

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ НАДЕЖНОСТИ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

А. С. Поляков, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ. Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России.

**Б. С. Квашнин, доктор технических наук, профессор.
Научно-исследовательский центр 25 ГосНИИ МО РФ.**

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

Одним из основных направлений деятельности нефтеперерабатывающих компаний и концернов на современном этапе становится реконструкция и расширение существующих складов хранения нефтепродуктов. Постановка оптимизационной задачи возможна на основе теории систем, где будем рассматривать трех уровневую систему, состоящую из резервуаров, устройств обнаружения утечек и пожаротушения. Авторы формируют доминирующие задачи и критерии оптимизации для обоснования количества и основных показателей качества РВС, системы обеспечения безопасности хранения с учетом стоимостных показателей и условий эксплуатации резервуаров.

Ключевые слова: оптимизация вместимости резервуарных парков

OPTIMIZATION CONCEPT BASIS OF TANKS RELIABILITY FOR PETROLEUM IN VIEW OF INDUSTRIAL SAFETY REQUIREMENTS

A. S. Polyakov, B. S. Kvashnin, A. A. Klimantov

One of the basic directions of activity of the oil refining companies and concerns at the present stage becomes reconstruction and expansion of existing warehouses of storage of mineral oil. Statement optimization problems is possible on the basis of the theory of systems where we shall consider three level the system consisting of tanks, devices of detection of outflow and fire extinguishing. Authors form dominating problems and criteria of optimization for a substantiation of quantity and the basic parameters of quality of tanks vertical steel, systems of a safety of storage in view of cost indexes and conditions of operation of tanks.

Key words: optimization of capacity parks of reservoirs

Одним из основных направлений деятельности нефтеперерабатывающих компаний и концернов на современном этапе становится реконструкция и расширение существующих складов (баз) хранения нефтепродуктов.

В этой связи следует напомнить, что построенные и строящиеся резервуарные парки соответствуют требованиям ранее действовавших СНиП II-106-79 или сегодня действующих СНиП 2.11.03-93 [1], согласно которым системы пожаротушения могут быть стационарными или с использованием передвижной пожарной техники, и совсем не предусмотрены системы обнаружения утечек нефтепродуктов. Поэтому ранее задачи оптимизации вместимости резервуарных парков и отдельных резервуаров решались без учета потребности в этих системах. Многолетний опыт эксплуатации показал острую необходимость в пересмотре такого взгляда.

В сложившихся условиях в целях экономии выделяемых ассигнований возникает необходимость оптимизации вместимости резервуарных парков с учетом применения современных систем обнаружения утечек и пожаротушения, а также других средств обеспечения безопасности технологических процессов.

Учитывая, что наиболее дорогостоящим элементом технологического оборудования являются стальные вертикальные резервуары (РВС), количество и объем которых, с одной стороны, обеспечивают расчетную вместимость склада, с другой – от них зависит надежность и, соответственно, техногенная безопасность, алгоритм оптимизации должен концептуально учитывать:

- динамику надежности резервуара в зависимости от прочностных свойств материала и конструкции, а также условий эксплуатации;

- 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, 3].

Таким образом, постановка оптимизационной задачи возможна на основе теории систем, где будем рассматривать трех уровневую систему, состоящую из резервуаров, устройств обнаружения утечек и пожаротушения.

Сформируем доминирующие задачи и критерии оптимизации для обоснования количества и основных показателей качества РВС, системы обеспечения безопасности хранения с учетом стоимостных показателей и условий эксплуатации резервуаров, которые представлены в таблице.

Таблица. Структура системной оптимизации количества и уровня качества резервуаров

Уровень системы	Элемент системы	Доминирующая задача	Критерий оптимизации	Показатель оптимизации
1	Склад (база)	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 перекачки нефтепродуктов внутри склада	Затраты на строительство резервуарного парка склада, включая затраты на систему обнаружения утечек и пожаротушения	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

Несмотря на определенный прогресс, достигнутый в последние годы в строительстве резервуаров, РВС остаются одними из наиболее опасных объектов по целому ряду причин, характерными из которых являются:

- высокая взрывопожарная опасность хранимых нефтепродуктов;
- крупные размеры конструкций и связанная с этим протяженность сварных швов, которые трудно проконтролировать по всей длине;
- несовершенства геометрической формы, неравномерные просадки оснований;
- большие перемещения стенок в зонах геометрических искажений проектной формы;
- малоцикловая усталость отдельных зон стенки конструкции;
- сложный характер нагружения конструкции в зоне уторного шва в сочетании с практическим отсутствием контроля сплошности сварных соединений [2–4].

