2. модернизация и повышение надежности действующего ХТО; 3. разработка технически обоснованных норм
V	рабочее место	1. модернизация и обеспечение надежности ХТО и его узлов; 2. совершенствование приспособлений, инструмента, оснастки; 3. повышение дисциплины труда и технологической дисциплины

Рис.25. Принципиальная схема применения КСУОНП (уровни управления).

* п/о – производственное объединение

* ХТО – химико-технологическое оборудование

* ХТП – химико-технологический процесс

V.5.4. Техничко-экономическое обоснование освоения комплексной системы управления надежностью производства

Известно, что экономика является основным критерием для решения большинства практических вопросов надежности, то есть необходимо исходить из условия достижения наибольшего суммарного экономического эффекта, который дает внедрение мероприятий по увеличению или поддержанию на соответствующем уровне надежности объекта (оборудования, процесса, производства). Для достижения поставленной цели требуются определенные затраты (материальные и денежные средства), которые могут быть различными по величине и содержанию. Но часто мероприятия по повышению надежности не требуют существенных расходов.

Решение таких задач невозможно за счет экстенсивных факторов развития. Ускорение интенсификации производства можно обеспечить всемерным повышением технического уровня и качества продукции, опережением роста конечных результатов производства по отношению к затратам. Все это можно достигнуть не только за счет коренного обновления производственного потенциала, но и путем улучшения использования имеющихся основных производственных, фондов, увеличением съема продукции с каждой единицы оборудования, с каждого квадратного метра производственной площади, за счет повышения и обеспечения надежности оборудования, технологического процесса, всего производства. Влияние надежности косвенно сказывается на производительности общественного труда, но на производительность труда в промышленности, материало-, энерго-, металлоемкость и, соответственно, на себестоимость продукции надежность влияет непосредственно и прямо.

Предлагаемая в данной работе комплексная система управления и обеспечения надежности производства (КСУОНП) направлена, как уже было сказано, на формирование, поддержание, регулирование и управление надежностью, при необходимости на перестройку в определенной степени организации производства с целью создания условий для обеспечения его надежности. Такого рода система способна существенно улучшить экономические результаты производства. Для этого надо определить те факторы и параметры, воздействие на которые приведет к улучшению названных результатов, а также количественно измерить и определить величины их уровней. Анализируя методику определения технико-организационного уровня производства (ТОУП) проф. Л.В.Барташова [98] и предлагая разработанную нами систему оценочных показателей, мы выдвигаем в качестве основных параметров-характеристик надежности оборудования, технологического процесса: материалоемкость, энергоемкость и металлоемкость.

Названные параметры характеризуют потенциал надежности, дают представление об использовании этого потенциала и отражают его влияние на эффективность производства.

Исходя из того, что надежность объекта следует обеспечивать на всех стадиях его существования, технико-экономические расчеты необходимо проводить также для всех жизненных стадий объекта. Разработка объекта должна всегда предусматривать его оптимальную надежность. Повышение надежности проектируемого объекта связано с улучшением характеристик надежности (безотказности, долговечности и других). Ставя задачу увеличения надежности, надо провести сравнение капиталовложений и себестоимости при новой и базовой надежности. Целевая функция может быть выражена:

$$\mathcal{E}_n = \sum (C(H) + E_n \sum K(H)) \rightarrow \min ,$$

где $C(H)$ и $K(H)$ – соответственно себестоимость и капиталовложения с учетом внедрения более надежного объекта. Для проектируемых объектов необходимо также предусматривать соответствующие коэффициенты запаса, методика расчета которых излагалась ранее.

На стадии эксплуатации объекта обеспечение его надежной работы требует определенных затрат: установки регулирующих и контролирующих устройств, некоторых организационных мероприятий и т.д. Технико-экономические расчеты функционирования объекта с учетом его надежности предусматривают, во-первых, определение расходов, связанных с обеспечением надежности, а, во-вторых, необходимость расчета эффекта от поддержания соответствующего уровня надежности.

Анализируя динамику удельных капитальных вложений за 1976-1990 годах (на примере производства фосфорных удобрений) [99], можно доказать целесообразность и необходимость повышения надежности при внедрении КСУОНП. Удельные капитальные вложения за указанные годы растут. Рост удельных капитальных вложений составляет от 100% до 115%. Следовательно, если не обеспечивать надежность капитальных вложений, то по мере накопления фондов убытки от малой надежности будут расти пропорционально увеличению количества этих вложений. Без решения вопросов обеспечения надежности затрачиваемые средства на приобретение оборудования и других объектов будут представлять собой затраты на покрытие убытков от недостаточной надежности.

Например, если вероятность надежности $P(t) = 10\%$, а такая величина показателя очень часто имеет место, и это уже в книге было рассмотрено, то для обеспечения стабильной работы производства потребуется 90% дополнительного количества оборудования.

Таким образом, обеспечение определенного уровня надежности дает возможность сохранить материальные, энергетические и другие виды ресурсов, а также высвобождает средства на разработку, совершенствование и приобретение капитальных вложений.

**Динамика удельных капитальных вложений в производстве
фосфорных удобрений [99]**

Удельные капитальные вложения	Динамика удельных капитальных вложений в производство фосфорных удобрений			Динамика удельных капитальных вложений в производство сложных удобрений		
	1976-1980	1981-1985	1986-1990	1976-1980	1981-1985	1986-1990
На 1 рубль прироста товарной продукции, руб./руб.	3,3/6,3	0,7/4,8	1,5/2,9	2,2/3,7	3,3/4,1	1,1/3,0
На 1 т прироста производства продукции, руб./т	1031/2006	176/1118	461/887	624/1071	887/1087	369/987
На 1 т вводимых (приращенных) мощностей, руб./т	346/674	173/1097	331/638	262/450	445/544	254/679

Числитель – прямые удельные капитальные вложения.

Знаменатель – сопряженные капитальные вложения.

При определении экономического эффекта (Э) от повышения надежности функционирования химико-технологического производства следует учитывать эффективность мероприятий, проводимых во всех звеньях ХТС, и поэтому определяемая величина Э представляет собой сумму слагаемых эффективности от этих мероприятий.

Иначе говоря, для того чтобы дать технико-экономическое обоснование внедрения КСУОНП, следует определить эффективность от повышения надежности химико-технологического оборудования, эксплуатируемого в цехах химического предприятия; от повышения надежности функционирования технологического процесса; от надежной без срывов работы отделов заводоуправления и так далее. Эффективность требуемого уровня надежности данного производства необходимо определять с учетом того положительного экономического эффекта, который должен иметь место в смежных производствах. Это положение предусматривается «Методикой определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений» [48]:

$$\mathcal{E} = \left[3_1 \frac{B_2}{B_1} \frac{P_1 \cdot E_n}{P_2 \cdot E_n} + \frac{(I_1^1 - I_2^1) - E_n (K_2^1 - K_1^1)}{P_2 + E_n} - 3_2 \right] A_2$$

В этой, рекомендуемой для расчета эффекта зависимости учитываются затраты, необходимые для проведения того или иного мероприятия ($3_1, 3_2$); показатели (характеристики) старого и нового вариантов объекта (B_1, B_2); срок службы (P_1, P_2), если речь идет о каком-либо техническом объекте (машина, аппарат, прибор); экономия у потребителя на текущих издержках (I_1, I_2) и так далее. Эффективность мероприятий по повышению надежности

является временной функцией, поскольку надежность, как известно, есть свойство сохранять стабильность до определенного срока. Таким образом, расчет конкретной величины экономического эффекта от внедрения КСУОНП является весьма сложным процессом, он должен осуществляться по мере освоения этой системы и выявления всех факторов, обуславливающих надежность.

