

## НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПРЕДПРИЯТИЙ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Н. А. Бородина, инж. (Государственный дорожный научно-исследовательский институт им. Н. П. Шульгина)*

*Аналізуються експлуатаційні аспекти надійності системи очищення стічних вод підприємств гальванічного виробництва, метою яких є запобігання загрози забруднення навколишнього середовища токсичними металами, що містяться у стічних водах. Пропонується модель оцінки надійності системи очищення стічних вод, яка дозволяє виконати ризик-аналіз і установити нормативні вимоги безпеки до апаратної частини системи.*

**Постановка проблемы.** Вопросы надежности потенциально опасных для окружающей среды систем сегодня включаются в число приоритетных государственных задач. Это социально-экономическая проблема, к которой постоянно привлекается внимание всего общества. Исследование надежности систем позволяет оценить экологическую опасность промышленных предприятий, разработать стратегию работ по снижению их экологического риска и определить величину возможного ущерба. Следует подчеркнуть, что многие нормативные документы [1–3], которыми определяется экологический риск, не могут применяться на практике, если предварительно не исследована надежность системы, обеспечивающей экологическую безопасность. Действительно, вероятность возникновения неблагоприятного события (или группы событий), приводящего к ущербу, определяется вероятностью реализации случайных факторов, формирующих условия возникновения неблагоприятного события. Общую формулу определения риска можно представить в виде

$$R = p_f \cdot E(D), \quad (1)$$

где  $p_f$  – вероятность события  $D$ , вызвавшего ущерб;  $E(D)$  – функция, выражающая в денежном выражении затраты, вызванные событием  $D$ .

Очевидно, что именно исследование надежности системы, потенциально опасной для окружающей среды, есть элементом риск-анализа, позволяющего не только количественно оценить возможный ущерб, но, что не менее важно, выработать реалистические требования к безопасности системы, установить критерии сбалансированного риска.

Сегодня в Украине имеется много предприятий, функционирование которых связано с риском загрязнения окружающей среды. Среди них заметное место занимают предприятия гальванического производства, экологическая

опасность которых обусловлена необходимостью сброса сточных вод, содержащих химические вещества I–IV классов токсичности.

На основе выполненного анализа факторов угроз [4], было определено, что несанкционированный сброс сточных вод (или превышение его нормативов) с участков нанесения химического покрытия, приводящий к загрязнению окружающей среды, может произойти в результате:

- нарушения целостности водоотводящих и очистных сооружений;
- нарушения технологического режима очистки;
- ошибки обслуживающего персонала.

Поэтому риск загрязнения окружающей среды сточными водами с участков нанесения химического покрытия будет определяться вероятностью сбоя системы автоматизированной подачи реагентов и вероятностью аварий, происшедших в результате ошибки обслуживающего персонала.

В настоящей работе предлагается модель оценки вероятности нарушения технологического режима очистки сточных вод с участков нанесения химического покрытия, включающая вероятность как отказа системы, так и ошибок персонала.

**Формулировка задачи.** Рассматривается наиболее распространенный на предприятиях Украины метод очистки – реагентный. Процесс обезвреживания сточных вод этим методом основывается на разделении циансодержащего, хромсодержащего и кислотно-щелочного стоков. Обезвреживание циансодержащих и хромсодержащих стоков происходит в двух параллельных линиях накопителей-реакторов. Еще одна линия предназначена для нейтрализации кислотно-щелочных стоков и взаимной нейтрализации объединенных стоков. Процесс имеет циклический характер.

В технологическом процессе имеется пять химических реагентов, нейтрализующих сточные воды. На линии каждого из реагентов имеется дозатор электромагнитного действия (Д). В реакторах и на выходе шламоотстойника установлены контрольные приборы, измеряющие кислотность и электролитическую плотность сточных вод. Обобщенная принципиальная схема очистки сточных вод показана на рис. 1.

