

### Раздел 3. Физика горных процессов на больших глубинах

УДК 622.002.5.004.6.003.1

И.В. Антипов, И.А. Турбор

#### ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ВЕРОЯТНОСТНО-ФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Институт физики горных процессов НАН Украины

*Представлена новая классификация методов оценки надежности технических систем, таких как горнодобывающие технологии. Показано, что вероятностно-физический подход дает не только более точные прогнозные оценки по сравнению с традиционным математическим аппаратом, но и позволяет решать большие типовых задач надежности горнодобывающих технологий.*

Проблема повышения надежности является наиболее важной при создании и эксплуатации горно-шахтного оборудования. Роль надежности как показателя эффективности очистных работ повысилась в связи с созданием сложных высокопроизводительных систем забойного оборудования, к которым относятся механизированные угледобывающие комплексы нового поколения [1]. Простои комплексно-механизированных очистных забоев вследствие отказов связаны со значительными производственными потерями. Так, один час простоя современного очистного комплекса нового поколения вызывает потерю до 250–300 т угля, которая может оказаться неполной в течение смены и суток и нарушить ритмичность работы всей шахты [2].

Качественное решение вопросов проектирования, производства и эксплуатации горных, транспортных, стационарных машин и систем невозможно без учета основных положений теории надежности [3]. При этом немаловажное значение имеет задача классификации отказов горно-шахтного оборудования [4].

Одной из основных проблем оценки надежности является сокращение времени получения достоверной информации о количественных показателях надежности. Это объясняется тем, что при современных тенденциях и темпах повышения уровня надежности горных машин использование традиционных методов оценки надежности, основанных на строго вероятностных моделях отказов (экспоненциальном распределении, логарифмическом, логнормальном и др.), становится не эффективным, так как срок получения информации о надежности приближается к сроку эксплуатации оборудования до капитального ремонта, а сама информация является недостаточно достоверной.

Применение методов ускоренной оценки надежности, основанных на вероятностно-физическом подходе к теории надежности [5], в значительной мере решает проблему сокращения времени получения информации о технологической надежности очистного забоя за счет использования информации как об отказах, так и о процессах деградации разных типов оборудования – выемочного комбайна, механизированной крепи, скребкового конвейера и др. Однако в каждом конкретном случае, исходя из периода отработки выемочного столба, горно-геологических условий залегания пласта, недостаточности информации о процессах деградации и т.д., необходимо правильно выбрать наиболее эффективный метод ускоренной оценки надежности.

На рис. 1 приведена классификация методов оценки надежности, которые формально, исходя из способа получения исходной информации об объекте, можно разделить на апостериорные (методы ускоренных испытаний, методы прогнозирования), априорные (методы моделирования [6] и методы расчета) и априорно-апостериорные (комбинированные), представляющие собой сочетание признаков как априорных, так и апостериорных методов (расчетно-экспериментальные методы). При этом необходимо учитывать следующее:

1) любой апостериорный или комбинированный метод, позволяющий получить оценку надежности (безотказности, долговечности) за время, меньшее ресурса объекта, является методом ускоренной оценки надежности;

2) любой апостериорный или комбинированный метод, использующий гипотезу о теоретической модели надежности элементов, входящих в состав объекта, является методом ускоренной оценки надежности.

Существующие методы исследования надежности горнодобывающих технологий и производственных процессов не удовлетворяют требованиям практики и уровню технологии горного производства. В обзорах о состоянии исследований надежности отмечается неудовлетворенность существующими методами исследования надежности, поскольку часто и сильно расходятся прогнозные оценки и реальные значения показателей надежности [7, 8]. Все больше предприятий и компаний отказываются от подразделений надежности в своей структуре.

Основные задачи исследования надежности горнодобывающих технологий и производственных процессов – установление закономерностей возникновения отказов и оценка количественных показателей надежности – могут решаться двумя различными путями. В теории и практике надежности наибольшее развитие получило направление, основанное на использовании только вероятностных концепций (строго вероятностная теория). В этом случае отказы рассматриваются как некоторые отвлеченные случайные события, а многообразные физические состояния изделий сводятся к двум состояниям: исправности и неисправности. Методология получения конечных результатов о надежности согласно строго вероятностной (статистической) теории состоит в следующем.