Известную информацию о результатах анализа эксплуатации РВС и их технического состояния целесообразно представлять в виде блоков, учитывающих:

- 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.

В основу метода прогноза состояния резервуара должен быть положен поиск интегрального результата «взаимодействия» уровня надежности РВС, сформированного в ходе его производства, с функциональной средой, при котором 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 мерах его приспособленности к условиям эксплуатации.

Возможна постановка оптимизационной задачи по целевой функции, в виде суммарных затрат на строительство вертикальных резервуаров, создание систем обнаружения утечек и пожаротушения, а также с учетом ущерба в результате осуществления расчетного варианта аварии, с ограничением в виде заданного значения показателя техногенной безопасности склада (как правило, величиной техногенного или иного вида риска).

С учетом этого стоимостная целевая функция оптимизации вместимости резервуаров примет следующий вид:

$$Z = Z_{y\partial} W_c^* + Z_{np1} n_c + \Pi_A \rightarrow \min,$$

$$K_{жс}^{**} = \varphi[M_1(Z_1), M_2(Z_2), M_3(Z_3)],$$

где $Z_{y\partial}$ – удельные (на 1 м³) затраты на строительство (реконструкцию) и эксплуатацию РВС вместимостью V_{pi} для резервуарного парка, где должен содержаться нефтепродукт объемом W_c^* ; Z_{np1} – стоимость одного модуля систем обнаружения утечек и пожаротушения и его монтаж Z_2 ; Π_A – возможный ущерб от аварий; $K_{жс}^{**}$ – заданное значение показателя безопасности склада.

Поскольку определяющим параметром в представленном методе является вместимость резервуара, то от нее будут производными удельные затраты на строительство и эксплуатацию, его надежность, количество основных и резервных резервуаров, а также систем обнаружения утечек и пожаротушения.

Алгоритм метода оптимизации вместимости резервуара можно представить в следующей последовательности:

1. Уточняется состав проектируемого резервуарного парка и вместимость V_{pi} резервуара, месторасположение склада нефтепродуктов, определяющее физико-географические и климатические условия эксплуатации резервуаров, а также интенсивность использования резервуара в напряженных режимах слива-налива нефтепродуктов.

2. Формируется блок исходных данных, необходимых для использования прогнозной модели надежности и расчета интенсивности отказов (λ) для резервуара выбранной вместимости V_{pi} .

3. Определяется количество (m_{oi}) основных резервуаров в резервуарном парке склада для конкретной вместимости V_{pi} резервуара.

4. Определяется количество (m_{pi}) резервных резервуаров с учетом интенсивности отказов (λ) резервуара вместимости V_{pi} .

5. Подсчитываются затраты Z_i на строительство ($m_{oi} + m_{pi}$) резервуаров, а также на приобретение и монтаж системы обнаружения утечек и пожаротушения согласно рассчитанному варианту, при этом определяющую роль играет вместимость V_{pi} резервуара.

6. Рассматриваем сценарии наиболее вероятной и опасной ситуаций с расчетом количества нефтепродуктов, участвующих в них.

7. Рассчитываем потери нефтепродуктов и косвенный ущерб в результате аварии, зная общее количество ($m_{oi} + m_{pi}$) резервуаров на складе и рассматриваемую вместимость резервуара V_{pi} на данном шаге перебора параметрического ряда вместимостей резервуаров.

Оптимизационный характер поиска варианта вместимости резервуара заключается в том, что варьированием V_{pi} находим вариант, при котором затраты Z_1 на строительство ($m_{oi} + m_{pi}$) резервуаров, приобретение и монтаж системы обнаружения утечек и пожаротушения Z_2 , согласно рассчитанному варианту, а также возможный ущерб в результате аварии в сумме должны быть минимальны для всего перебора параметрического ряда вместимостей РВС.

Отдельными, наиболее сложными и трудоемкими этапами, являются определение интенсивности отказа и расчет удельных затрат Z_{yoi} на строительство и эксплуатацию резервуара в зависимости от его вместимости.