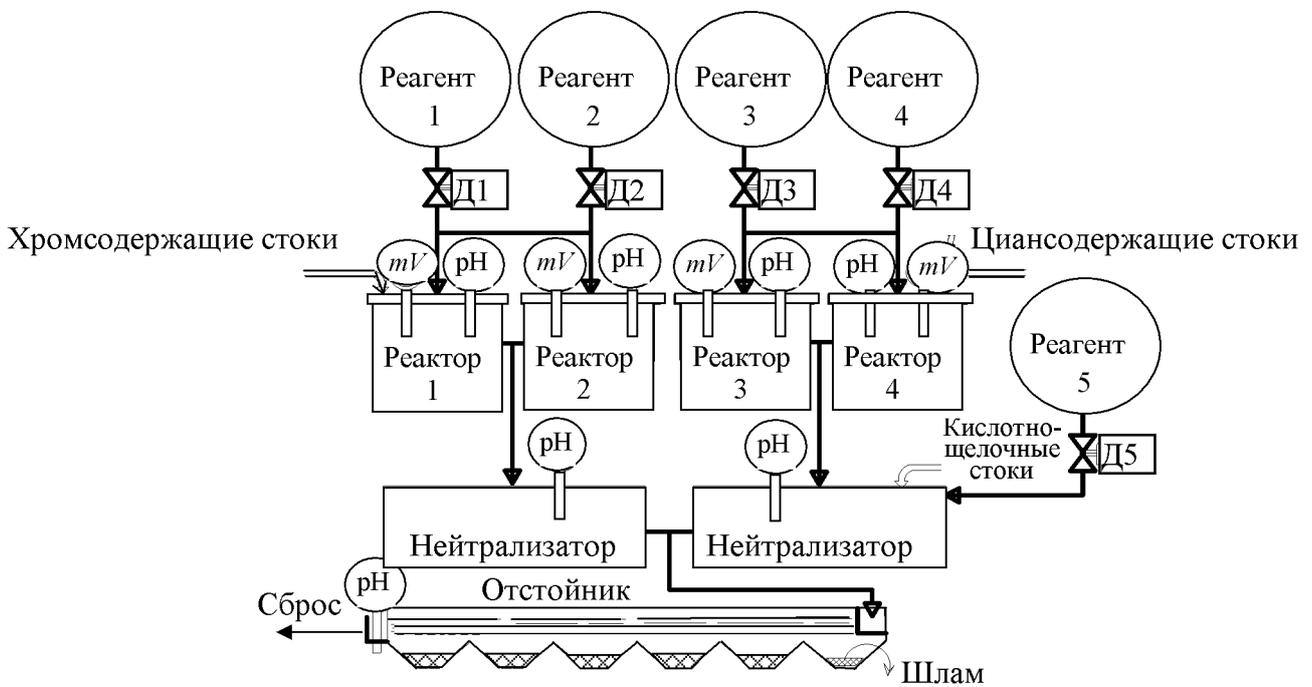


Рис. 1. Принципиальная схема реагентной очистки сточных вод гальванического производства

Здесь с позиции надежности рассматривается такой сценарий угрозы загрязнения сточных вод (неполной нейтрализации): происходит отказ одного из дозаторов нейтрализующих реагентов при одновременном отказе контрольно-измерительного устройства или прибора (К) для измерения уровня концентрации загрязняющих веществ. Идеальная принципиальная схема обеспечения безотказной работы системы очистки показана на рис. 2.

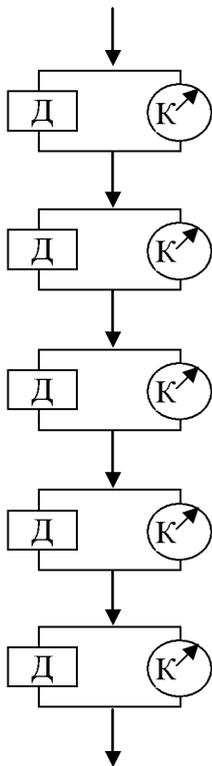


Рис. 2. Схема модели надежности функционирования системы очистки сточных вод

На схеме представлены элементы системы, обеспечивающие ее безопасное функционирование, то есть не допускающие неполной нейтрализации сточных вод. При этом рассматриваются две угрозы безопасности системы: нарушение технологического режима и ошибки обслуживающего персонала. Угроза нарушения целостности отстойников является предметом особого рассмотрения.

