

**МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ/METALLURGY OF FERROUS, NON-FERROUS AND RARE METALS**DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.53> EDN: WZRВЕН**ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЦЕМЕНТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ЦИНКА**

Научная статья

Дюнова Д.Н.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0002-0707-5334;¹ Академия гражданской защиты МЧС России, Химки, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (dunova_dn[at]mail.ru)

Предложена: 05.11.2025; Принята: 27.05.2026; Опубликовано: 17.06.2026

Аннотация

На сегодняшний день цинковое производство — упорядоченное множество операций, осуществляющих количественное и качественное преобразование материальных и энергетических потоков. Промышленное оборудование производственных структур гидрометаллургии представляет собой сложные системы с характерным разнообразием образующих элементов, связей между ними. Эффективность производственных переделов и производства в целом определяет в том числе безотказное функционирование технологического оборудования. Работа в условиях сложных технологических режимов обуславливает актуальность задачи обеспечения надежности средств технического оснащения технологических объектов. В статье представлены результаты исследования надежности производственно-технологической системы процесса цементационной очистки растворов посредством применения топологической модели объекта и анализа ее структурных характеристик.

Ключевые слова: производство цинка, топологическая модель, цементационная очистка, параметрический потоковый граф, надежность технологической системы.

A STUDY OF THE RELIABILITY OF THE CEMENTATION TREATMENT SYSTEM IN ZINC HYDROMETALLURGICAL PRODUCTION

Research article

Dyunova D.N.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0002-0707-5334;¹ Civil Defence Academy EMERCOM of Russia, Khimki, Russian Federation

* Corresponding author (dunova_dn[at]mail.ru)

Suggested: 05.11.2025; Accepted: 27.05.2026; Published: 17.06.2026

Abstract

Nowadays, zinc production is a well-organised set of operations that transform material and energy flows in terms of both quantity and quality. The industrial equipment of hydrometallurgical production facilities consists of complex systems characterised by a variety of constituent elements and the connections between them. The efficiency of production processes and of overall production is determined, among other things, by the fault-free operation of process equipment. Operating under complex technological conditions highlights the importance of ensuring the reliability of the technical equipment at process facilities. The article presents the results of a study of the reliability of the production and technological system for the cementation treatment of solutions, using a topological model of the facility and an analysis of its structural characteristics.

Keywords: zinc production, topological model, cementation treatment, parametric flow graph, reliability of the technological system.

Введение

В условиях современной геополитической обстановки, структурной трансформации экономики и обеспечения технологического суверенитета отечественная цветная металлургия выступает одним из основных гарантов промышленной безопасности страны и устойчивого функционирования смежных секторов. Продукция цинкового сектора — ресурс для производства химической промышленности, производства высокотехнологичных сплавов антикоррозийной защиты металлоконструкций, строительства, оборонного и гражданского машиностроения, металлоемких инфраструктурных проектов.

В настоящее время производство цветных металлов переживает снижение объемов производства и экспорта металлопродукции, в том числе, по причинам снижения внутреннего потребления, износа основных фондов предприятий и т.д. Вследствие этого приоритетным направлением в производстве цветных металлов является совершенствование отечественных технологий переработки полиметаллических руд, наращивание производственных мощностей, внедрения эффективных проектов развития производства с целью повышения долговечности материальных активов, укрепления отечественного промышленного потенциала.

Технологический цикл производства цинка гидрометаллургическим способом включает совокупность пирометаллургических, гидро- и электрохимических процессов [1], [2]. Взаимодействие производственных переделов

и связь со смежными производствами осуществляется посредством сложной структуры материальных и энергетических потоков. Эффективность функционирования отдельных переделов комплекса и всего производственного цикла в целом обусловлена безотказной работой технологического оборудования [3]. Эксплуатация оборудования объектов гидрометаллургии протекает в непрерывном режиме, в условиях воздействия агрессивных сред, высоких температур, давлений, сложных гидродинамических режимов. Эти факторы способствуют росту вероятности внезапных отказов оборудования, нарушений технологических процессов, связанных с экономическими потерями от простоев, рисками для промышленной безопасности и экологии.

