

УДК 621.039.5

**ОПТИМИЗАЦИЯ СТОХАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОРРОЗИОННОГО  
РАЗРУШЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ БАРЬЕРОВ В МОРСКОЙ СРЕДЕ  
ДЛЯ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ ИХ СОСТОЯНИЯ  
И ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ**

© 2019 г. А. А. Саркисов<sup>1</sup>, В. А. Сотников<sup>1, \*</sup>, С. В. Антипов<sup>1</sup>,  
М. Н. Кобринский<sup>1</sup>, В. П. Биладенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного  
развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН), Москва, Россия*

*\*e-mail: vasotnikov@mail.ru*

Поступила в редакцию 04.07.2019 г.

После доработки 08.08.2019 г.

Принята к публикации 12.08.2019 г.

Модель деградации защитных барьеров в морской среде [1, 2], учитывающая стохастическую природу питтинговой коррозии, оптимизирована для ситуационного анализа состояния объекта и имитационного моделирования технических решений. Численные расчеты проводятся методом Монте-Карло с помощью программного комплекса в клиент-серверной архитектуре с применением аппарата хранимых процедур и функций интерактивной аналитической обработки данных. В результате удастся значительно сократить затраты вычислительных ресурсов на каждый численный эксперимент. Проведена оценка времени разгерметизации, скорости поступления радионуклидов в морскую воду и их изотопный состав из энергетической установки затонувшей атомной подводной лодки Б-159 в предположении, что в момент аварии возникли деформации на трубопроводе первого контура, ускорившие питтинговую и общую коррозию.

*Ключевые слова:* затопленные объекты, защитный барьер, коррозионное разрушение, стохастическая модель, питтинговая коррозия, метод Монте-Карло, клиент-серверная архитектура, хранимые процедуры, функции OLAP

**DOI:** 10.1134/S0002331019040125

## ВВЕДЕНИЕ

В [1, 2] разработана математическая модель коррозионного разрушения защитных барьеров ядерных и радиационно опасных объектов в морской среде и ее компьютерная реализация. Основное назначение модели – оперативный анализ безопасности и прогноз возможного воздействия на окружающую среду в аварийных ситуациях. Для оценки времени полного разрушения и нарушения герметичности объекта в модели строится его представление в виде ориентированного взвешенного графа [1]. Каждый узел графа соответствует одному защитному барьеру, каждое ребро указывает последовательность разрушения барьеров; вес ребра определяет время полного разрушения барьера. В [2] особое внимание уделено стохастической природе питтинговой коррозии, которая моделируется процессом случайного блуждания с непрерывным временем. Построенная модель позволила получить достаточно надежные оценки времени разгерметизации объектов морского базирования и установить доверительные интер-

валы для этих оценок. В качестве примера в [2] приведен расчёт и обработка результатов для затопленного контейнера с твердыми радиоактивными отходами, имеющего всего один защитный барьер.

В [2] отмечалось, что аналогичные расчеты со стохастическим моделированием питтинговой коррозии могут быть проведены и для сложных объектов с множеством защитных барьеров, но при этом возрастает необходимое для получения надежных оценок количество численных экспериментов. Возрастает и объем вычислений в каждом эксперименте: каждый узел графа представления объекта может быть наделен индивидуальными свойствами случайной составляющей питтинговой коррозии и индивидуальным шагом дискретизации случайной и регулярной составляющих. Наиболее затратным по времени расчета оказывается генерация случайных чисел, определяющих на каждом шаге расчета скорости питтинговой коррозии для каждого барьера, контактирующего с внешней средой. Кроме того, построение минимального остовного графа при постоянных скоростях коррозии в [1] проводилось только один раз, тогда как в стохастической модели минимальный остовный граф может меняться не только в каждом эксперименте, но и в ходе отдельного эксперимента при значительном стохастическом разбросе скоростей коррозии. По оценке, проведение 1000 экспериментов с типичным объектом на изолированном персональном компьютере потребует до 5 дней. В таком виде расчетная схема окажется непригодной для оперативного анализа. Настоящая работа посвящена оптимизации процесса моделирования для сокращения времени расчета без снижения качества результатов.

## ХРАНИМЫЕ ПРОЦЕДУРЫ

Программная реализация модели [1] была построена в клиент-серверной архитектуре, но ресурсы сервера использовались лишь для хранения справочной информации: скоростей коррозии материалов, применяемых в защитных барьерах, свойствах радионуклидов, других характеристик объектов и районов их расположения. Все расчеты в [1] проводились на стороне клиента.