Надежность определим в классическом смысле [5] – как свойство системы выполнять свои функции, сохраняя эксплуатационные показатели в течение требуемого времени. Числовым параметром надежности есть вероятность безотказной работы системы  $P_f$ , которая связана с противоположным свойством – ненадежностью или отказом – очевидной зависимостью

$$P_f = 1 - p_f, \quad (2)$$

где  $p_f$  – вероятность отказа. Обобщенная задача исследования состоит в поиске надежности системы очистки в заданный период времени

$$p(t) = P(S < S_d), \quad (3)$$

где  $S$  – максимально допустимое значение функции надежности;  $S_d$  – значение функции надежности в заданный период времени.

Закон надежности примем в экспоненциальной форме

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – интенсивность отказов.

**Надежность нейтрализации одним реагентом.** Модель надежности представим в виде системы с резервированием. Введение в схему функционирования устройств контроля уровня загрязняющих веществ (см. рис. 1) позволяет представить каждую надежную линию очистки в виде двух параллельных элементов с заданными вероятностями отказа (см. рис. 2). Будем называть блоком безопасности два параллельно работающих устройства на линии одного реагента:

устройство Д – дозатор, управляемый электромагнитным пускателем;

устройство К – контрольно-измерительный прибор непрерывного действия.

Эта обобщенная идеальная схема включает в себя также вероятность ошибки персонала. Такое допущение принято в связи с тем, что отказ дозатора обычно сопровождается световым и звуковым сигналом на пульте оператора. С другой стороны, показания контрольно-измерительных приборов также выводятся на пульт оператора. Таким образом, нейтрализация сточных вод одним компонентом не происходит только в случае одновременного отказа устройств Д и К и ошибки персонала.

Введем возможные состояния одного блока безопасности:

$S_1$  – исправны оба устройства Д и К;

$S_2$  – исправно устройство Д, отказало устройство К;

$S_3$  – исправно устройство К, отказало устройство Д;

$S_4$  – неисправны оба устройства Д и К – отказ системы безопасности.

Представим функционирование блока безопасности в виде дискретного марковского процесса с непрерывным временем [6]. Рассматривается марковская цепь, представляющая собой поток последовательных событий с одинаково распределенными промежутками времени. Блок может находиться последовательно в состояниях  $S_1, S_2, S_3, S_4$  в соответствии с графом процесса, показанном на рис. 3. Переходы из одного дискретного состояния в другое осуществляются в моменты времени  $t_1, t_2, t_3, t_4$  и характеризуются постоянными (не зависящими от времени) интенсивностями отказов  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  ( $\lambda_1 > \lambda_2$ ). Ставится задача найти переходные вероятности состояний  $p_1(t), p_2(t), p_3(t), p_4(t)$ , которыми и определяется надежность блока.

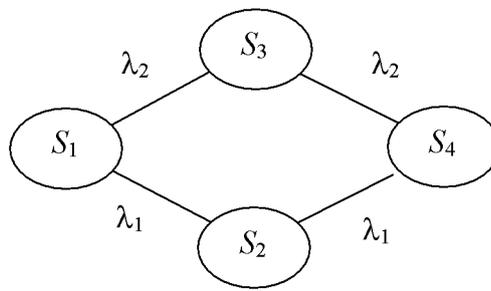


Рис. 3. Граф функционирования блока безопасности

Искомые переходные вероятности марковской цепи определяются решением системы дифференциальных уравнений Колмогорова, которые в общем случае имеют вид

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = \sum \lambda_{ij} \cdot p_{ij}(t), \quad i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