Технологически важным звеном цинкового производства является процесс цементационной очистки растворов, оказывающий существенное влияние на ход последующего электролитического осаждения и определяющий качество катодного цинка. Технологическая схема процесса — сложная многокомпонентная система, характеризующаяся многообразием типового и специализированного оборудования, наличием прямых и обратных материальных потоков [4]. К числу деструктивных факторов, снижающих ресурс оборудования передела, относятся эрозионный износ, коррозионное воздействие, кавитационные разрушения, абразивное истирание, отложения твердых фаз на рабочих поверхностях. Распределение отказов оборудования процесса цементационной очистки цинковых растворов показано на рис.1 [5].

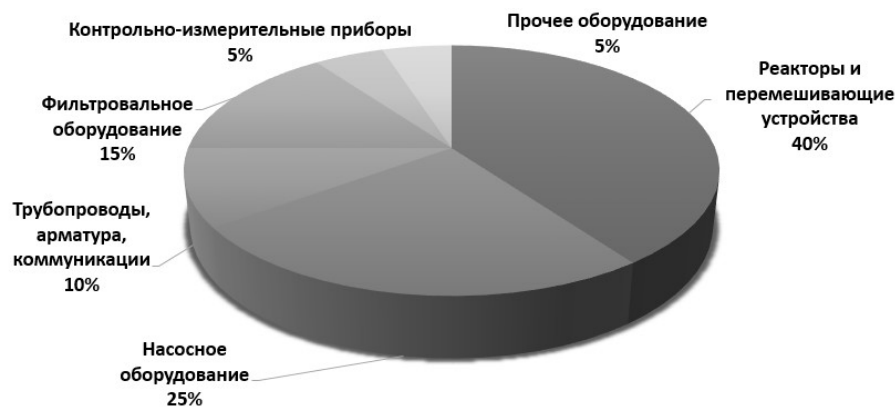


Рисунок 1 - Распределение отказов оборудования по видам
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.53.1>

Надежность технологических схем указанного класса следует рассматривать как интегральное свойство сложной системы, структура которой формируется сочетанием последовательно и параллельно соединенных элементов. В этом случае уровень общей надежности непосредственно обусловлен надежностью отдельных составных звеньев, поскольку отказ или снижение работоспособности одного элемента в последовательной части системы может привести к нарушению функционирования всего комплекса, тогда как наличие параллельных ветвей в определенной степени повышает устойчивость технологического процесса [6].

Функционирование технологических переделов непрерывного действия подвержено влиянию множества случайных факторов. Стохастическая природа возникновения отказов оборудования, длительности восстановления его отдельных элементов обуславливает целесообразность применения вероятностного моделирования для исследования их надежности. Методы, основанные на применении марковских и полумарковских процессов, обеспечивают возможность детерминированного определения вероятностных характеристик состояния системы в произвольные моменты времени, создают фундамент для прогноза отказоустойчивости сложных объектов [7], [8]. Однако данные подходы не отличаются наглядностью и эффективностью поиска элементов, определяющих общую конфигурационную надежность многоаппаратных комплексов. В условиях многокомпонентных технологических схем детерминированность отказов носит каскадный характер: локальное нарушение функционирования отдельного элемента способствует дестабилизации рабочих режимов всей производственной цепи. Методика оценки надежности сложной технологической системы, представленная в [9], основана на параметрическом контроле технологических операций. Однако недостаточный учет структурных взаимосвязей между элементами системы не позволяет в полной мере прогнозировать ее устойчивость к отказам указанного вида. Известен принцип исследования надежности многоаппаратных технологических систем, основанный на применении математического аппарата нечеткой логики для формализации качественных экспертных оценок ключевых факторов производственного цикла [10]. Он может служить вспомогательным инструментом для лица принимающего решения, для технологической подготовки производства, однако он не позволяет в явном виде выявлять пути распространения отказов и структурные особенности взаимного элементов технологических структур.

