

---

---

# СНИЖЕНИЕ РИСКОВ И ЛИКВИДАЦИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

---

---

## ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ПО ОПТИМИЗАЦИИ НАДЕЖНОСТИ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

**А. А. Климантов. Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет).**

**А. В. Вагин, кандидат технических наук. Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

В сложившихся условиях генеральной линией производственно-экономической деятельности различного рода нефтеперерабатывающих компаний и концернов становится реконструкция и расширение существующих складов и баз нефтепродуктов, в то же время необходимость экономии выделяемых ассигнований требует оптимизации технологических решений при условии выполнения требований по промышленной безопасности. В этой связи возникает необходимость применения более совершенного технологического оборудования, систем обнаружения утечек и пожаротушения, а также других средств обеспечения безопасности технологических процессов.

Одними из наиболее значимых и наиболее дорогостоящих элементов технологического оборудования складов и баз нефтепродуктов, входящих в состав резервуарных парков, являются стальные вертикальные резервуары (РВС), количество и объем которых, с одной стороны, обеспечивают вместимость склада, с другой – от них зависит надежность и, соответственно, безопасность. Следовательно, возникает необходимость в создании методов оптимизации показателей качества резервуара, таких как вместимость резервуара и его надежность, с учетом требований промышленной безопасности и условий функционирования склада [1].

Для реализации поставленной задачи необходим алгоритм оптимизации, концептуально учитывающий:

- динамику надежности резервуара в зависимости от прочностных свойств материала и конструкции, а также условия эксплуатации для прогноза количества отказавших резервуаров;

- стоимостные параметры, зависящие от количественного и качественного состава резервуарных парков, систем обнаружения утечек и пожаротушения;

- требования промышленной безопасности к резервуарным паркам, выступающие в качестве ограничения [2].

Наиболее предпочтительным в настоящее время критерием оптимизации являются затраты на реконструкцию резервуарных парков, при этом, чем больше вместимость РВС

тем меньше их требуется для обеспечения требуемой вместимости складов, соответственно меньше элементов в системе обнаружения утечек и пожаротушения и ниже затраты на строительство. С другой стороны, как показывает опыт эксплуатации, увеличение вместимости РВС, приводит к снижению уровня его надежности и, как следствие, к существенному повышению возможного ущерба в случае аварии.

Таким образом, возможна постановка оптимизационной задачи на основе теории систем, по аналогии с которыми возможно рассмотреть совместно систему, состоящую из средств хранения, то есть РВС, и систему обнаружения утечек и пожаротушения.

Сформируем доминирующие задачи и критерии оптимизации для обоснования количества и основных показателей качества РВС, системы обеспечения безопасности хранения, стоимостные показатели и условия эксплуатации резервуаров (таблица ).

Таблица. Структура системной оптимизации количества и уровня качества резервуаров

Уровень системы	Элемент системы	Доминирующая задача	Критерий оптимизации	Оптимизируемый показатель
1	Склад	Хранение и прием-выдача нефтепродуктов в условиях регионального (географического) размещения склада	Затраты на реконструкцию склада (базы) в целом	Параметры технической системы обеспечения безопасности хранения
2	Резервуарный парк	Технологический безаварийный процесс хранения и внутрискладских перекачек нефтепродуктов	Затраты на строительство или реконструкцию резервуарного парка склада	Количественный состав резервуарного парка
3	Резервуар	Безопасное хранение конкретного нефтепродукта с учетом технического состояния РВС	Затраты на строительство и эксплуатацию резервуара	Вместимость и надежность РВС

В ряде публикаций в различных источниках приведены результаты анализа исследований эксплуатации РВС и их технического состояния. В принципе эту информацию целесообразно представлять в виде блоков:

- физико-географические условия эксплуатации резервуара;
- прочностные параметры материала и конструкции резервуара;
- интенсивность нагрузки резервуара в виде количества рабочих циклов;
- периодичность и уровень обслуживания и ремонта резервуара (ТОР);
- результаты обследования технического состояния резервуара.

Часть этой информации остается неизменной на протяжении всего жизненного цикла РВС, другая часть информации периодически пополняется и обновляется. Постоянной является информация, представленная массивами «прочностные параметры» и «физико-географические условия», а обновляемая представлена массивами «интенсивность нагрузки», «результаты обследования» и «уровень ТОР». На рис. 1 приведена схема, иллюстрирующая процесс накопления информации о состоянии РВС.



**Рис. 1. Схема потока информации для прогноза технического состояния резервуара**

В основу метода прогноза состояния резервуара должен быть положен поиск интегрального результата «взаимодействия», сформированного в ходе производства РВС уровня его надежности с функциональной средой; при этом создание ситуационных вариантов эксплуатации резервуара необходимо осуществлять на основе стохастических моделей. Наиболее приемлемой может быть стохастическая модель динамики надежности резервуара, учитывающая запас прочности сборочных единиц и деталей, с одной стороны, и разрушающие процессы, обусловленные условиями его эксплуатации, с другой.