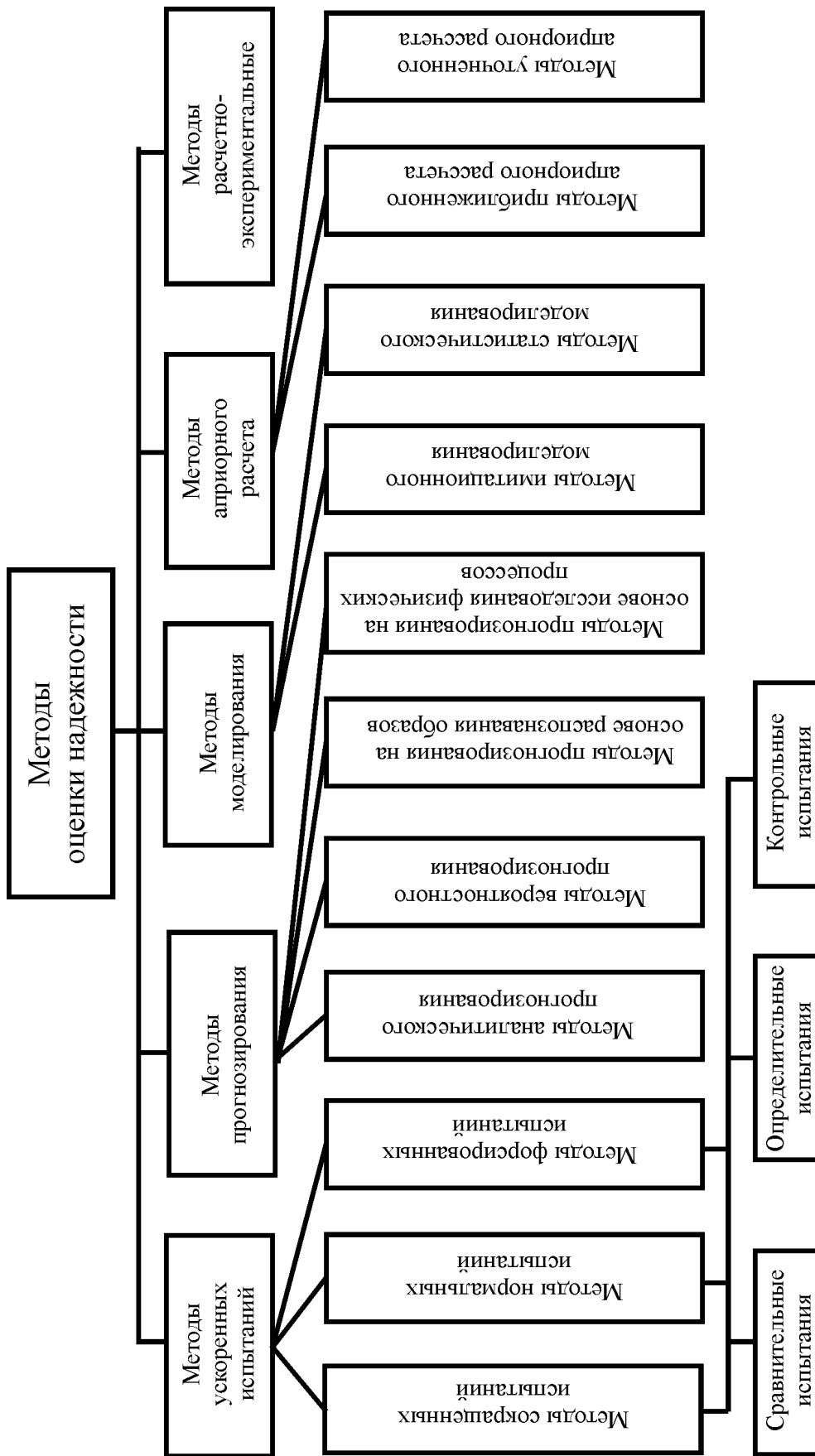


Рис. 1. Классификация методов оценки надежности

На основании испытаний или эксплуатации получают статистику отказов. Далее, используя известные статистические критерии согласия, выбирается наиболее подходящая модель распределения случайных величин, разработанная в теории вероятностей (экспоненциальная, нормальная, Вейбулла, логарифмически нормальная и др.), и принимается в качестве теоретической модели распределения вероятностей безотказной работы (модели надежности), на основании которой определяются необходимые количественные показатели надежности. Оценка надежности горнодобывающих систем осуществляется путем вычисления вероятностей работоспособных состояний элементов, например, выемочного комбайна, механизированной крепи, скребкового конвейера и др.