Эффективным подходом к исследованию надежности сложных производственно-технологических систем является аналитическая идентификация «узких мест», т. е. структурно-функциональных зон, определяющих общую способность системы сохранять работоспособность. Это позволяет определять наиболее уязвимые компоненты структуры технологического цикла, формировать теоретическую основу для оптимизации стратегий технического обслуживания, резервирования [10].

Основные результаты

Целью работы является комплексный анализ надежности технологической схемы цементационной очистки цинксульфатных растворов с выявлением элементов, потенциально способных привести к отказу производственно-технологической системы.

Объектом исследования является технологическая система цементационной очистки растворов гидromеталлургического производства цинка, рассматриваемая как совокупность взаимосвязанных технологических аппаратов, коммуникаций и организационно-технических факторов, обеспечивающих получение цинксульфатных растворов, отвечающих требованиям последующих стадий.

Предмет исследования определяет надежность указанной технологической системы процесса цементационной очистки, включая закономерности ее функционирования, причины и характер отказов, а также влияние конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на ее работоспособность.

Многообразие причин возникновения отказов элементов технологической схемы, их различный характер и возможность взаимовлияния обуславливают применение для исследования надежности многоэлементных объектов методологии системного анализа, поскольку результирующая безотказность подобных объектов является функцией не только индивидуальных характеристик оборудования, но и свойств системы в целом, обусловленных топологией межэлементных связей и динамикой материально-энергетических потоков.

Для технологической системы процесса цементационной очистки данная задача решена с применением математического аппарата теории графов. Целесообразность выбора обусловлена сложной, многосвязной структурой объекта исследования, простотой построения топологических моделей и оценивания показателей характеристик надежности на их основе [3].

Топологическая модель объекта в виде параметрического потокового графа (ППГ) $G' = (V, E')$ представлена на рис. 2. Конечное множество вершин графа $V' = \{v'_i\}$ соответствует элементам технологической системы и осуществляет преобразование параметров физических потоков. Множество $E' = \{e'_{ij}\}$, $E' \subseteq V' \times V'$ – множество ориентированных дуг, отражающее физические потоки системы.

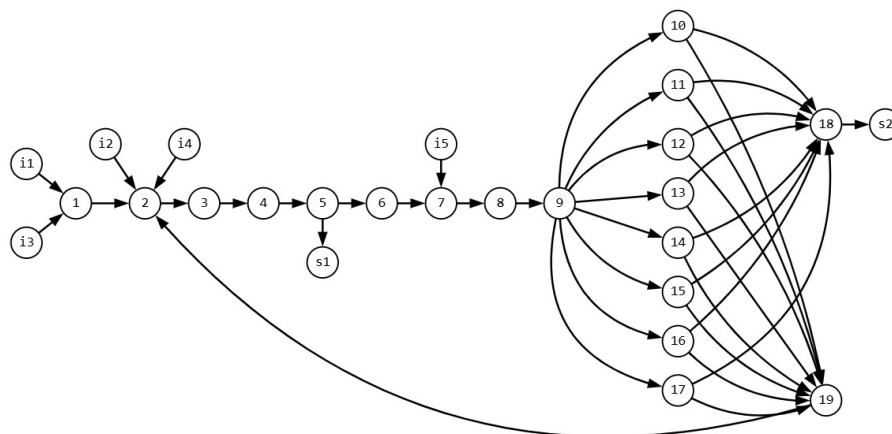


Рисунок 2 - Параметрический потоковый граф процесса цементационной очистки

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.53.2>

Множество вершин ППГ составляют источники (i_1 — верхний слив нейтральных сгустителей, i_2 — фильтрат кадмиевого цеха, i_3 — соль Шлиппе, i_4, i_5 — цинковая пыль), стоки (s_1 — медно-кадмиевый кек, s_2 — очищенный раствор), вершины (1–4 — агитаторы первой стадии очистки, 5 — промежуточный сгуститель, 6–9 — агитаторы второй стадии очистки, 10–17 — аппараты фильтрации, 18, 19 — сборники очищенных растворов и фильтрата соответственно).