Реализация такой модели невозможна без опорного уровня надежности, обеспечивающего техническую информацию по прочностным параметрам конструкции резервуара и меры его приспособленности к условиям эксплуатации.

Общая структура формирования опорного уровня надежности резервуара приведена на рис. 2, а порядок действий принят следующим:

- анализ сборочных единиц резервуара, лимитирующих надежность всего резервуара;
- синтез сборочных единиц в единую компоновочную схему;
- оценка безотказности и долговечности синтезированной схемы на основе конструкционных и технологических параметров и их взаимодействия с окружающей средой.

В дальнейшем принимаем порядок прогнозирования, предусматривающий системный подход «деталь – сборочная единица – резервуар», при этом принимаем, что соединение деталей по структурной схеме надежности для резервуара – последовательное.



Рис. 2. Структура формирования опорного уровня надежности резервуара

До настоящего времени предпринимались попытки представить и описать надежность РВС как функцию времени, однако, как правило, в этих моделях отсутствовал системный подход, который крайне необходим вследствие весьма разнородной информации об отказах РВС, зависящих от проектных решений, качества материала, технологии строительства резервуара, условий эксплуатации. Кроме того, высокая размерность прогнозных моделей, различный их характер приводил к результатам, обладающим низкой степенью адекватности реальным процессам.

Вследствие этого, опираясь на анализ существующих работ и прогнозных моделей, оценку уровня надежности будем проводить на основе статистических данных прочностных характеристик конструкционных материалов, геометрических параметров и нагрузок, действующих на элементы конструкции резервуара, условия эксплуатации и технологию производства. Вследствие этого, будем различать эксплуатационные нагрузки, действующие на конструкцию  $S$  и несущую способность конструкции по прочности  $R$ .

Другим важным для дальнейших рассуждений допущением примем условие, что внезапные и постепенные отказы деталей – события независимые, а соединение деталей по структурной схеме надежности для резервуара последовательное.

Эти допущения позволяют представить вероятность безотказной работы резервуара в виде произведения вероятностей безотказной работы относительно внезапных и постепенных отказов для последовательно соединенных деталей сборочных единиц, определяющих уровень надежности резервуара в целом [4–6],

$$P_{\Phi}(t) = \prod_1^N P_{iB}(t)P_{iП}(t),$$

где  $P_{iB}(t)$  – вероятность безотказной работы резервуара относительно внезапных отказов деталей;  $P_{iП}(t)$  – вероятность безотказной работы резервуара относительно постепенных отказов деталей;  $N$  – количество деталей, определяющих надежность резервуара.

Внезапные отказы резервуара наиболее вероятны в начальный период эксплуатации, что связано с причинами технологического порядка на уровне качества резервуарных сталей, строительства резервуара, особенно сварки швов, то есть существует некоторый уровень «технологической неопределенности», который уменьшается с течением времени из-за постепенных проявлений скрытых производственных дефектов.

Таким образом, для прогноза вероятности безотказной работы резервуара относительно внезапных отказов применима основанная по принципу «технологической неопределенности» модель типа «обобщенная нагрузка – несущая способность» [4], которая в принципе оценивает перекрытие площадей, ограничиваемых кривыми функций распределения таких вероятностных величин, как несущая способность  $R$  и обобщенная нагрузка  $S$ . Следовательно, вероятность безотказной работы относительно внезапных отказов будет равна разности

$$P_0(t) = \text{Вер}(R-S). \quad (1)$$

Поскольку обе величины характеризуются математическим ожиданием и среднеквадратичным отклонением, выражение (1) возможно формализовать более подробно, предусмотрев формализацию уровня «технологической неопределенности» введением среднего квадратичного отклонения, как функции времени, следующей математической зависимостью

$$\begin{aligned} \text{Вер}(R < S) = & \frac{1}{4} \left[ \Phi\left(\frac{S+n\sigma_S - S}{\sigma_S}\right) - \Phi\left(\frac{R+m\sigma_R(t) - S}{\sigma_S}\right) \right] * \\ & * \left[ \Phi\left(\frac{S+n\sigma_S - R}{\sigma_R(t)}\right) - \Phi\left(\frac{R-m\sigma_R(t) - R}{\sigma_R(t)}\right) \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где  $S, \sigma_S$  – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение обобщенной нагрузки,  $H$ ;  $R, \sigma_R(t)$  – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение несущей способности,  $H$ ;  $\Phi(z)$  – функция Лапласа;  $m, n$  – кратность средних квадратических отклонений, принимаемых в зависимости от допустимой погрешности.