Значительное сокращение времени расчетов может быть достигнуто путем применения хранимых на сервере процедур за счет использования в них высокопроизводительных алгоритмов, входящих в стандартное программное обеспечение современных систем управления базами данных. В данной работе в качестве сервера баз данных использовался *Microsoft® SQL Server 2017 Express Edition*. Компиляция любой хранимой процедуры и создание плана ее выполнения производится при первом обращении к процедуре, так что все последующие обращения выполняются быстрее.

Для генерации случайных скоростей коррозии с нормальным законом распределения в базе данных создается вспомогательная таблица, содержащая квантили функции нормального распределения  $\Phi(x)$  с математическим ожиданием и стандартным отклонением равными 0 и 1, соответственно, с шагом  $10^{-4}$ , умноженные на  $10^4$  и округленные до целых чисел. Такая точность вполне достаточна для использования в рассматриваемой модели, поскольку неопределенность в законах распределения скоростей коррозии значительно выше. Генерация выборки из  $n$  случайных чисел из нормально распределенной последовательности сводится к созданию вспомогательной таблицы из  $n$  случайных целых чисел в диапазоне  $0-10^4$  и объединению этой таблицы с таблицей квантилей. Запрос, возвращающий номера строк таблицы квантилей, соответствующих значениям случайных величин из вспомогательной таблицы (то есть значения  $x$ ), образует выборку из нормально распределенной последовательности, а вычисляемый столбец вспомогательной таблицы

$$V_{\text{корр}} = \mu + \bar{x}\sigma,$$

где  $\bar{x}$  – перенормированное на 1 значение  $x$ , будет содержать искомое значение скорости коррозии со средним значением  $\mu$  и стандартным отклонением  $\sigma$ . В дополнение к столбцу  $V_{\text{корр}}$  во вспомогательную таблицу можно добавить столбец с коэффициентами при скорости коррозии, описывающими влияние состояния предшествующих барьеров (сквозная перфорация, полное разрушение) на коррозию последующих барьеров. В такой архитектуре запрос 10 тыс. значений случайных скоростей коррозии занимает до 200 мс, еще 15–20 мс затрачивается на обновление использованных значений.

При генерации случайных последовательностей, которые характеризуют развивающийся во времени процесс с большой длительностью, важно подавить появление автокорреляций в выборке. Наличие автокорреляций может внести фиктивную периодическую компоненту в сгенерированный ряд. Для подавления автокорреляций используется метод двойного перемешивания, в котором последовательность вспомогательных случайных целых чисел выбирается из случайного места в заранее сгенерированном массиве большего размера. Использованные строки массива (или весь массив целиком) очищаются и заменяются новыми случайными числами.

Дальнейшее сокращение времени расчета за счет использования ресурсов сервера основано на применении в хранимых процедурах функций интерактивной аналитической обработки (*OLAP*), позволяющих получить агрегированную информацию на основе массивов данных, структурированных (секционированных и упорядоченных) по многомерному принципу. Одна из функций *OLAP* возвращает сумму нарастающим итогом, что позволяет получить для всего набора данных остаточную толщину барьера для каждого шага расчета  $\Delta t$ , определив тем самым время полного разрушения барьера.

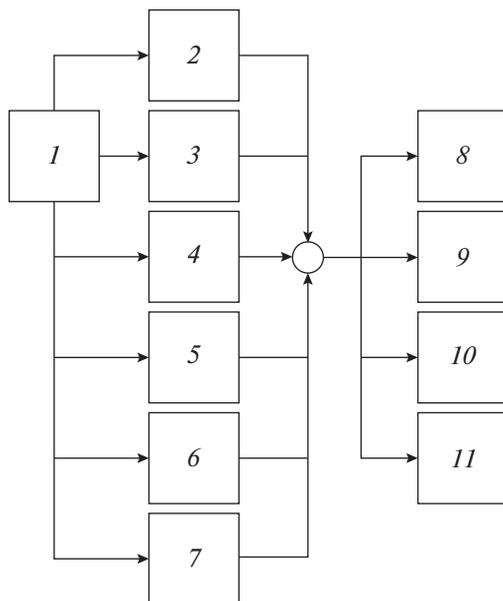
Описанный алгоритм был оформлен в виде хранимой процедуры, вызываемой клиентским приложением. В качестве параметров процедуре передается индекс случайного места в таблице случайных целых чисел, массив коэффициентов при скорости коррозии, математическое ожидание и стандартное отклонение скорости коррозии, толщина барьера.