Надежность технологической топологии процесса цементации оцениваем на основе структурных характеристик ППГ. Выявление «узких мест» технологической схемы выполнено путем применения алгоритма поиска вершин сочленения [4].

Для решения задачи из графа $G'=(V',E')$ сформирован подграф

$$G = (V, E), \quad (1)$$

где $E = \{(u', v') \in E' \mid u \in V', v \in V'\}$ — множество дуг подграфа; $V = V' \setminus \text{Vext}$, $\text{Vext} = S \cup T$ — множество исключаемых вершин, $S = \{v' \in V' \mid \text{deg}^-(v') = 0\}$ — множество источников, $T = \{v' \in V' \mid \text{deg}^+(v') = 0\}$ — множество стоков, $\text{deg}^-(v')$ — полустепень захода вершины, $\text{deg}^+(v')$ — полустепень исхода вершины.

На $G=(V, E)$ для каждой пары вершин $(v_i, v_j) \in V$ введем величину $d(v_i, v_j)$ — расстояние между вершинами v_i и v_j , равное длине кратчайшего пути из v_i в v_j , соответствующую условиям:

$$d(v_i, v_j) \geq 0; d(v_i, v_j) \neq d(v_j, v_i); \\ d(v_i, v_i) = 0; d(v_i, v_j) + d(v_j, v_k) \geq d(v_i, v_k), \quad v_i, v_j, v_k \in V.$$

Для каждой вершины $v_i \in V$ далее определяем ее эксцентриситет, принимаемым как наибольшее расстояние от данной вершины до любой другой вершины подграфа:

$$e(x) = \max_{v_j \in V} d(v_i, v_j) \quad (2)$$

Вершина ППГ, для которой величина эксцентриситета принимает минимальное значение по всему множеству вершин, представляет собой центральную вершину графовой структуры. Она определяет наиболее близкое положение относительно остальных элементов графа и, вследствие своей структурной значимости, может входить в состав множества сочленений. Вершина, эксцентриситет которой достигает максимального значения, относится к множеству периферийных вершин ППГ. Она соответствует элементу технологической схемы, удаленному в топологическом смысле от центральной области графа. Как правило, отказ данного элемента не вызывает нарушения общей связности и, следовательно, не приводит к потере работоспособности объекта в целом.

По совокупности эксцентриситетов всех вершин вычисляют радиус подграфа:

$$r(G) = \min_{v_i \in V} e(v_i), \quad (3)$$

как характеристику его центральной области.

После идентификации периферийных вершин $G = (V, E)$ осуществляют переход к анализу его структурного остова путем сужения исходного множества вершин. Данная операция представляет собой построение подграфа на сокращенном множестве объектов.

Пусть $P(G) \subseteq V$ — подмножество периферийных вершин $G = (V, E)$:

$$P(G) = \left\{ v_i \in V \mid e(v_i) = \max_{v_j \in V} e(v_j) \right\}. \quad (4)$$

Тогда граф, полученный после удаления периферийных вершин и инцидентных им дуг, задается как

$$G^{(1)} = (V^{(1)}, E^{(1)}) \quad (5)$$

где $V^{(1)} = V \setminus P(G)$, $E^{(1)} = \{(v_i, v_j) \mid v_i \in V^{(1)}, v_j \in V^{(1)}\}$.

Граф $G^{(1)} = (V^{(1)}, E^{(1)})$ содержит все вершины, не исключенные на предыдущем этапе, и все дуги исходного графа, инцидентные только данным вершинам. Далее проводят идентификацию его центральной области с целью последующего выбора оптимального множества сочленений. Для каждой вершины $v_i \in V^{(1)}$ определяют ее эксцентриситет $e(v_i)$ как максимальное расстояние до прочих вершин множества:

$$e(v_i) = \max_{v_j \in V^{(1)}} d(v_i, v_j) \quad (6)$$

где $d(v_i, v_j)$ — расстояние между вершинами v_i и v_j .

