

солеосодержания в незамерзшем объеме осадка и, как следствие, коагуляция коллоидов с высвобождением части структурированной и физически связанной воды. Образованию крупных флокулов из частиц осадка предшествует изменение электрокинетического потенциала осадка. Электрокинетический потенциал оттаявшего осадка составляет -6 мВ. Замораживание с большой скоростью движения фронта льда приводит к захвату быстрорастущими кристаллами зон воды с повышенным солеосодержанием и частиц осадка. При этом локального повышения концентрации солей не происходит, осадок при размораживании представляет собой более однородную мелкозернистую структуру, неотличимую при визуальном осмотре от исходного осадка.

Опыты с замораживанием осадка позволили определить оптимальные режимы замораживания при скорости движения льда, соответствующей температурам $-5 \div -10$ °С. Количество высвобождаемой в этом режиме свободной воды максимально. На практике поддержание оптимальной скорости замораживания следует проводить за счет высоты разового налива (по формуле 3) и/или формирования из ранее замершего осадка термоизолирующего слоя.

Выводы

1. Осадок ГСВ является слабоструктурированной биокolloидной дисперсной системой с высоким содержанием воды. Влажность осадка в среднем составляет 97%. Средний размер частиц твердой фазы составляет 3 мкм, основное количество частиц имеет диаметр от 1 до 5 мкм. Форма частиц приближается к сферической, фактор формы равен 0,62. Электрокинетический потенциал осадка составил -30 мВ. Статическое напряжение сдвига равно 0,4 Па.
2. Осадок влажностью более 91% является псевдопластическим телом, осадок с влажностью менее 91% – вязкопластичным. Зависимость между концентрацией сухого вещества в сброженном осадке и динамическим напряжением сдвига выражается формулой: $\tau_{\text{дин}} = 6 \cdot 10^{-6} \cdot C^{3,815}$.
3. Максимальное количество свободной воды образуется при скоростях замораживания 1 – 2 мм/час. Оттаявший осадок характеризуется минимальным удельным сопротивлением фильтрации $3 \cdot 10^{10}$ см/г и максимальной скоростью капиллярного всасывания 115 см/час. Электрокинетический потенциал оттаявшего осадка составил -8 мВ.

Литература

1. Технический справочник по обработке воды. Degremont. Т. 2. С-Петербург: «Новый журнал», 2007.
2. Туровский И.С. Осадки сточных вод. Обезвоживание и обеззараживание. М: «ДеЛи принт», 2008.
3. Веригина Е.Л., Козлов М.Н., Данилович Д.А. Площадки естественной сушки// Материалы Межд. научн. конф. IWA, 2006, с.65-72.

Изменение эффективности работы химического оборудования в процессе эксплуатации

К.т.н. А.А.Топоров, д.т.н., проф. А.С.Парфенюк
Донецкий национальный технический университет
mahp@feht.dgtu.donetsk.ua

Аннотация. Рассмотрены закономерности изменения эффективности работы химического оборудования на различных стадиях его жизненного цикла.

Ключевые слова: химическое оборудование, жизненный цикл технического объекта, эксплуатация, эффективность.

Введение

Современное химическое производство имеет длительный жизненный цикл, обладает большой мощностью и интенсивными режимами эксплуатации. В основу такого производства положены химико-технологические системы (ХТС), которым присущи сложные технологические процессы с высокой производительностью оборудования, длинными технологическими цепочками и сложными устройствами контроля и управления. Развитие таких производств связано с необходимостью улучшения множества взаимосвязанных, показателей: производительности, надежности, безопасности, экологичности, эффективности и т.п.

Одним из основных показателей работы оборудования является комплексный показатель, который учитывает производительность оборудования, качество производимой продукции и показывает, с какими затратами достигается результат [1]. Традиционно повышению эффективности работы оборудования уделяют особое внимание на стадии проектирования. Но при этом зачастую не учитывают, что на протяжении всего времени эксплуатации оборудование, его технические характеристики, изменяются по целому ряду причин. Это вызвано тем, что оборудование химических производств подвергается самым разнообразным и трудно учитываемым повреждающим воздействиям, вызванным сложными и тяжелыми условиями работы, высокими и низкими температурами, вакуумом и давлением, нестабильностью протекания технологических процессов, токсичными, пожаро- и взрывоопасными средами, высокой степенью агрессивности рабочей и окружающей среды.