Другие хранимые процедуры, вошедшие в состав программного комплекса, возвращают наборы данных, сгруппированных на сервере по различным признакам: по видам выходящих радионуклидов, по вкладам различных барьеров в суммарную скорость выхода и т.д. Такие процедуры облегчают визуализацию результатов расчетов в клиентском приложении и также обеспечивают более эффективное использование вычислительных ресурсов.

## РАСЧЕТЫ ДЛЯ Б-159

Результаты расчета времени разгерметизации и разрушения защитных барьеров затопленных объектов, полученные с применением описываемого программного комплекса, оказались сопоставимы с представленными ранее в работе [3]. В качестве исходных данных был использован граф представления объекта на рис. 1.

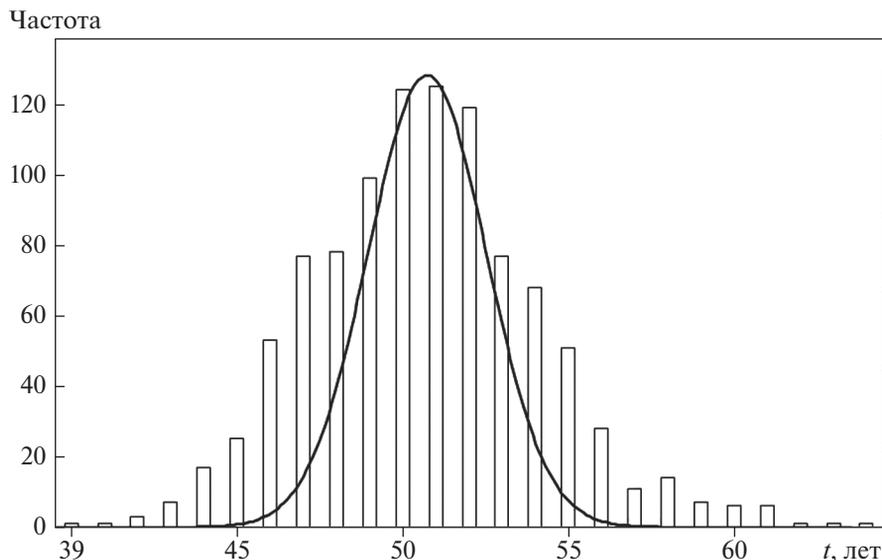
Известно, что у подводной лодки Б-159 в момент аварии после удара о дно кормовая часть легкого корпуса получила значительные повреждения. Можно предположить, что при этом возникли различные деформации и повреждения конструктивных элементов, в том числе трубопровода первого контура, выполненного из нержавеющей стали с толщиной стенки 1 см. При этом скорости коррозионного разрушения могут возрасти в сотни и тысячи раз. В предположении, что скорость питтинговой коррозии составит  $V_{\text{пит}} = 200$ ,  $\sigma_{\text{пит}} = 100$  мкм/год, а общей коррозии  $V_{\text{корр}} = 100$ ,  $\sigma_{\text{корр}} = 50$  мкм/год, разгерметизация может произойти через  $50.7 \pm 3.5$  лет после затопления, то есть к 2055 г. (рис. 2). Скорость поступления радионуклидов в морскую воду составит  $Q \sim 20$  ТБк/г.



**Рис. 1.** Направленный граф коррозионного разрушения защитных барьеров затонувшей атомной подводной лодки Б-159 с отработавшим ядерным топливом: защитные барьеры из углеродистой стали со скоростью общей коррозии  $\sim 46 \pm 9$  мкм/г. и питтинговой коррозии  $\sim 138 \pm 27$  мкм/г.: 1 – легкий корпус толщиной 5 мм; 2 – прочный корпус толщиной 27 мм; 3 – корпус реактора толщиной 100 мм; 4 – крышка реактора толщиной 400 мм; защитные барьеры из коррозионно-стойкой стали со скоростью общей коррозии  $\sim 2.0 \pm 0.5$  мкм/г. год и питтинговой коррозии  $\sim 6.0 \pm 1.5$  мкм/г. (если не указано иное); 5 – патрубки органов управления толщиной 5 мм; 6 – трубопровод первого контура толщиной 10 мм (общая коррозии  $\sim 100 \pm 50$  мкм/г. и питтинговая  $\sim 200 \pm 100$  мкм/г. при условии повреждения в момент аварии); 7 – гильзы штока КР толщиной 5 мм; 8 – плакировка корпуса толщиной 5 мм; 9 – плакировка крышки реактора толщиной 5 мм; 10 – внутриреакторные конструкции: патрубки органов управления и защиты реактора толщиной 5 мм; 11 – отработавшее ядерное топливо (скорость выхода продуктов деления из твэлов соответствует 1%/г., трансурановых элементов и ядерного материала – 0.5%/г.).