Для ряда предприятий химической, текстильной, строительной и др. отраслей промышленности нами были проведены различного рода мероприятия, связанные с исследованием, анализом и обеспечением надежности. Приведем примеры подобного расчета. Цены взяты на 1989 г.

Расчет ожидаемого годового экономического эффекта от внедрения мероприятия «Прогноз обрывности кордной нити» (г. Навои)

Наименование показателей	Обозначение	Единица измерения	Показатели базового варианта	Показатели нового варианта (1 год после внедрения)
Мощность	N	тонн	41100	-
Годовой объем производства	A	тыс.руб.	129810	130848,5
Себестоимость производства продукции (годовая)	C	тыс.руб.	112886	113565
Себестоимость производства единицы продукции	C _{ед}	руб.	869,6	867,9
Условно-постоянные расходы в составе себестоимости	H _y	тыс.руб.	28010	28010
Капитальные затраты	K	тыс.руб.	-	-
Затраты на разработку новой техники с учетом фактора времени	K _п	тыс.руб.	-	46,4
Экономический эффект	Э	тыс.руб.	-	206,6

Предлагаемое мероприятие «Прогноз обрывности кордной нити» позволит с упреждением 1-1,5 часа прогнозировать обрывность вязкозной кордной нити, происходящую по устранимым технологическим причинам. К этим причинам можно отнести: изменение качественных показателей исходной целлюлозы и несоответствие между параметрами вязкости и составом осадительной ванны. Мероприятие позволяет прогнозировать обрывность, возникающую из-за случайных причин (разного рода отказа технологического оборудования и аварийные ситуации). Своевременный прогноз обрывности позволяет, за счет оперативного управления составом осадительной ванны, снизить величину обрывности нити на прядельно-отделочном агрегате. При этом не происходит изменение номера нити. Система прогноза предназначена для функционирования на ЭВМ ЕС-1022. Для выдачи прогноза необходимо знать параметры вязкости после третьей

фильтрации (зрелость, вязкость, содержание NaOH и α -целлюлозы) и текущие параметры осадительной ванны (содержание H_2SO_4 , $ZnSO_4$ и лаурилпиридинсульфата). Экономический эффект достигается за счет увеличения выпуска кордного волокна (без изменения номера волокна), прядельным цехом, а, следовательно, и кордной ткани.

В качестве показателя обрывности нити используется приведенная обрывность « μ », т.е. число оборванных нитей, приходящихся на один работающий прядельно-отделочный агрегат. Средний уровень обрывности кордной нити составляет в настоящее время 0,9-1,0 (без учета графика сменности фильер), внедрение мероприятия «Прогноз обрывности кордной нити» позволит в среднем снизить уровень обрывности на 0,5-0,6 оборванных мест на одну машину. Поскольку при внедрении мероприятия не происходит изменение качества готового продукта (волокна и ткани), то экономический эффект рассчитываем по формуле:

$$\mathcal{E} = H_y \frac{A_2 - N_1}{N_1} - E_n \left(K_n - K_1 \frac{A_2 - N_1}{N_1} \right) - \mathcal{Z}_m,$$

$\mathcal{Z}_m$ - затраты машинного времени.

Так как внедрение мероприятия не требует капитальных затрат и затрат на финансирование разработок, то экономический эффект рассчитываем по следующей формуле:

$$\mathcal{E} = H_y \frac{A_2 - N_1}{N_1} - E_n K_n - \mathcal{Z}_m.$$

Выпуск продукции после внедрения системы можно рассчитать по формуле:

$$A_2 = A_1 (q_a + 1),$$

где $q_a = 0,5 / (64,2 - 1,0)$ - коэффициент увеличения выпуска продукции;

64,2 - среднее число мест на прядельно-отделочное агрегате;

1,0 - средний уровень обрывности;

$E_n = 0,15$.

$$A_2 = 41100 \left(\frac{0,5}{63,2} + 1 \right) = 41423 \text{ т},$$

$$\mathcal{E} = 23010 \cdot 0,0078 - 0,15 \cdot 46,4 - 8,0 = 221,6 - 6,96 - 8 = 206,6 \text{ тыс.руб.}$$

Экономическая эффективность внедрения в производство ронгалита на АО «Химпром» предлагаемой нами новой стадии процесса (стадии активации - измельчения Zn – порошка) обуславливается, во-первых, повышением надежности этого производства $\mathcal{E}_T$, во-вторых, получением дополнительного количества продукта (за счет интенсификации производства) $\Delta \mathcal{E}_B$, и, в-третьих, за счет экономии сырья $\mathcal{E}_C$:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_T + \Delta \mathcal{E}_B + \mathcal{E}_C$$

Затраты, которые необходимо произвести на осуществление данного мероприятия составят 875 рублей. По нашим расчетам, себестоимость 1 т ронгалита до проведения нами мероприятия по увеличению надежности

производства составляла 698 рублей, а после проведения – 646 рублей. Дополнительно в год можно будет получать 1700 кг ронгалита. В связи с изложенным, экономия от снижения себестоимости составляет около 100 тысяч рублей, а выручка от реализации дополнительного объема получаемого ронгалита 1190 тысяч рублей (прибыль составит 180200 тыс.руб.).

Экономический эффект от внедрения результатов работы, выполненной нами для НПО «Полимерсинтез», должен быть интегральный, причем максимальная его величина точно и окончательно не может быть обозначена в связи со значительной динамичностью самого объекта исследования – надежности. Работа носит комплексный характер, экономический эффект поэтому будет складываться из эффективности результатов нескольких направлений работы.

Обследования некоторых предприятий НПО показали, что в настоящее время надежность оборудования составляет не более 20%. Повышение надежности возможно до 80% и более, при исключении технологических, технических и организационных причин отказов (недостатков) в работе оборудования. Это позволяет добиться увеличения выхода химической продукции до 30-60%, что, в свою очередь, приведет к снижению потерь сырья, энергии, необоснованного перерасхода заработной платы, снизятся расходы на содержание и эксплуатацию оборудования, а также накладные расходы.

Например, заработная плата в себестоимости продукции составляет для данных производств до 25%. Следовательно, экономия от необоснованного перерасхода только по заработной плате около 25% от себестоимости продукции, поскольку себестоимость продукции данных производств составляет 1000-2000 руб./т, то экономия (средняя величина): $0,25 \cdot 1500 = 375$ руб./т.

При дополнительном выпуске продукции 150000 кг в год экономия только по заработной плате составит $375 \cdot 150 = 56250$ руб.

Для трех предприятий НПО «Полимерсинтез» в г.Энгельсе, Ереване и Навои ожидаемая экономия более 150000 рублей в год только за счет заработной платы (по данным 1989 г.).

В данной книге представлена разработанная и рекомендованная для химических предприятий комплексная система управления и обеспечения надежности промышленных производств (КСУОНП) (рис.24), которая, на наш взгляд, должна являться для промышленных предприятий инструментом управления и обеспечения надежности оборудования, процессов, технологических систем. Разработанная комплексная система может быть использована на химических производствах, в производствах строительных материалов, пищевых продуктов, на текстильных предприятиях, в фармацевтических производствах и на других промышленных предприятиях.