Основная часть

Оборудование химических производств имеет ряд особенностей, которые во многом определяют специфику изменения его технического состояния [2].

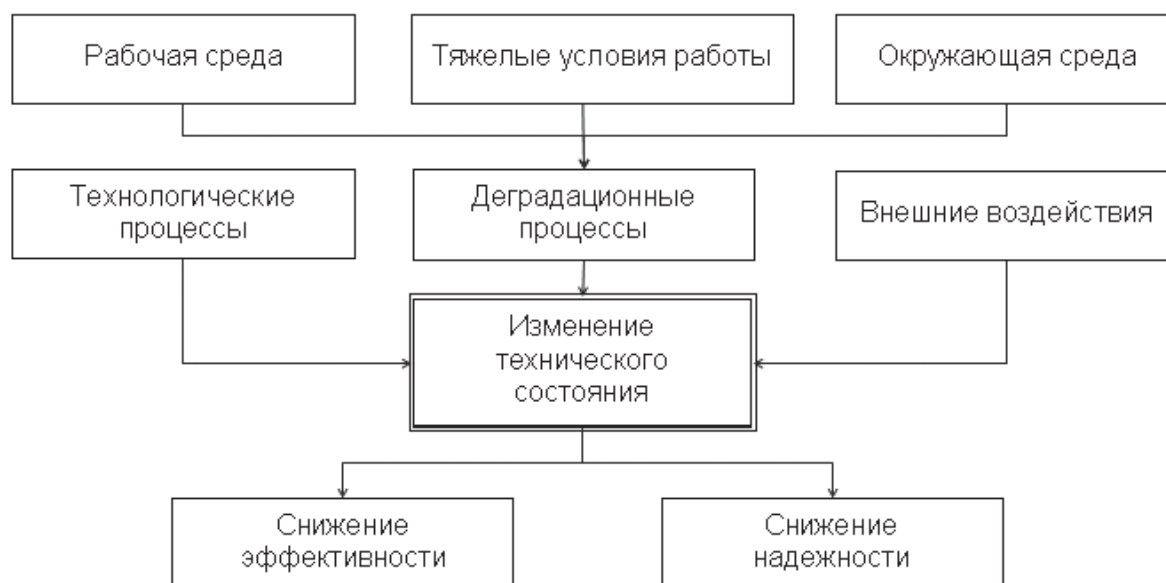


Рисунок 1. Причины и последствия изменения технического состояния химического оборудования

Известно [2], что технологическое оборудование химических производств служит для переработки рабочих сред, которые могут быть энергонасыщенными, токсичными, находиться в различных агрегатных состояниях и могут изменять их, являясь коррозионно-активными. Свойства рабочих сред во многом определяют воздействия на оборудование.

Условия и режимы работы оборудования приводят к возникновению целого ряда деграционных процессов: коррозии, износу узлов трения, появлению отложений, накипи, закоксовыванию, изменению механических, структурных и теплофизических свойств конструкционных материалов и т.п. При определенных условиях деграционные процессы приводят к необратимым изменениям оборудования.

Весь комплекс воздействий ведет к изменению технического состояния оборудования, что выражается в изменении геометрических размеров деталей, шероховатости поверхности, появлении и развитии микро- и макродефектов, старении материалов – и в итоге приводит к снижению надежности оборудования и его эффективности (см. рисунок 1).

Вышеперечисленное дает основание считать необходимым не только выполнение классических проектных расчетов, включающих выбор конструкционных материалов, учет штатных нагрузок, разработку мероприятий по обеспечению прочности, герметичности, надежности, но учет аварийных нагрузок, возможности возникновения и развития различных сценариев аварийных ситуаций, изменения свойств конструкционных материалов под действием температур, давлений и пр.

Изменение технического состояния оборудования в процессе эксплуатации является неизбежным негативным явлением, ведущим к снижению надежности и эффективности и требует обязательного учета при проектировании. Для этого предлагается рассматривать оборудование в контексте его жизненного цикла – совокупности процессов, выполняемых от момента выявления потребностей общества в определенной продукции до момента удовлетворения этих потребностей и утилизации продукта [2]. Жизненный цикл включает период от возникновения потребности в создании объекта до его ликвидации. Основные стадии [2]: проектирование, производство, эксплуатация, утилизация.