Совокупность вершин, для которых значение эксцентриситета минимально и равно радиусу графа $r(G^{(1)})$, образует множество центров подграфа $C(G^{(1)})$. Из него формируют оптимальное множество сочленения графа. Выбор конкретных элементов производится путем оптимизации целевой функции, в качестве которой выступает показатель, учитывающий весовые коэффициенты вершин и их удаленность в структуре подграфа:

$$Q = \sum_{v_i \in N} \frac{\rho_i}{e(v_i)} \rightarrow \max \quad (7)$$

где $N \subseteq C(G^{(1)})$ — искомое подмножество сочленения, ρ_i — параметр веса i -й вершины, $e(v_i)$ — эксцентриситет i -й вершины.

Применительно к топологической модели исследуемого процесса после удаления вершин-источников и вершин-стоков ППГ подграф объекта включает $n=19$ вершин и $m=32$ ветви. Получено, что наименьшими значениями обладают вершины 10-17,18,19: $e(18)=0; e(10)=\dots=e(17)=e(19)=1$. Это означает их возможную принадлежность множеству сочленений ППГ. Наибольшие отклонения имеют вершины 1-4: $e(1)=10; e(2)=9; e(3)=8; e(7)=7$. При анализе степеней вершин ППГ установлено, что малыми значениями отличаются вершины 1,3-8,10-17: $\rho(1)=\rho(5)=\rho(7)=3$, $\rho(3)=\rho(4)=\rho(6)=2$, $\rho(2)=5$. В сочетании с наибольшими отклонениями они образуют периферийные вершины и удаляются из рассмотрения. Искомое множество сочленений подграфа: $\{9,19\}$. Ему отвечает максимум функции $Q=13,5$. Искомое множество сочленений определяется имеющими наибольшее число технологических связей вершинами, соответствующими агитатору второй станции цементационной очистки и аппарату-сборнику фильтрата.

Заключение

В ходе проведенного исследования установлено, что надежность производственной системы процесса цементационной очистки цинковых растворов целесообразно оценивать на основе анализа структуры технологических связей. Показано, что учет взаимосвязей между элементами технологической схемы позволяет количественно определить участки, оказывающие наибольшее влияние на устойчивость функционирования системы. Полученные результаты создают основу для стабильности технологического процесса, дальнейшего совершенствования методов повышения надежности за счет оптимизации планово-профилактического обслуживания и прогнозирования отказов.