Для раскрытия сущности надежности химико-технологических производств нами были разработаны математические модели надежности химико-технологического процесса (ХТП), химико-технологического

оборудования (ХТО), химико-технологической системы (ХТС); проанализированы, сопоставлены и рекомендованы математические модели надежности различных объектов для характеристики и описания надежности технологического оборудования и химико-технологических процессов кристаллизации, измельчения, обжига, сушки, грануляции и т.д. вышеупомянутых различных промышленных производств. Приводится также классификация причин снижения надежности (например, протекание коррозионных процессов, побочных процессов, инкрустации и др.), классификация видов отказов ХТП, ХТО, ХТС; применения КСУОНП на различных уровнях управления (рис.25); дается технико-экономическое обоснование использования КСУОНП.

Приложение I

Комплексная система управления и обеспечения надежности химико-технологических производств предполагает изучение, исследование и анализ действующего производства. Для решения подобной задачи прежде всего необходимо обследование определенного для этих целей объекта. Корректно и с минимальным количеством ошибок можно выполнить эту задачу, имея разработанные формы таблиц (документов) для получения информации (сбора необходимых данных) и полный состав (перечень) показателей, характеризующих надежность химико-технологических систем, а также ХТО и ХТП.

Таблица I.1

Перечень дефектов,

выявленных на _____

№ п/п	Наименование объекта	Характер работы, выполняемый объектом	Документ, фиксирующий дефект	Причина дефекта	Решение по устранению дефекта	Примечание
1	2	3	4	5	6	7

Таблица I.2

Отчет об устранении дефектов,

выявленных на _____

№ п/п	Наименование объекта	Характер, произведенной объектом работы	Документ, фиксирующий устранение дефекта	Причина дефекта	Принятые меры по устранению (дата устранения, кто устранил)	Примечание
1	2	3	4	5	6	7

Таблица I.3

Показатели надежности и их характеристики

№ п/п	Название показателя	Характеристика показателя	Расчетная зависимость	Графическое изображение
1	Вероятность безотказной работы	Показатель безотказности	$P(t) = P(t_{pi})$	
2	Среднее время безотказной работы	-"-	$m(t_p) = mt_p(t_{pi})$	
3	Интенсивность отказов	-"-	$\lambda = \lambda(t_{pi})$	
4	Срок службы до отказа (наработка на отказ)	Показатели долговечности		
5	Средний срок службы (ресурс.)	-"-	$\theta(t = \sum_0^t \bar{t})$	
6	Среднее время восстановления работоспособности после отказа	Показатели ремонтпригодности	$mt_{\bar{e}} = mt_{\bar{e}}(t_{ei})$	
7	Коэффициент технического использования (к.экстенсивности)	Количественные показатели	$K_{TH} = K_{TH}(t_{pi}, t_{ei})$	
8	Коэффициент готовности к эксплуатации	-"-	$K_z = K_z(t_{pi}, t_{ei})$	
9	Коэффициент интенсивности процесса	-"-	$K_H = K_H(t_{pi})$	

Примечание: Обозначения величин в рассмотренных зависимостях взяты по ГОСТ 13377-75

Таблица I.4

Показатели надежности химико-технологических процессов

№п/п	Название показателя	Характеристика показателя	Расчетная зависимость	Графическая зависимость
1	Скорость побочного процесса (ПП), снижающего надежность основного	Детерминированный показатель	$U = \frac{dx}{dt}$	Определяется основным процессом
2	Мощность ПП (количество зон, пораженных ПП от всего объема, где протекает основной процесс)	-"	$M = U dV$	-"
3	Интенсивность ПП	-"	$\lambda = \frac{dU}{dV}$	-"
4	Движущая сила ПП	-"	Определяется природой ПП	-"

Таблица I.5

Классификация причин отказов химико-технологического оборудования и процессов

Группа	Причина возникновения	Условия или место возникновения	Возможности устранения
I	Объективные причины		Устранимо
I а	Категория сложности ХТО		-"
I б	Дефекты конструирования	При конструировании	-"
I в	Дефекты изготовления	При изготовлении	-"
I г	Природа и качество материала ХТО	При эксплуатации	Неустранимо
I д	Прогрессирующий износ ХТО	-"	Устранимо
I е	Категория сложности ХТП		
II	Субъективные причины	-"	-"
II а	Изменение параметров процесса (температуры, давления, нормы расходов и т.д.)		
	1) внезапные		Неустранимо
	2) постоянные		-"
	3) временные	-"	Устранимо
II б	Организация труда на рабочем месте		-"
	1) качество обслуживания		-"
	2) квалификация исполнителя	-"	
II в	Качество ремонта ХТО	При ремонте	-"
			-"

Таблица I.6

Показатели качества и надежности работы производства

Наименование и условное обозначение показателя	Коэффициент весомости	Расчет показателя деятельности производства
Выпуск продукции со знаком качества (ГЗК) в общем объеме товарной продукции (K_1)	5	$K_1 = P_1 : P_p$, где P_1 -объем выпуска продукции с ГЗК (тыс.руб.); P_p -общий объем товарной продукции (тыс.руб.)
Выполнение плана по выпуску продукции с ГЗК (K_2) за отчетный период	10	$K_2 = P_2^r : P_2$, где P_2^r -объем продукции с ГЗК, P_2 -планируемый объем выпуска продукции с ГЗК (тыс.руб.)
Сдача продукции ОТК с первого предъявления (K_3)	1	$K_3 = P_3 : P_o$, где P_3 -количество принятых предъявок ОТК, P_o -общее количество предъявок
Выпуск неаттестованной продукции в общем объеме реализованной (K_4)	10	$K_4 = P_4 : P_p$, где P_4 -объем выпуска неаттестованной продукции, P_p -общий объем реализованной продукции (тыс.руб.)
Потери от брака в объеме валовой продукции, потери от экономических санкций (K_5)	10	$K_5 = P_5 : P_b$, где P_5 -объем потерь от брака и экономических санкций, P_b -объем валовой продукции (тыс.руб.)
Выполнение плана повышения качества продукции (K_6)	3	$K_6 = P_6^b : P_6$, где P_6^b -количество выполненных мероприятий, P_6 -общее количество мероприятий по плану (шт.)
Выполнение плана работ по совершенствованию КСУКП и КСУОН (K_7)	3	$K_7 = P_7^b : P_7$, где P_7^b -количество выполненных мероприятий (шт.), P_7 -общее количество мероприятий (шт.)
Нарушение технологической дисциплины за плановый период (K_8)	10	$K_8 = P_8 : Ч_{сп}$, где P_8 -количество нарушений технологической дисциплины за год
Нарушение трудовой дисциплины (K_9)	10	$K_9 = P_9 : Ч_{сп}$, где P_9 -количество нарушений трудовой дисциплины за год; $Ч_{сп}$ -списочная численность работающих

Примечания к таблице I.6.

1. Если за отчетный период показатель К не планировался, то принять его равным «0».
2. Показатели K_6, K_7, K_8, K_9 при подсчете обобщенного показателя учитывать со знаком минус.

Предприятие ежеквартально определяет свой обобщенный показатель по повышению качества продукции и обеспечению надежности – $K_{p.o.}$.

$$K_{p.o.} = \sum_{i=1}^n K_i K_{ei}, \quad (6)$$

где K_i – показатель, применяемый для оценки деятельности предприятия;

K_{ei} – коэффициент весомости i -го показателя.