В качестве конкретного примера, иллюстрирующего методический подход к оценке эффективности технического объекта, предлагается рассмотреть наиболее общий элемент конструкции химической аппаратуры – цилиндрическую обечайку корпусов аппаратов, магистральных и технологических трубопроводов, емкостей для жидких и газообразных сред, трубчатки в теплообменных аппаратах.

Основные процессы, протекающие в рассматриваемом элементе следующие:

- движение потоков «жидкость - жидкость», «жидкость - газ» с заданными температурами и давлениями;
- непосредственное взаимодействие потоков или контактирование с промежуточной стенкой;
- охлаждение или нагрев рабочих или вспомогательных сред путем протекания теплопередачи;
- организация движения потоков рабочих и вспомогательных сред путем создания давления определенной величины, необходимой для преодоления гидравлического сопротивления элементов.

В общем виде критерии функционирования обечайки представлены в виде условий ограничений по размерам, температурам, давлениям:

$$\begin{aligned} S_{MIN} > S_{ОТБ} , \\ \Delta t_{CP} > [\Delta t_{CP}] , \\ \Delta P_{CP} > [\Delta P_{CP}] . \end{aligned}$$

Приведенные условия учитывают напряженно-деформированное состояние обечайки исходя из условия прочности (толщина стенки не должна быть меньше допустимой), из условия обеспечения процессов теплопередачи (температура не должна превышать предельную) и условия обеспечения течения потоков (гидравлическое сопротивление не должно превышать предельное).

Одной из наиболее распространенных причин изменений параметров функционирования обечайки в процессе эксплуатации является постепенное накопление различного типа повреждений и возникновение дефектов [3, 4]. Одним из наиболее распространенных типов повреждений является коррозионно-эрозионный износ, воздействие которого учитывается при выборе номинальной толщины стенки. При этом начальная толщина стенки уменьшает-

ся, приближаясь к минимально допустимой. Другой тип повреждения связан с ухудшением механических характеристик материала и, как следствие, снижением допускаемых напряжений. Оба типа повреждения приводят к постепенному уменьшению допустимого внутреннего давления в обечайке. Допустимое давление не должно опускаться ниже рабочего.

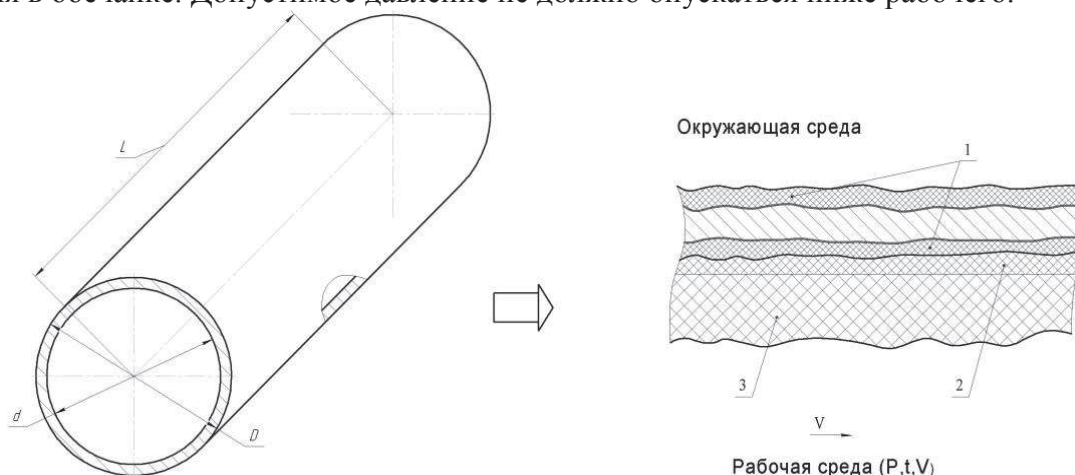


Рисунок 2. Фрагмент обечайки, подверженный деградационным процессам: 1 – зоны протекания коррозионных процессов; 2 – зона протекания эрозионных процессов; 3 – зона образования отложений

При детальном рассмотрении условие эксплуатации выводится из условия прочности, учитывающее толщину стенки [5]:

$$S_{MIN} \geq S_{ОТБ} ,$$

где S_{MIN} – минимальная толщина стенки, м;

$S_{ОТБ}$ – отбраковочная толщина стенки, м.