К этим уравнениям присоединяются начальные условия  $p_{ij}(0) = \delta_{ij}$ , где  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера. Кроме того, в решении системы дифференциальных уравнений используется нормировочное условие

$$\sum_{i=1}^n p_i(t) = 1, \quad (6)$$

являющееся следствием того, что события цепи Маркова несовместные и образуют полную группу. Имеем

$$\begin{aligned} \frac{dp_1(t)}{dt} &= -(\lambda_1 + \lambda_2) p_1(t); \\ \frac{dp_2(t)}{dt} &= -(\lambda_2 p_2(t) - \lambda_2 p_1(t)); \\ \frac{dp_3(t)}{dt} &= -(\lambda_{34} p_3(t) - \lambda_{23} p_1(t)). \end{aligned} \quad (7)$$

Система уравнений (7) решается при начальных условиях

$$t=0 \quad p_1(t) = 1; \quad p_2(t) = p_3(t) = 0. \quad (8)$$

Уравнения (6) образуют рекуррентную систему, ее решение строится весьма просто, начиная с верхнего уравнения. К тому же мы сократили систему на одно уравнение, используя нормировочное условие

$$p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) + p_4(t) = 1. \quad (9)$$

Получим:

$$p_1(t) = \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2) t]; \quad (10)$$

$$p_2(t) = k \cdot \exp[-\lambda_2 t] - k \cdot \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2) t]; \quad (11)$$

$$p_3(t) = \exp[-\lambda_2 t] - \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2) t]. \quad (12)$$

Абсолютная вероятность безотказной работы блока безопасности определяется как сумма переходных вероятностей соответствующих рабочих состояний

$$P(t) = \sum_1^3 P_i(t) = (1+k)\exp[-\lambda_2 t] - k\exp[-(\lambda_1 + \lambda_2)t]. \quad (13)$$

Здесь  $k = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$  – соотношение интенсивностей отказов.

**Надежность системы очистки сточных вод.** В соответствии с принятой схемой (см. рис. 2) надежная система в целом представляется как пять блоков безопасности, соединенных последовательно.

### Выводы

Предлагаемая модель оценки надежности функционирования системы очистки представляет собой составную часть риск-анализа и позволяет прогнозировать вероятные материальные потери, вызванные отказами оборудования и ошибками персонала. Модель дает возможность установить вероятностные критерии надежности оборудования, выработать нормативные требования к аппаратной части системы. Модель может применяться как для оценки риска загрязнения окружающей среды существующими предприятиями, так и при проектировании автоматизированной системы очистки сточных вод промышленных предприятий.

1. *Методика розрахунку розмірів відшкодування збитків, які заподіяні державі в результаті наднормативних викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря / Затверджена наказом Міністерства охорони навколишнього природного середовища та ядерної безпеки України від 18.05.95 № 38 // Довідник з питань економіки та фінансування природокористування і природної діяльності. – К.: Геопринт, 2000. – С. 199–211.*

2. *Методика визначення розмірів шкоди, зумовленої забрудненням і засміченням земельних ресурсів через порушення природоохоронного законодавства / Затверджена наказом Міністерства охорони навколишнього природного середовища та ядерної безпеки України від 27.10.97 № 171 // Довідник з питань економіки та фінансування природокористування і природної діяльності. – К.: Геопринт, 2000. – С. 168–194.*

3. *Методика розрахунку розмірів відшкодування збитків, заподіяних державі внаслідок порушення законодавства про охорону та раціональне використання водних ресурсів / Затверджена наказом Міністерства охорони навколишнього природного середовища та ядерної безпеки України від 18.05.95 № 37 // Довідник з питань економіки та фінансування природокористування і природної діяльності. – К.: Геопринт, 2000. – С. 147–167.*

4. *Бородин Н. А. Оценка опасности загрязнения окружающей природной среды при образовании, хранении и утилизации гальванических шламов// Труды міжнародної науково-технічної конференції “Екологія промислових підприємств. Проблеми утилізації відходів” (13–17 вересня 2004 р., м. Ялта). – К.: Знання. – 2004 – С. 11–13.*

5. *ГОСТ 27.410-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 10 с.*

6. *Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М.: Высшая школа, 2000. – 383 с.*