3. Если за отчетный период показатель $K_{p.o.}$ не планировался, то его значение принимать равным «0».
4. Показатели K_2, K_6, K_7 при невыполнении плана $\left(\frac{\Pi_i}{\Pi_{in}} < 1 \right)$ определять по формуле $K_i = 1 - \frac{\Pi_i}{\Pi_{in}} K_{ei}$ и в обобщенном показателе учитывать знак минус.
5. Показатели K_4, K_5, K_8, K_9 при подсчете обобщенного показателя учитывать со знаком минус.

Приложение II (справочное)

Определение гамма-процентного ресурса элементов.

Величины ресурсов элементов одной и той же партии не имеют равных значений даже при строгом поддержании нагрузки на одном и том же уровне, а подчиняются некоторому статистическому распределению, группирующемуся около некоторой величины, называемой средним ресурсом $T_{с.р.}$.

Величина γ выбирается равной 1; 0,99; 0,95; 0,90; 0,80 в зависимости от ответственности элемента и его стоимости. При выборе повышенных значений γ уменьшается межремонтный период и возрастают затраты на ремонты.

Если разработчику неизвестен закон распределения ресурса элемента, то вид закона распределения и его параметры могут быть ориентировочно определены по табл.V.1 и V.2. Ограничение двумя распределениями – нормальным и Вейбулла – объясняется тем, что эти распределения хорошо аппроксимируют все возможные случаи распределения ресурсов элементов машин и агрегатов и рекомендованы ВНИИНМАШем в тех случаях, когда законы распределения ресурсов элементов неизвестны.

Таблица II.1

Классификация факторов, определяющих вид распределения ресурса элементов

Общее определение классифицируемого фактора	Признак проявления фактора	Шифр фактора
Характер разрушения	Постепенный	1
	Внезапный	2
Стабильность условий эксплуатации	Стабильные	1
	Изменяющиеся в широких пределах	2
Степень нагруженности	Нагрузки, близкие к максимальным	1
	Средние нагрузки	2
Уровень технологии изготовления	Высокий уровень	1
	Средний уровень	2

Таблица II.2

Значения коэффициентов вариации распределений ресурсов для
ориентировочных расчетов надежности элементов

Шифры определяющих факторов				Вид закона распре- деления (Н- нормаль- ный, В- Вейбула)	Диапазон измене- ния коэффи- циентов вариации
Характер разруше- ния	Стабиль- ность эксплуа- тации	Степень нагру- женности	Уровень техноло- гии изготов- ления		
1	1	1	1	Н	0,10-0,20
1	1	1	2	Н	0,20-0,25
1	1	2	1	Н	0,20-0,30
1	2	1	1	В	0,30-0,40
1	2	1	2	В	0,40-0,50
1	2	2	2	В	0,40-0,55
1	2	2	1	В	0,40-0,60
1	2	2	2	В	0,50-0,60
2	1	1	1	В	0,30-0,40
2	1	1	2	В	0,30-0,45
2	1	2	1	В	0,35-0,50
2	2	1	1	В	0,35-0,55
2	2	1	2	В	0,40-0,55
2	2	2	1	В	0,40-0,60
2	2	2	2	В	0,50-0,70

Таблица II-3

Технико-экономические показатели конструкции
(для всех стадий)

№ п/п	Наименование показателя	Единица измерения	Базовый вариант	Новая конструкция
1	2	3	4	5

I. Стадия конструирования.

Показатели прогноза:

- 1) вероятность безотказной работы;
- 2) критерий технологического уровня.

Показатели надежности:

- 1) наработка на отказ, T ;
- 2) ресурс до капитального ремонта, T_p ;
- 3) срок службы, $T_{сл}$;
- 4) коэффициент технического использования, $K_{ти}$.

II. Стадия изготовления.

- 1) вес конструкции (металлоемкость);
- 2) габариты конструкции;
- 3) дельный расход металла на единицу производительности;
- 4) трудоемкость изготовления МАХП;
- 5) процент использования ранее освоенных узлов и деталей;
- 6) процент использования нормализованных и стандартизованных узлов и деталей;
- 7) стоимость изготовления МАХП (себестоимость);
- 8) удельные затраты на единицу производительности;
- 9) эффект у изготовителя МАХП.

III. Стадия эксплуатации.

- 1) производительность МАХП;
- 2) энергоемкость МАХП;
- 3) годовой выпуск химической продукции;
 - а) в натуральном выражении;
 - б) по себестоимости;
 - в) по НЧП;
- 4) стоимость МАХП;
- 5) списочная численность персонала, обслуживающего МАХП;
- 6) производительность труда работающего (трудоемкость химической продукции);
- 7) фондоотдача;
- 8) полная себестоимость единицы химической продукции;
- 9) оптовая цена единицы химической продукции;

- 10) годовая сумма прибыли от реализации;
- 11) рентабельность производства;
- 12) срок окупаемости капитальных вложений (МАХП);
- 13) величина н/х эффекта;
- 14) эффект у потребителя МАХП;
- 15) коэффициент эффективности МАХП;

Приложение III

В соответствии с разработанной комплексной системой управления и обеспечения надежности производства (рис. 24) предлагаются для сбора, анализа и обработки эксплуатационных данных соответствующие таблицы, блок-схема алгоритма обработки эксплуатационной информации и расчетные зависимости для определения показателей надежности.

Определение характеристик надежности производится в соответствии с формулами (ГОСТ 27002-89)

$$1. T_{cp} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n t_i \quad - \quad \text{среднее время работы между отказами.}$$

$$2. T_b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n tb_i \quad - \quad \text{среднее время восстановления.}$$

где t_i – ая наработка между отказами, иначе, длительность пребывания в i – ом состоянии.

$$t_i = \sum_k t_{mk} + 24(X_{D_{i+1}} + X_{D_i}) + (X_{q_{i+1}} + X_{q_i})$$

где t_{mk} – количество часов работы в k -ом месяце года;

$$\sum_{i=1}^n tb_i \text{ - суммарное время непланового ремонта;}$$

n – число отказов.

$$3. K_{TH} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^n tb_i + \sum_{j=1}^m tn_{xj}},$$

где t_{nxj} – длительность j – го планового ремонта;

m – количество плановых ремонтов.

$$4. \lambda = \frac{1}{T_{cp}} \quad - \quad \text{средняя интенсивность потока отказов.}$$

$$5. K_r = \frac{T_{cp}}{T_{cp} T_B} \quad - \quad \text{коэффициент готовности.}$$

Аналитическое выражение для интенсивности отказов записывается следующим образом:

$$\lambda(t) = \frac{F(t)}{P(t)}.$$

Обе функции, входящие в выражение интенсивности отказов, известны, следовательно, легко определяется и $\lambda(t)$. Для нормального закона распределения $\lambda(t)$ имеет монотонно возрастающий вид.

Вероятности безотказной работы оборудования $P(t) = 0,8567$ можно достигнуть путем разработки и внедрения ряда мероприятий, исключающих простои и отказы в работе цеха по организационным, техническим и технологическим причинам.

С целью получения количественных оценок параметров надежности разработан алгоритм обработки на ЭВМ статистической информации эксплуатации ХТС. В эксплуатационных картах (таблица 3, глава I) собираются сведения о состояниях производства, о причинах простоя, месте простоя, о причинах возникновения отказа (аварии). Все эти сведения шифруются. Пример шифрования показан в табл. III-1.

Таблица III.1

Наименование состояния ХТС (ХТП, ХТО)	Шифр состояния
Работа ХТС, или химико-технологического процесса (ХТП), или химико-технологического оборудования (ХТО).	0-1
Работа с ухудшенными параметрами	0-2
Простой в резерве	0-3
Простой вследствие аварии (отказа)	0-4
Простой по организационным причинам	0-5
Текущий ремонт	0-6
Капитальный ремонт	0-7
Неплановый ремонт	0-8
Ремонт по графику, совмещенный с неплановым ремонтом	0-9

Шифры новых состояний ХТС (ХТО, ХТП) такие же, что указаны в табл. III.1. проставляются при наличии изменения состояний.