Снижение «технологической неопределенности» возможно формализовать за счет введения функциональной зависимости среднеквадратического отклонения несущей способности  $\sigma_R(t)$  от времени функционирования резервуара в виде

$$\sigma_R(t) = \sigma_{R0} e^{-t_\phi / k_{ВД} T_p},$$

где  $\sigma_{R0}$  – среднеквадратическое отклонение в начальный момент функционирования резервуара;  $t_\phi$  – время функционирования резервуара;  $T_p$  – среднестатистическое время проявления скрытых производственных дефектов в материале и конструкции резервуара;  $K_{ВД}$  – коэффициент полноты проявления дефектов.

Конечный вид зависимости (2) после алгебраических преобразований будет следующим

$$P_B(t) = 1 - \frac{1}{4} \left[ \Phi(n) - \Phi\left(\frac{R_{\min} - S}{\sigma_S}\right) \right] \left[ \Phi(m) - \Phi\left(\frac{R - S_{\max}}{\sigma_R(t)}\right) \right],$$

где  $R_{\min}$  – минимальное ожидаемое значение несущей способности;  $S_{\max}$  – максимальное ожидаемое значение обобщенной нагрузки.

Результаты обследования технического состояния металлических резервуаров показывают, что основной причиной нарушения прочности является интенсивный коррозионный износ и цикловая усталость. Таким образом, вероятность безотказной работы

относительно постепенных отказов вертикальных стальных резервуаров необходимо оценивать в зависимости от коррозионных и усталостных процессов.

Приняв события отказа по этим причинам независимыми, будем рассчитывать вероятность безотказной работы относительно постепенных отказов деталей резервуара по формуле

$$P_{\text{фн}}(t) = \sum_{i=1}^N P_{ik}(t)P(t)_{\text{уст}},$$

где  $P_k(t)$  – вероятность безотказной работы относительно коррозионных процессов;  $P(t)_{\text{уст}}$  – вероятность безотказной работы относительно усталостных разрушений.

В силу многообразия равнозначных факторов, действующих в процессе эксплуатации, на основании центральной предельной теоремы можно утверждать, что наработка при коррозионных отказах процессов подчиняется нормальному закону распределения с математическим ожиданием, равным нулю, и дисперсией  $\sigma^2$ , вследствие чего можно утверждать, что вероятность безотказной работы будет равна следующему выражению

$$P_k(t) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \Phi \left( \frac{\mu_{\text{пи}} - \alpha_i t}{\sigma_i t} \right) \right],$$

где  $\alpha_i$  – средняя скорость процесса коррозии стенок резервуара;  $\mu_{\text{пи}}$  – предельное значение толщины стенок, обеспечивающее «прочность» детали (сборочной единицы) резервуара;  $t$  – период функционирования резервуара.

Усталостные разрушения в деталях и сборочных единицах резервуара возникают в результате появления микротрещин в материале стенок, швах, днище и крыши при знакопеременных нагрузках циклического характера. Вероятность безотказной работы относительно усталостных отказов описана логарифмически нормальным законом

$$P(t)_{\text{уст}} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \Phi \left( \frac{\ln T^{\text{нп}}_{\text{уст}} - \ln t}{\sigma_{\ln} t} \right) \right],$$

где  $T^{\text{нп}}_{\text{уст}}$  – предельное значение (гарантированное) времени эксплуатации резервуара;  $\sigma_{\ln}$  – среднеквадратическое отклонение;  $t$  – период функционирования резервуара.

Приведенные выше модели позволяют прогнозировать надежность деталей и сборочных единиц резервуаров, но для этого необходимо установить перечень деталей, определяющих надежность резервуара в целом, установить прочностные и предельно допустимые параметры этих деталей, их динамику в зависимости от условий эксплуатации и технологии строительства резервуара.

Таким образом, в соответствии с принятой концепцией прогноз надежности резервуара может быть решен только с помощью системной теории, в рамках которой резервуар рассматривается как построенная техническая система, состоящая из совокупности сборочных единиц и деталей, взаимодействующих с окружающей средой в цикловом режиме нагрузок.

### Литература

1. Швырков С. А., Семиков В. Л., Швырков А. Н. Анализ статистических данных разрушений резервуаров // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. – 1996. – Вып. 5. – С. 39–50.
2. Кондрашова О. Г., Назарова М. Н. Причинно-следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров // Нефтегазовое дело. – М., – 2004.
3. Котляревский В. А., Шаталов А. А., Ханухов Х. М. Безопасность резервуаров и трубопроводов. – М., 2000. – 552 с.

4. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М., 2000. – 480 с.
5. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. – М., 1965. – 333 с.
6. Хенли Э. Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска / Пер. с англ. – М., 1984. – 528 с.
7. Федеральный закон от 21.07.97 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».
8. СНиП 2.11.03-93. Склады нефти и нефтепродуктов. Противопожарные нормы.