Определяющим при оценке остаточного ресурса из условия прочности является расчет обечайки под внутренним давлением. Эксплуатация обечайки считается возможной, если фактическая толщина стенки всех элементов превышает отбраковочную. При определении отбраковочной толщины стенки оценивается несущая способность элементов в целом, в отличие от проверочного расчета, когда определяется напряжение в наиболее опасной зоне.

$$S_{ОТБ} = \frac{n \cdot P \cdot \alpha \cdot D_H}{2(R_1 + n \cdot R)} ; \text{ при } \frac{R_2^H \cdot m_3}{R_1^H \cdot m_2} \geq 0.75 ;$$

$$S_{ОТБ} = \frac{n \cdot P \cdot \alpha \cdot D_H}{2(0.9 \cdot R_2^H \cdot m_3 + n \cdot R)} ; \text{ при } \frac{R_2^H \cdot m_3}{R_1^H \cdot m_2} < 0.75 ,$$

где $S_{ОТБ}$ – толщина стенки обечайки, при которой запрещается эксплуатация, м;

P – рабочее давление в обечайке, МПа;

D_H – наружный диаметр элемента обечайки, м;

n – коэффициент перегрузки рабочего давления в обечайке;

R_1^H – нормативное сопротивление, равное наименьшему значению временного сопротивления разрыву материала обечайки, принимаемое по ГОСТ или ТУ; МПа;

R_2^H – нормативное сопротивление, равное наименьшему значению предела текучести при растяжении, сжатии и изгибе материала стенок, принимаемое по ГОСТ или ТУ, МПа;

α – коэффициент несущей способности, $\alpha = 1$ для труб, конических переходов, выпуклых заглушек эллиптической формы; для отводов гладких и сварных; для отводов трубы радиусом R к наружному диаметру D .

Все расчеты ведутся с учетом случайного характера многих величин, и, следовательно имеют вероятностный характер. Расчет остаточного ресурса обечайки по минимальной толщине стенок труб. Среднеквадратическое отклонение измеряемой толщины:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (S_K - S_{CP})^2},$$

$$S_{CP} = \frac{\sum_{i=40}^N S_K}{N},$$

где N – число участков замера (если $N < 10$, то σ не вычисляют, т.к. точность ее оценки при этом недостаточна);

S_K – значение замеренной толщины;

S_{CP} – среднее значение замеренной толщины.

Минимальную толщину стенки с учетом неконтролируемых участков поверхности определяют для доверительной вероятности 95% применительно ко всем промышленным химическим объектам:

$$S_{MIN} = S_{CP} - 2 \cdot \sigma.$$

При необходимости более точной оценки остаточной толщины стенки на каком-либо участке число измерений N увеличивают, имея в виду, что уменьшение ошибки контроля пропорционально \sqrt{N} .

Средняя скорость коррозии стенки элемента обечайки определяется по формуле:

$$V_{CP} = \frac{S_K - S_{MIN}}{\tau},$$

где τ – время эксплуатации, лет.

Остаточный ресурс объекта определяется по формуле [6, 8]:

$$\tau = \frac{S_{MIN} - S_{ОТБ}}{V_{CP}}.$$

Следует отметить, что определение остаточного ресурса по коррозионно-эрозионному износу толщин стенок элементов химического оборудования является главным, но не единственным критерием оценки работоспособности. Рассмотрим критерии, благодаря которым возможно оценить или прогнозировать ресурс работы оборудования химико-технологических комплексов.

В теплообменном оборудовании (кожухотрубчатые теплообменники) существенным фактором, влияющим на условия эксплуатации, является термическое сопротивление стенок. Термическое сопротивление слоев коррозионных процессов и отложений сложно измерить. Учесть данный фактор возможно только косвенно. Одним из параметров, которые возможно измерить, является температура. Температура рабочей среды является технологическим параметром, который измеряется во многих химических процессах на входе и выходе из оборудования. Тогда эксплуатация химического оборудования из температурного условия:

$\Delta t_{CP} \in [\Delta t_{CP}]$ – для теплообменного оборудования.

Допускаемые $[\Delta t_{CP}]$ должны иметь верхнюю и нижнюю границу для различных условий работы, исходя из заданных параметров технологического процесса.

Средняя разность температур определяется следующим образом [9, 10]:

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{\ln(\Delta t_B / \Delta t_M)},$$

где $\Delta t_B \Delta t_M$ – большая и меньшая разности температур на концах оборудования.