Причины простоя шифруются таким же образом, как и состояния (табл. III-2).

Таблица III.2 составлена для шифровки причин простоя кристаллизатора в цехе ронгалита АО «Химпром».

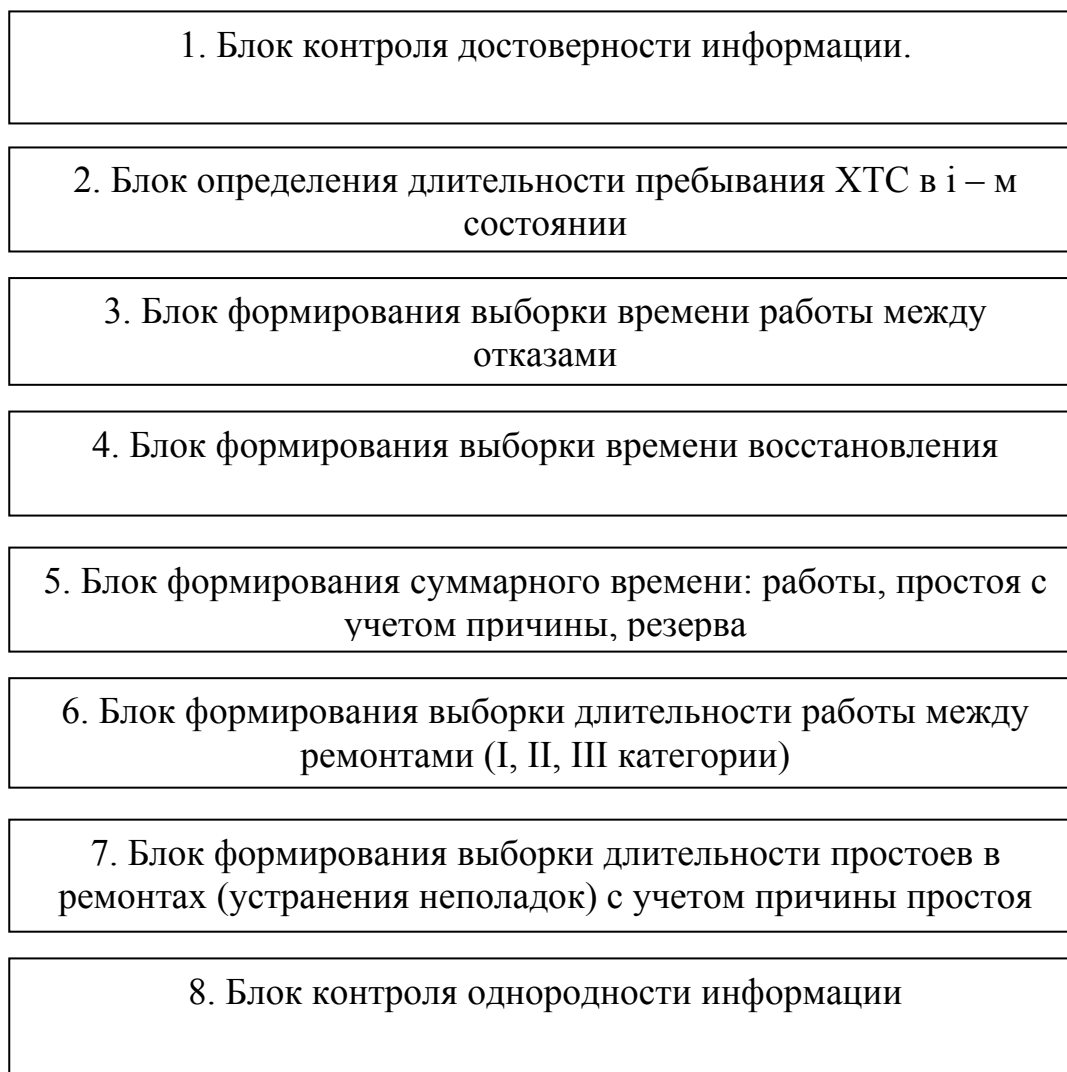
Таблица III.2

Наименование причин простоя	Шифр
Износ барабана	II-1
Износ намазываемого валика	II-2
Разрушение подшипников редуктора	II-3
Поломка шестерни	II-4
Износ штуцеров воды	II-5
Износ подшипников скольжения барабана	II-6
Увеличение зазора между барабаном и намазывающим валиком	II-7
Износ сальников	II-8
Замена паровых шлангов	II-9

Подобным же образом шифруется остальная информация эксплуатационной карты (табл.10 глава V).

При разработке алгоритма обработки статистической информации за основу была взята методика обработки статистической информации о надежности технических изделий на ЭВМ. С целью расположения информации в памяти ЭВМ в определенной последовательности, каждое событие принималось, как элемент массива, размерность которого $5n$, где n – количество (отказов) событий. Каждое событие представлялось как вектор с пятью компонентами, четыре из которых характеризуют момент изменения состояния процесса или оборудования: 1) год – две последние цифры, 2) месяц, 3) число, 4) час наступления события: X_g , X_m , X_d , X_{ch} , и одна величина является шифром состояния – X_c . При шифровке применяется десятичная система исчисления. Для экономии ячеек памяти в программе предусматривается ввод числа X_1 – числа событий на исследуемом отрезке времени.

Зашифрованная информация с эксплуатационной карты переносится на перфоленту и является числовым материалом для проведения расчетов в программе. На (рис. III.1) приводится укрупненная блок-схема алгоритма обработки эксплуатационной информации.