**Конфликт интересов**

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Казанбаев Л.А. Гидрометаллургия цинка / Л.А. Казанбаев. — Москва: Руда и Металлы, 2006. — 176 с.
2. Снурников А.П. Гидрометаллургия цинка / А.П. Снурников. — Москва: Metallurgiya, 1981. — 384 с.
3. Дюнова Д.Н. Об оценивании показателей надежности технологических систем / Д.Н. Дюнова, Ю.И. Дюнова. // Инновационные решения социальных, экономических и технологических проблем современного общества: сборник научных статей по итогам круглого стола со всероссийским и международным участием; — Москва: КОНВЕРТ, 2021. — С. 44–46.
4. Кафаров В.В. Принципы математического моделирования химико-технологических систем / В.В. Кафаров. — Москва: Химия, 1974. — 344 с.
5. Технологическая инструкция по цинковому производству ПАО «Электроцинк»: утверждена в 2005 г. — Владикавказ, 2005. — 147 с.
6. Фомин С.И. Оценка надежности работы технологических схем с мобильными дробильными комплексами / С.И. Фомин, А.А. Фауль, А.И. Пономарев // Записки Горного института. — 2011. — Т. 190. — С. 51–55.
7. Хачатрян С.А. Оценка надежности процесса работы технологических схем углеобогатительных фабрик / С.А. Хачатрян, В.Г. Мерзляков // Системные технологии. — 2022. — № 2 (43). — С. 104–109.
8. Сорокин А.С. Применение полумарковских процессов к определению характеристик надежности технологических схем / А.С. Сорокин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2005. — № 1 (45). — С. 3–9.
9. Курбанмагомедов К.Д. Оценка технологической надежности для анализа состояния производственных систем / К.Д. Курбанмагомедов // Системные технологии. — 2018. — № 3 (28). — С. 87–92.
10. Феофанов А.Н. Оценка надежности производственного процесса с применением аппарата нечеткой логики / А.Н. Феофанов, Г.В. Юдин // Качество и жизнь. — 2016. — № 4 (12). — С. 54–58.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kazanbaev L.A. Gidrometallurgiya cinka [Zinc hydrometallurgy] / L.A. Kazanbaev. — Moscow: Ruda i Metally, 2006. — 176 p. [in Russian]
2. Snurnikov A.P. Gidrometallurgiya cinka [Zinc hydrometallurgy] / A.P. Snurnikov. — Moscow: Metallurgiya, 1981. — 384 p. [in Russian]
3. Dyunova D.N. Ob ocenivaniy pokazatelej nadezhnosti texnologicheskix sistem [On the Evaluation of Reliability Indicators of Technological Systems] / D.N. Dyunova, Yu.I. Dyunova. // Innovative Solutions to Social, Economic, and Technological Problems of Modern Society: collection of Scientific Papers from the Results of a Round Table with All-Russian and International Participation; — Moscow: KONVERT, 2021. — P. 44–46. [in Russian]
4. Kafarov V.V. Principy' matematicheskogo modelirovaniya ximiko-texnologicheskix sistem [Principles of mathematical modeling of chemical-engineering systems] / V.V. Kafarov. — Moscow: Ximiya, 1974. — 344 p. [in Russian]
5. Tekhnologicheskaya instrukciya po cinkovomu proizvodstvu PАО «Elektrocink» [Technological instruction on zinc production of PJSC "Electrozinc"] : approved in 2005. — Vladikavkaz, 2005. — 147 p. [in Russian]
6. Fomin S.I. Ocenka nadezhnosti raboty' texnologicheskix sxem s mobil'ny'mi drobil'ny'mi kompleksami [Assessment of the reliability of technological schemes with mobile crushing complexes] / S.I. Fomin, A.A. Faul', A.I. Ponomarev // Notes of the Mining Institute. — 2011. — T. 190. — P. 51–55. [in Russian]
7. Xachatryan S.A. Ocenka nadezhnosti processa raboty' texnologicheskix sxem ugleobogatitel'ny'x fabrik [Assessment of the reliability of the process of operating technological schemes at coal-processing plants] / S.A. Xachatryan, V.G. Merzlyakov // System technologies. — 2022. — № 2 (43). — P. 104–109. [in Russian]
8. Sorokin A.S. Primenenie polumarkovskix processov k opredeleniyu xarakteristik nadezhnosti texnologicheskix sxem [Application of semi-Markov processes to determining the reliability characteristics of technological schemes] / A.S. Sorokin // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. — 2005. — № 1 (45). — P. 3–9. [in Russian]
9. Kurbanmagomedov K.D. Ocenka texnologicheskoy nadezhnosti dlya analiza sostoyaniya proizvodstvenny'x sistem [Assessment of technological reliability for analyzing the state of production systems] / K.D. Kurbanmagomedov // System Technologies. — 2018. — № 3 (28). — P. 87–92. [in Russian]
10. Feofanov A.N. Ocenka nadezhnosti proizvodstvennogo processa s primeneniem apparata nechetkoj logiki [Assessment of the reliability of the production process using fuzzy logic] / A.N. Feofanov, G.V. Yudin // Quality and Life. — 2016. — № 4 (12). — P. 54–58. [in Russian]