**Таблица 1.** Изотопный состав выброса при разгерметизации через 47 лет

Радионуклид	$T_{1/2}$ , лет	Активность, Бк
$^{137}\text{Cs}$	30	1.1E+13
$^{90}\text{Sr}$	29	9.6E+12
$^{63}\text{Ni}$	96	1.2E+11
$^{241}\text{Pu}$	14	4.4E+10
$^{239}\text{Pu}$	24100	2.8E+10
$^{238}\text{Pu}$	88	2.2E+10
$^{241}\text{Am}$	432	2.1E+10
$^{240}\text{Pu}$	6540	1.5E+10
$^{59}\text{Ni}$	75000	2.4E+09
$^{60}\text{Co}$	5	1.9E+08
$^{93}\text{Mo}$	3500	1.4E+06
$^{55}\text{Fe}$	3	3.2E+05



**Рис. 2.** Гистограмма результатов 1000 экспериментов моделирования разгерметизации энергетической установки атомной подводной лодки Б-159 в условиях усиленной питтинговой коррозии в местах деформаций поверхностей трубопровода первого контура:  $t$  – время разгерметизации, кривая – аппроксимация гистограммы нормальным распределением со средним значением 50.7 и стандартным отклонением 3.5.

Расчетный радионуклидный состав на момент разгерметизации в одном эксперименте (разгерметизация через 47 лет) приведен в табл. 1.

## ВЫВОДЫ

Разработанный программный комплекс позволяет провести ситуационный анализ, оценить наиболее вероятный путь проникновения воды внутрь объекта, если защитные барьеры имеют сопоставимые характерные размеры.

Другое возможное направление использования этого комплекса – имитационное моделирование для оценки возможных последствий реализации решения о создании дополнительных защитных барьеров объекта морского базирования, замены какого-либо барьера коррозионно более стойким, а также в обратной ситуации – при реализации решения о ликвидации какого-либо защитного барьера за ненадобностью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саркисов А.А., Антипов С.В., Билашенко В.П., и др. Математическая модель для оценки технического состояния и прогнозирования разрушения защитных барьеров затопленных радиационно опасных объектов. – Атомная энергия. 2018. Т. 124. Вып. 2. С. 99–104.
2. Саркисов А.А., Антипов С.В., Билашенко В.П., и др. Учет стохастической природы коррозионного разрушения применительно к объектам морского базирования, в том числе радиационно опасным затопленным объектам. – Атомная энергия. 2018. Т. 125. Вып. 5. С. 213–217.
3. Саркисов А.А., Антипов С.В., Билашенко В.П., и др. Оценка и прогноз состояния защитных барьеров затонувшей атомной подводной лодки “Б-159”, М.: Известия РАН. Энергетика. № 3. 2015. С. 50–57.

---

**Optimization of the Stochastic Model for Corrosion Degradation of Shielding Barriers in the Marine Environment Targeted at Prompt Assessment of Barrier State and Simulation of Technological Decisions**

**A. A. Sarkisov<sup>a</sup>, V. A. Sotnikov<sup>a,\*</sup>, S. V. Antipov<sup>a</sup>, M. N. Kobrinsky<sup>a</sup>, and V. P. Bilashenko<sup>a</sup>**

*<sup>a</sup>Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (IBRAE), Moscow, Russia*

*\*e-mail: vasotnikov@mail.ru*

Model for degradation of the shielding barriers in the marine environment [1, 2] that allows for stochastic nature of pitting corrosion is optimized for the prompt analysis of the barrier state and simulation of technological decisions. Numeric calculations are based on the Monte-Carlo method using client-server software architecture. The developed code package includes the toolbox of stored procedures and OLAP functions. In result, the amount of required computational resources for a numerical experiment is significantly reduced. The sunken nuclear submarine B-159 is analysed; the depressurization time, rate of radionuclide release, and its isotopic content are estimated assuming appearance of deformation and straining of the primary circuite pipeline during the emergency event, which increased the rate of pitting and general corrosion.

*Keywords:* dumped objects, shielding barrier, corrosion degradation, stochastic model, pitting corrosion, Monte-Carlo method, client-server architecture, stored procedures, OLAP functions