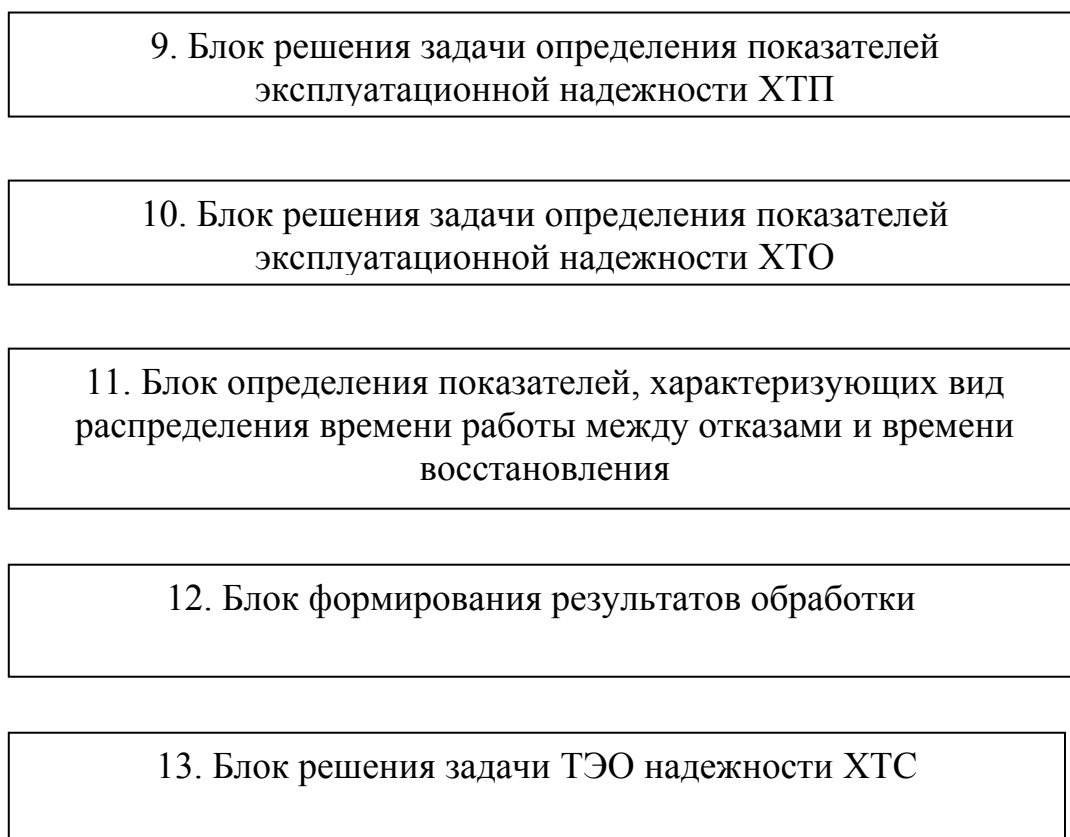


Рис. III.1

*I, II, III категории ремонтов – соответственно плановые капитальный, текущий и ремонт для устранения последствий отказов.

Список литературы

1. Надежность технических систем [Текст]: справочник под ред. Ушакова И.А. - М.: Радио и связь, 1985.
2. Зубова, А.Ф. Надежность машин и аппаратов химических производств [Текст] / А.Ф. Зубова. – Л.: Машиностроение, 1978.
3. Зубова, А.Ф. Надежность машин и аппаратов химических производств [Текст] / А.Ф. Зубова. – Л.: Машиностроение, 1971.
4. Переработка фосфоритов Каратау [Текст] / Под ред. М.Е. Позина - Л.: Химия, 1975.
5. Кафаров, В.П. Принципы создания безотходных химических производств [Текст] / В.В. Кафаров. - М.: Химия, 1982.
6. Плановский, А.Н. Процессы и аппараты химической технологии [Текст] / А.Н. Плановский. - М.: Химия, 1967.
7. Кафаров, В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии [Текст] / В.В. Кафаров. - М.: Химия, 1968.
8. Альперович, И.Г. [Текст] / И.Г. Альперович, В.А. Ершов, М.А. Мухтаров. – Тр. – Л.: ЛеНН.-1969.-Вып. II-С.3.
9. ГОСТ 27.001-81. Система стандартов. «Надежность в технике». Основные положения [Текст].
10. Кафаров, В.В. Системный анализ процессов химической технологии. [Текст] / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов. Кн.1, 2, 3. - М.: Наука, 1976, 1979, 1981 гг.
11. Гнеденко, Б.В. Математика и теория надежности [Текст] / Б.В. Гнеденко, А.Д. Соловьев.- Сер.: Математика, кибернетика.-1982.- №10.
12. Надежность и эффективность в технике [Текст]: справочник: В 10т. - М.: Машиностроение, 1986.
13. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей [Текст] /Е.С. Вентцель, В.Я. Овчаров. - М.: 1969.
14. Тихонов, В.И. Марковские процессы [Текст] / В.И. Тихонов, М.А. Миронов. - М.: Сов. радио, 1977.
15. Смирнов, Н.М. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений [Текст] / С.М. Смирнов, И.В. Дудин-Барковский. - М.: Наука, 1969.
16. Кафаров, В.В. Принципы математического моделирования химико-технологических систем [Текст] / В.В. Кафаров, В.Л. Перов, В.П. Мешалкин. - М.: Химия, 1974.
17. Беленький Д.М. Качество и надежность машин [Текст] / Д.М. Беленький, В.Е. Касьянов // Вопросы экономики.-1986.-№3.-С. 61.
18. Проников, А.С. Надежность машин [Текст] / А.С. Пронников.-М.: Машиностроение, 1978.
19. Дедков, В.К. Основные вопросы эксплуатации сложных систем [Текст] / В.К. Дедков, Н.А. Северцев.- М.: Высш. шк., 1976.

20. Костицкий, Б.И. Надежность и долговечность машин [Текст] / Б.И. Костицкий. - Киев. Техника, 1975.
21. Болотин, В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций [Текст] / В.В. Болотин. - М.: Машиностроение, 1984.
22. ГОСТ 27.004-85. Надежность в технике. Система технологических терминов и определения [Текст]. - Взамен ГОСТ 254 – 78.
23. Надежность и техническая диагностика технологического оборудования [Текст]: сб. стат. – М.: Изд-во стандартов, 1986 (Единая система технологической подготовки производства). Сер.: Опыт внедрения ЕСТП. - Вып.29.
24. Кафаров, В.В. Обеспечение и методы оптимизации надежности химических и нефтеперерабатывающих производств [Текст] / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин, Г. Грун, В. Нейман. - М.: Химия, 1987.
25. Кафаров, В.В.. Надежность оборудования и технологических схем химических и нефтехимических производств [Текст] / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин. - М.: Химия, 1979.
26. Батунер, Л.М., Математические методы в химической технике [Текст] / Л.М. Батунер, М.Е. Позин. - М.: Химия, 1968.
27. Пугачев, В.С. Введение в теорию вероятностей [Текст] / В.С. Пугачев.-М.: Наука, 1968.
28. Жилинский, И.Б. Примеры решения задач по расчету надежности оборудования химических производств [Текст] / И.Б. Жилинский. - М.: МИХМ, 1977.
29. Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надежности [Текст] / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. - М.: Наука, 1965.
30. Костоглядов, И.Н. Система сбора информации о неисправностях техники в гражданской авиации [Текст] /И.Н. Костоглядов, И.Н. Бахметов. // Надежность и контроль качества. – 1974. - №7. - С. 41-50.
31. Технология фосфора [Текст] / Под ред. Ершова В.П. - Л.: Химия, 1979.
32. Постников, Н.Н. [Текст] / Н.Н. Постников // Химстрой.-1932.-№8-9.- С.1353.
33. Афанасьева, Т.А. Исследование закономерностей агломерации и поведения агломератов в псевдоожиженной системе газ – твердое тело [Текст]: дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – Иваново, 1971.
34. Аэров, М.А. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем [Текст] / М.А. Аэров, О.М. Тодес. – Л.: Химия, 1968.
35. Лыков, А.В. Теория сушки [Текст] / А.В.Лыков. - М.: Энергия, 1968.
36. Падохин В.А. Автореферат докторской диссертации. Стохастическое моделирование диспергирования и механоактивации гетерогенных систем. Иваново, 1999.
37. Стрельцов, В.В. Исследование и разработка метода расчета некоторых процессов основной химической технологии, осуществляемых в