Значение величина Δt_{CP} имеет границы, при которых эксплуатация химического оборудования возможна. Для разных видов оборудования, рабочих сред, условий эксплуатации, длительности использования оборудования, технологических условий протекания процессов доверительный интервал будет иметь различную величину.

В главном уравнении теплопередачи [9, 10]:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t_{CP},$$

где Q – тепловой поток (расход передаваемой теплоты), Вт;

k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м² К);

Δt_{CP} – средняя разность температур горячего и холодного теплоносителей, К.

Коэффициент теплопередачи определяется следующим образом, исходя из образованных отложений:

$$k = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_{BH} \cdot d_{BH}} + \sum \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_{НАР}}{d_{BH}} + \frac{1}{\alpha_{НАР} \cdot d_{НАР}} + \sum \frac{r_{ОТЛ}}{d_{ОТЛ}}}.$$

Тепловая проводимость отложений на стенках зависит от рода теплоносителя, его температуры и скорости, а также от материала стенки, температуры нагревающей среды. Точные данные, касающиеся толщин отложений, можно получить только диагностическим путем, измерением приборами неразрушающего контроля. Проведение измерений термических сопротивлений отложений возможно только экспериментальным путем. При уменьшении коэффициента теплопередачи средняя разность температур будет увеличиваться.

Преобразовав главное уравнение теплопередачи, получим:

$$\Delta t_{CP} = \frac{Q}{k \cdot F}.$$

Данные формулы можно применить для тех случаев, когда значения коэффициента теплопередачи для теплоносителей можно считать постоянными. Для общего случая определение поверхности теплопередачи выполняют по дифференциальному уравнению методом интегрирования.

Скорость изменения рабочей средней температуры горячего и холодного теплоносителей определяется по формуле:

$$V_{CP.T} = \frac{\Delta t_{CP} - [\Delta t_{CP}]}{\tau},$$

где τ – время эксплуатации, лет.

Это условие справедливо, если не принимать во внимание фазы работы, когда температура может значительно отличаться от рабочей, а именно в процессе ввода и вывода оборудования из эксплуатации.

Остаточный ресурс объекта определяется по формуле:

$$\tau_T = \frac{\Delta t_{CP} - [\Delta t_{CP}]}{V_{CP.T}}.$$

Также одним из критериев работоспособности химического оборудования может являться изменение его условие гидравлического течения потоков. Эксплуатация элементов химического оборудования из условия гидравлического течения потоков:

$$\Delta P_{CP} \gg [\Delta P_{CP}].$$

В основе оценки остаточного ресурса из условия обеспечения гидравлического течения потоков является определение изменений гидравлического сопротивления обечаек. Гидравлическое сопротивление является технологическим параметром, который измеряется во мно-

гих химических процессах на входе и выходе из оборудования. В общем случае ΔP_{CP} вычисляется по формуле:

$$\Delta P_{CP} = \Delta P_{СК} + \Delta P_{ТР} + \Delta P_{М.С.} + \Delta P_{ПОД} + \Delta P_{ДОП},$$

где $\Delta P_{СК}$ – потери давления на создание скорости потока на выходе из системы; $\Delta P_{ТР}$ – потери давления на преодоление сопротивления трения, $\Delta P_{М.С.}$ – потери давления на преодоление местных сопротивлений; $\Delta P_{ПОД}$ – потери давления на подъем жидкости. $\Delta P_{ДОП}$ – разность давления в пространстве нагнетания и в пространстве всасывания.

Вышеуказанные величины имеют постоянную величину, кроме $\Delta P_{ТР}$, которая изменяет свое значение после образования и накопления отложений.

Формула определения мощности подающего насосного оборудования $\Delta P_{ТР}$ входит как составляющая ΔP_{CP} [10]:

$$N = \frac{V \cdot \Delta P_{CP}}{1000 \cdot \eta}.$$

где V – объемный расход жидкости, м³/с; ΔP_{CP} – повышение давления, которое сообщается насосом перекачиваемому рабочему потоку. ΔP_{CP} равно полному гидравлическому сопротивлению системы трубопроводов и химического оборудования

$$V = \omega \cdot f,$$

где f – площадь поперечного сечения потока, м²;

ω – скорость истечения жидкости, м/с.