На этапе прогноза надежности резервуара необходимо осуществить:

– анализ сборочных единиц резервуара, лимитирующих надежность всего резервуара, на основе результатов подконтрольной эксплуатации, актов испытаний и проверок технического состояния, анализа ремонтного фонда и отчетов по НИОКР;

– составление структурной схемы надежности из сборочных единиц и деталей резервуара, которые обеспечивают опорный уровень его надежности.

После этого количественно определяют:

– прочностные характеристики сборочных единиц и деталей, предельные размеры и скорость разрушающих процессов;

– минимальное ожидаемое значение несущей способности R_{\min} ;

– максимальное ожидаемое значение обобщенной нагрузки S_{\max} .

Далее, рассчитывают вероятность безотказной работы резервуара относительно внезапных отказов с помощью модели:

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

где S, σ_S – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение обобщенной нагрузки на детали и сборочные единицы резервуара; $R, \sigma_R(t)$ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение несущей способности деталей и сборочных единиц резервуара; $\Phi(z)$ – функция Лапласа; m, n – кратность среднеквадратических отклонений, принимаемых в зависимости от допустимой погрешности.

При этом предварительно определяют среднеквадратическое отклонение несущей способности $\sigma_R(t)$ по формуле:

$$\sigma_R(t) = \sigma_{R0} e^{-tu / K_{IP} T_P},$$

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

После этого определяют среднюю скорость процесса коррозии стенок резервуара или процесса осадки основания; предельное значение толщины стенок или осадки основания, обеспечивающее «прочность» сборочной единицы резервуара, а также период функционирования резервуара, и по формуле:

$$P_{u,k}(t) = \frac{1}{2} [1 + \Phi(\frac{\mu_{\Pi i} - \alpha_i t}{\sigma_i t})] \quad (1)$$

рассчитывают вероятность безотказной работы сборочной единицы резервуара относительно коррозионных процессов и неравномерной осадки основания. В уравнении (1) приняты обозначения: α_i – средняя скорость процесса коррозии стенок резервуара; $\mu_{\Pi i}$ – предельное значение толщины стенок, обеспечивающее «прочность» детали (сборочной единицы) резервуара; t – период функционирования резервуара,

Устанавливают предельное число знакопеременных циклов наполнения и опорожнения резервуара; период одного цикла; требуемый ресурс для резервуара; коэффициент запаса и определяют значение величины T^{np}_{ycm} по усталостной кривой или с использованием коэффициента запаса, если спектр нагрузок находится ниже предела выносливости, по зависимости:

$$T^{np}_{ycm} = n_{np} Q = n_S T_{np}.$$

После этого вычисляют вероятность безотказной работы для каждой сборочной единицы относительно усталостных отказов согласно зависимости:

$$P(t)_{ycm} = \frac{1}{2} [1 + \Phi(\frac{\ln n_{np} Q - \ln t}{\sigma_{\ln t})}],$$

где T^{np}_{yc} – предельное значение (гарантированное) времени эксплуатации резервуара; σ_{\ln} – среднеквадратическое отклонение; t – период функционирования резервуара.

Далее рассчитывают общую вероятность безотказной работы для всех k сборочных единиц резервуара по формуле:

$$P_{\phi\Gamma}(t) = \sum_{i=1}^k P_k(t) P(t)_{ycm} P_U(t).$$

После этого из формулы:

$$\lambda_0 = - \frac{\ln P(t)}{nt - \frac{(n-1)t^2}{2T_p}}$$

определяют интенсивность отказов λ_0 резервуара в целом.

Таким образом, данный алгоритм позволяет определять оптимальную вместимость РВС при строительстве или реконструкции резервуарного парка с учетом ряда факторов: надежности конструкции, наличия систем обнаружения утечек нефтепродуктов и пожаротушения, параметров промышленной безопасности, влияния окружающей среды, стоимостных показателей.

Литература

1. СНиП 2.11.03-93. Склады нефти и нефтепродуктов. Противопожарные нормы.
2. 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.

3. Кондрашова О. Г., Назарова М. Н. Причинно-следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров // Нефтегазовое дело. – М., 2004.
4. Котляревский В. А., Шаталов А. А., Ханухов Х. М. Безопасность резервуаров и трубопроводов. Экономика и информатика. – М., 2000.