- псевдоожиженном слое [Текст]: дисс. на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук.- Иваново, 1969.
38. Хамский, Е.В. Кристаллизация в химической промышленности [Текст] / Е.В. Хамский. - М.: Химия, 1979.
39. Разумовский, Л.А. Исследование кинетики процессов кристаллизации солей из растворов во взвешенном слое [Текст]: дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. - Иваново, 1967.
40. Матусевич, Л.Н. Кристаллизация растворов в химической промышленности [Текст] / Л.Н. Матусевич. - М. Химия, 1968.
41. Мучник, Г.Ф. Методы теории теплообмена [Текст] / Г.Ф. Мучник, И.Б. Рубашов. Ч.I Теплопроводность. - М.: Высш. шк., 1970.
42. Афанасьева, Т.А. Определение вероятности отказа интенсивного химико-технологического процесса [Текст] / Т.А. Афанасьева // Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология. – 1981.-Т. XXIV.-С.782.
43. Ковалев, А.П. Экономическая эффективность новой техники в машиностроении [Текст] / А.П. Ковалев, Н.К. Качалос, А.А. Колобов. – М.: Машиностроение, 1978.
44. Гамбат-Курек, Л.И. Экономика инженерных решений в машиностроении [Текст] / Л.И. Гамбат-Курек. - М.: Машиностроение, 1986.
45. Справочник директора предприятия [Текст] / Под ред. М.Г.Лапусты. – М.: ИНФРА – М, 1998.
46. Логинов, В.П. Ускорение НТП и повышение эффективности производства [Текст] / В.П. Логинов // Вопросы экономики.–1986.-№10.-С.131.
47. Система технического обслуживания и ремонта оборудования предприятия химической промышленности [Текст].– М.: НИИХИММАШ, 1976.
48. Методика (основные положения) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники [Текст]. - М.: Экономика, 1977.
49. ГОСТ 27.410-87. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность [Текст]. - В части п. 2 введ. ГОСТ 27.301-95.
50. ГОСТ 27.204-83. Надежность в технике. Технологические системы общие требования к методам оценки надежности по параметрам производительности [Текст].
51. Абезгауз, Г.Г. Справочник по вероятностным расчетам [Текст] / Г.Г. Абезгауз. - М.: Воен. изд-во, 1970.
52. Гмошинский, В.Г. Инженерное прогнозирование [Текст] / В.Г. Гмошинский. - М.: Энергоиздат, 1982.
53. Бестужев-Лара, И.В. Контурь грядущего [Текст] / И.В. Бестужев-Лара, О.Н. Писаржевский. - М.: Знание, 1965.

54. Глушков, В.М. О прогнозировании на основе экспертных оценок – Науковедение – прогнозирование – информатика [Текст] / В.М. Глушков. – Киев: Наукова Думка, 1970.
55. Ландау, Л.Д. Квантовая механика [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. Кн.2.-М.: Наука, 1972.
56. Техническая диагностика [Текст]: труды 1 Всесоюзн. совещания по технич. диагностике.-М.: Наука, 1972.
57. Мозгалеvский, А.В. Техническая диагностика [Текст] / А.В. Мозгалеvский, Д.В. Гасканов. - М.: Высш. шк., 1975.
58. Пустыльник, Е.И. Статистические методы анализа и отработки наблюдений [Текст] / Е.И. Пустыльник. - М.: Наука, 1968.
59. Растригин, Л.А. Введение в идентификацию объектов управления [Текст] / Л.А. Растригин, Н.Е. Маджаров. - М.: Энергия, 1977.
60. Ивахненко, А.Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами[Текст] / А.Г. Ивахненко. – Киев: Техника, 1975.
61. Петровский, С. АСУП «Львов» – в действии [Текст] / С. Петровский, А. Земсков. - Радио, 1970.
62. Писаренков, В.Н. Идентификация математических моделей химических реакторов [Текст] / В.Н. Писаренков. - В кн.: Итоги науки и техники. Процессы и аппараты химической технологии. Т.9.-М.: ВИНТИ, 1981.- С. 3-87.
63. Комплексная система управления качеством продукции. [Текст] рекомендации по внедрению и разработке в объединении и на предприятии. - М.: Изд-во стандартов, 1976.
64. Жилинский, И.Б. Оборудование большой единичной производительности в химических производствах и надежность его функционирования [Текст] / И.Б. Жилинский, О.С. Чехов // Жур. ВХО им. Д.И. Менделеева.- 1979. - Т. XXIV, №4. - С. 364-369.
65. Карапетьянц, М.Х. Химическая термодинамика [Текст] / М.Х. Карапетьянц. - М.: Госхимиздат, 1953.
66. Кафаров, В.В. О механизме дробления частиц дисперсной фазы. [Текст] / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов, Э.М. Кольцова, С.Ю. Арутюнов // ДАН СССР.-1982.-Т.64, №2.- С.377-381.
67. Государственные стандарты: указатель (по состоянию на 1.1.01г). Т.1.-М.: Изд-во стандартов, 2001.
68. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. Группа ТОО [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 40с.
69. Меламед, В.Г. Сведение задачи Стефана к системе обыкновенных дифференцированных уравнений [Текст] / В.Г. Меламед // Изв. АН СССР. Сер. Геофизика. – 1958. - №7.
70. Справочник химика. - М. Химия, 1971.
71. Рубинштейн, Л.И. Проблема Стефана [Текст] / Л.И. Рубинштейн. - Рига.: Звайгзне, 1967.

72. Пехович, А.И. Расчеты теплового режима твердых тел [Текст] / А.И. Пехович, В.М. Жидких. - Л.: Энергия, 1976.
73. Никитенко, Н.И. Исследование процессов тепло- и массообмена методом сеток [Текст] / Н.И. Никитенко. - Киев.: Наукова думка, 1978.
74. РД РТМ 26-01-136-81. Надежность изделий и нефтяного машиностроения. Сбор, обработка и прохождение информации [Текст]. – Введ. с 1.07.82.
75. Яременко, О.В. Оценка надежности динамических насосов при проектировании [Текст] / О.В. Яременко, А.И. Шулепова, В.В. Соколова. – М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1978.
76. РТМ 26-09-10-75. Надежность изделий полимерного машиностроения. Численные значения показателей надежности изделий, применяемых в оборудовании для переработки резины [Текст].
77. Номенклатура и укрупненные нормы расхода запасных частей для ремонта химического оборудования [Текст]. Ч.І и Ч.ІІ. М.: НИИХИММАШ, 1977.
78. Шор, Я.Б. Таблица для анализа и контроля надежности [Текст] / Я.Б. Шор, Ф.И. Кузьмин. – М.: Радио, 1968.
79. Глебов, М.Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств [Текст]: учеб. пособие для химико-технологических спец. вузов. - М.: Высш. шк. 1991.
80. Гнеденко, Б.В. Курс теории вероятностей [Текст] / Б.В. Гнеденко. - М.: Наука, 1965.
81. Болотин, В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений [Текст] / В.В. Болотин. - 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Стройиздат, 1982.
82. Болотин, В.В. О прогнозировании надежности и долговечности машин [Текст] / В.В. Болотин. – М.: Машиноведение, - 1977. - №5. – С. 86-93.
83. Обеспечение надежности на этапе проектирования и производства. Экспериментальная оценка серийнопригодности узлов электронной аппаратуры. Методика [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1974.
84. Коррозионная и химическая стойкость материалов [Текст]: справ. /Под ред. Н.А.Доллежала – М.: Машгиз, 1954.
85. Коррозия конструкционных материалов. Газы и неорганические кислоты [Текст]: справ. В 2кн. / Под ред. В.В.Батракова. - М.: Металлургия, 1990.
86. Коррозионная стойкость оборудования химических производств: Способы защиты оборудования от коррозии [Текст]: Справ. руководство / Под ред. В.Б.Строкана, А.М.Сухотина. – Л.: Химия, 1987.
87. Коррозионная стойкость оборудования химических производств: Коррозия под действием хладагентов и рабочих тел [Текст]: справ. руководство / Под ред. А.М. Сухотина, В.М. Беренблит.– Л.: Химия, 1988.
88. Коррозия [Текст]: справ. / К.А. Чендлер, Дж. К. Хадсон, Дж.Р.Степнерс и др.; Под ред. Л.Л. Шрайдера, сокр. пер. с англ. В.С.Синявского. – М.:Металлургия, 1981.