Выразив из формулы определения мощности гидравлическое сопротивление системы, получим:

$$\Delta P_{CP} = \frac{N \cdot 1000 \cdot \eta}{V}.$$

Для получения ресурса работы по критерию образования отложений и увеличения сопротивления системы во времени можно предложить следующую зависимость:


$$\tau_T = \frac{\Delta P_{CP} - [\Delta P_{CP}]}{V_{CP, \Delta P}}.$$

Как правило, деградационные процессы протекают по нелинейной модели [11]

$$\delta = a \cdot \tau^M,$$

где a – параметр, определяющийся из условий работы; M – определяется из экспериментальных исследований.

В дальнейшем будем полагать, что параметр a имеет нормальное распределение. При $M=1$ деградационный процесс происходит с постоянной скоростью a , при $M>1$ ускоряется при эксплуатации, при $M<1$ – замедляется. В этом случае общее условие работоспособности элементов химического оборудования будет иметь вид:

$S_{MIN} \rangle S_{ОТБ}$		$S_{MIN} \rangle (S_{ОТБ} - 2 \cdot \sigma) \cdot \tau^M$
$\Delta t_{CP} \rangle [\Delta t_{CP}]$		$\Delta t_{CP} \rangle F([\Delta t_{CP}]) (\tau^M)$
$\Delta P_{CP} \rangle [\Delta P_{CP}]$		$\Delta P_{CP} \rangle F([\Delta P_{CP}]) (\tau^M)$

Таким образом, приведенная методика позволяет оценивать эффективность обечаек как одного из наиболее распространенных элементов химической аппаратуры по трем критериям функционирования – в виде условий ограничений по размерам (толщине стенки), температу-

рам, давлениям. При этом учитывается изменение технического состояния по причине коррозионно-эрозионного износа и применяется допущение, что деградиационные процессы протекают по нелинейной модели.

Выводы

1. Эффективность и надежность технологического оборудования химических производств зависит от его технического состояния, которое в процессе неизбежно изменяется.

2. Эффективность и надежность технологического оборудования химических производств необходимо рассматривать в контексте его жизненного цикла.

3. При прогнозировании эффективности работы технологического оборудования необходимо на протяжении его жизненного цикла учитывать не только его структуру, но и комплекс протекающих производственных процессов (технологических, деградиационных, ремонтно-восстановительных), рабочие среды, влияние человека, что возможно на основе системного подхода.

4. Так как свойства всех составляющих системы оборудования, процессов, рабочих сред являются вероятностными величинами, то необходима разработка соответствующих вероятностных моделей.

5. Предложенная методика позволяет определить остаточный ресурс на основе критериев работоспособности. Для обечаек, в которых протекают такие деградиационные процессы, как коррозия, образование отложений, теплопередача через многослойную стенку, предложено использовать три критерия работоспособности. Эта методика позволяет установить влияние технологических и деградиационных процессов на ресурс оборудования.

Литература

1. Афанасьева Т.А., Блиничев В.Н. Надежность химико-технологических производств. - Иваново: ИГХТУ, 2006, с.144
2. Топоров А.А., Третьяков П.В., Алексеева О.Е., Акусова А.А., Боровлев В.Н. Информационное обеспечение жизненного цикла оборудования химических производств на этапе эксплуатации. Захист металургійних машин від поломок: Міжвузівський тематичний збірник наукових праць. – Маріуполь, 2012 – С.29-33
3. Генералов М.Б. Машины и аппараты химических и нефтехимических производств. Т. IV-12, -М: Машиностроение, 2004 832 с.
4. Топоров А.А. Новый подход к анализу техногенно опасных ситуаций на технологических производствах // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Хімія і хімічна технологія. Випуск 95. Донецьк:ТОВ «Лебідь», 2005. С. 126-130.
5. Топоров А.А., Боровлев В.Н., Третьяков П.В. Изменение расчетных схем элементов оборудования в процессе эксплуатации// Машиностроение и техносфера: XVII Международной научно-технической конференции. Т3. Донецк 2010.-с.169-174
6. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. М.:Машиностроение,1990, 448с.
7. Бородавкин П.Л., Березин В.Л. Сооружение магистральных трубопроводов: Учебник для вузов- М: Недра,1987 с.350.
8. ОСТ 153-39.4-010-2002 Методика определения остаточного ресурса нефтегазопромысловых трубопроводов и трубопроводов головных сооружений.
9. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. - М., 2005. – 753 с.
10. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов – В 2-х книгах: Часть 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. -М.: Химия, 1995.-400 с.
11. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем – М.: Издательство «Мир» пер. с англ. под ред. Ушакова И.А. – 1980, 605 с.