89. Бенз, А., Организация исследований в химической промышленности. Условия, цели, стратегия [Текст] / А. Бенз / пер. с англ. В. Воронина. – М.: Химия, 1974.
90. Берукштис, К.К. Коррозионная устойчивость металлов и металлических покрытий в атмосферных условиях [Текст] / К.К. Берукштис, Г.Б. Кларк. – М.: Наука, 1971.
91. Глазунов, М.П. Методы исследования процессов коррозии [Текст] / М.П. Глазунов. // Обмен опытом в радиопромышленности. – 1984. – Вып.2 – С.20-23.
92. Королев, Ю.В. Защита оборудования от коррозии [Текст] / Ю.В. Королев, В.Е. Путилов. – Л.: Машиностроение, 1973.
93. Краткая химическая энциклопедия [Текст] / Под ред. И.Л. Кунянца. Т.2. – М.: Сов. энциклопедия, 1963.
94. Кульман, А.Г. Общая химия [Текст] / А.Г. Кульман. – М.: Гос. изд-в с.-х. литер, 1961.
95. Некрасов, Б.В. Основы общей химии [Текст] / Б.В. Некрасов. Т.3. – М.: Химия, 1970.
96. Ненинеску, К. Общая химия [Текст] / К. Ненинеску; пер. с рум. – М.: Мир, 1968.
97. Государственные стандарты СССР. Защита от коррозии [Текст]. Т.1. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Издание официальное. – М. Изд-во. Стандартов, 1990.
98. Барташов, Л.В. Техничко-экономический уровень производства: определение, экономическая оценка, анализ [Текст] / Л.В. Барташов. – Киев.: Наукова Думка, 1979.
99. Королева, М.Я. Совершенствование инвестиционной политики в производстве фосфоросодержащих удобрений [Текст] / М.Я. Королева // Сб. НИИТЭХИМ. – 1997. – №8. – С.23.
100. Вопросы математической теории надежности [Текст] / Под ред. Б.В.Гнеденко. – М.: Радио и связь, 1982.
101. Попов, Ю.П. Экспертиза безопасности оборудования химико-технологических производств [Текст] / Ю.П. Попов. – М.: МГАХМ, 1996. – 144с.
102. Шубин, В.С. Надежность оборудования химических производств [Текст] / В.С. Шубин: учеб. пособие. – М.: МИХМ, 1989. – 100с.
103. Пирогов, К.М. Основы надежности текстильных машин [Текст] / К.М. Пирогов, С.А. Егоров: учеб. пособие для вузов. – Иваново: ИГТА, 2004. – 268с.
104. Ахматов, А.С. Молекулярная физика граничного трения [Текст] / Ахматов А.С. – М.: Физматгиз, 1963. – 472с.

Содержание

Введение	3
Глава I. Системный подход к проблеме надежности химико-технологического производства	7
I.1. Основы надежности химико-технологического производства	7
I.1.1. Организация производства и его надежность	7
I.1.2. Основные показатели надежности, рекомендации их выбора	15
I.1.3. Сетевые методы (СПУ) в вопросах изучения и анализа надежности химико-технологических производств	16
Глава II. Математические модели надежности производства	21
II.1. Марковские процессы в описании надежности химико-технологических систем	21
II.2. Основные принципы разработки математической модели надежности химико-технологических процессов.	28
II.2.1. Основы моделирования надежности ХТП	28
II.2.2. Интенсивные ХТП, показатели их надежности	29
II.3. Математические модели надежности химико-технологического оборудования (ХТО).	35
II.3.1. Экономические проблемы и эффективность повышения надежности ХТО	35
II.3.2. Виды отказов, их классификация. (Некоторые вопросы надежности и их анализ)	41
II.3.3. Математическая модель надежности химико-технологического оборудования	49
Глава III. Надежность химико-технологических процессов	54
III.1. Обеспечение надежности ХТП на стадии эксплуатации	54
III.1.1. Сбор и анализ информации об отказах ХТП	54
III.1.2. Обработка информации об отказах ХТП	55
III.1.3. Математическая модель процесса активации-измельчения	60
III.1.4. Постановка проблемы надежности процесса обжига сырья в производстве фосфора	62
III.2. Побочные процессы	67
III.2.1. Причины и механизм процесса агломерации	67
III.2.2. Классификация процесса агломерации	69
III.2.3. Закономерности процесса агломерации	71
III.2.4. Расчет движущей силы процесса агломерации частиц	72
III.2.5. Математическая модель агломерации частиц при ведении ХТП в подвижной и неподвижной средах	74
III.2.6. Методика повышения надежности основного ХТП, осложненного побочным процессом (ПП) агломерации	76
III.3. Процесс кристаллизации и обеспечение его надежности	78
III.3.1. Механизм и закономерности кристаллизации	78

III.3.2. Способы кристаллизации	79
III.3.3 Математическая модель процесса кристаллизации с элементами надежности	81
III.3.4. Закономерности побочного процесса инкрустации	84
III.3.5. Исследование и расчет интенсивности агломерации при ведении процесса кристаллизации из растворов	87
Глава IV. Обеспечение надежности химико-технологического оборудования (ХТО)	90
IV.1. Проблемы повышения надежности ХТО	90
IV.2. Обеспечение надежности ХТО при конструировании	93
IV.3. Надежность ХТО на стадиях изготовления и эксплуатации	114
IV.3.1. Надежность при изготовлении ХТО. Виды отказов при эксплуатации ХТО	114
IV.3.2. Эксплуатационная надежность различных видов химико-технологического оборудования	117
IV.4. Обеспечение надежности химико-технологического оборудования ремонтной службой предприятия	120
IV.4.1. Эффективность ремонтного обслуживания и ее влияния на надежность ХТО	121
IV.4.2. Коррозионный износ и оценка старения элементов ХТО	126
IV.4.3. Общая модель надежности эксплуатации и ремонта ХТО	141
Показатели эксплуатации технических систем	141
Глава V. Основы управления и обеспечения надежности химико-технологических производств	145
V.1. Прогнозирование надежности производства	145
V.2. Диагностика надежности производства	151
V.3. Идентификация надежности производства	156
V.4. Система оценочных показателей надежности химико-технологических производств	161
V.5. Основы разработки комплексной системы управления и обеспечения надежности химико-технологических производств	162
V.5.1. Статистический анализ надежности производства	162
V.5.2. Цели и задачи комплексной системы управления и обеспечения надежности производства (КСУОНП)	167
V.5.3. Основные принципы и функции КСУОНП	168
V.5.4. ТЭО освоения комплексной системы управления технологических производств	172
Приложение I	179
Приложение II	183
Приложение III	187
Список литературы	191
Содержание	197

Афанасьева Татьяна Алексеевна
Блиничев Валерьян Николаевич

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ
НАДЕЖНОСТЬ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Монография

Редактор О.А. Соловьева

Подписано в печать 15.06.2007. Формат 60 x 84 $\frac{1}{16}$. Бумага писчая.

Усл. печ. л. . Уч.-изд.л., . Тираж 200 экз. Заказ

ГОУ ВПО «Ивановский государственный химико-технологический
университет»

Отпечатано на полиграфическом оборудовании кафедры экономики и
финансов ГОУВПО «ИГХТ»

153000, г. Иваново, пр. Ф. Энгельса, 7