Преимущественно развитые статистические методы оценки надежности, вошедшие в основные нормативные материалы, недостаточно эффективны при оценке надежности вновь разрабатываемых или находящихся в эксплуатации новых горных машин и комплексов, то есть там, где статистика отказов малочисленна или вообще отсутствует. Кроме того, отсутствие связи показателей надежности с физическими характеристиками изделий и условиями эксплуатации не дает возможности эффективно управлять проектированием и обеспечением необходимого уровня надежности разрабатываемых технических средств.

Строго вероятностные концепции надежности были признаны недостаточными уже в самом начале развития надежности как науки. Так, академик Гнеденко Б.В., определяя пути более эффективного развития теории надежности, отмечал, что включение в теорию надежности физических представлений о процессах износа, безусловно будет способствовать повышению возможностей теории и практики надежности [9]. В работах Сотскова Б.С. [10], Хевиленда Р. [11] и других исследователей указывается, что сочетание вероятностных методов с глубоким проникновением в физическую сущность процессов является наиболее эффективным направлением дальнейшего развития теории и техники надежности. Поэтому целесообразно изучение надежности горнодобывающих технологий во взаимосвязи с физико-механическими свойствами горного массива и условиями эксплуатации техники. Этот путь установления количественных показателей технологической надежности, в отличие от строго вероятностного подхода, основан на изучении физико-механических свойств горных пород и некоторых механических параметров, характеризующих техническое состояние оборудования, с использованием вероятностных методов.

Основной причиной неадекватности решений задач надежности является использование однопараметрического экспоненциального распределения. Однопараметричность модели, с одной стороны, упрощает решение задач надежности, с другой стороны, накладывает на модель ряд существенных ограничений и делает ее грубо приближенной.

Некоторые выводы, следуемые из экспоненциального закона распределения случайных величин, не поддаются осмыслению и даже являются ошибочными. Например, экспоненциальное распределение абсолютно не учитывает старение и износ техники, то есть исключает необходимость выбора более качественных материалов при производстве оборудования или проведении профилактики в процессе эксплуатации. Экспоненциальное распределение имеет максимальную плотность отказов в момент включения, то есть соответствует низкому технологическому уровню и качеству изготовления оборудования. Поэтому чем ниже качество изготовления техники, тем более подходящей оказывается модель экспоненциального распределения для описания ее эксплуатационной надежности. При этом фиксируются все моменты экспоненциального распределения, начиная со второго – коэффициент вариации всегда равен единице, коэффициент асимметрии равен двум, коэффициент эксцесса – девяти. Это свидетельствует о том, что исследователи работают только с математическим ожиданием, то есть время до отказа объекта фактически представляется детерминированной величиной.

Недостатки однопараметрической экспоненциальной модели особенно проявляются при решении таких задач, как дальний прогноз эксплуатационной надежности. Так, прогноз среднего ресурса высоконадежных изделий электронной техники или прогноз гамма-процентного ресурса для очень малых уровней вероятности отказа отличается от прогноза более адекватных двухпараметрических моделей в 50–100 и более раз [12].

Таким образом, использование экспоненциального распределения на практике для прогноза, например, средней наработки до отказа приводит к существенному завышению надежности отдельных элементов (устройств с небольшим количеством элементов) и также к существенному занижению прогнозируемой надежности систем с большим количеством элементов. Эти погрешности, которые могут иметь разные знаки, – завышение, занижение – являются причиной недоверия прогнозным оценкам на основе экспоненциального распределения.

В этой связи характерным является определение лямбда-метода, данного Кеном Ньюбеком [13]. Он назвал существующий прогноз для предсказания надежности методом «влажного пальца», то есть «намочите свой палец и поднимите его в воздух», что по эффективности будет соответствовать определению скорости ветра.

В ряде работ зарубежных специалистов [13, 14] отмечается, что широко распространенный стандарт MIL-HDBK-217, основанный на использовании экспоненциального распределения, не предназначен для того, чтобы обеспечить показатель надежности с гарантированной точностью. Скорее, он предназначен для использования в качестве инструмента для оценки надежности новых технических средств и сравнения их с существующими.

Некоторые специалисты отождествляют понятия «интенсивности отказов» (показатель безотказности невосстанавливаемых объектов) и «парамет-

ра потока отказов» (показатель безотказности восстанавливаемых объектов). Такое отождествление справедливо только при использовании экспоненциального распределения, когда теоретические интенсивности отказов и параметр потока отказов объекта совпадают. На самом деле реальные характеристики сопоставляемых показателей – интенсивности отказов и параметра потока отказов – имеют разные закономерности во времени. Установлено, что эмпирическая «интенсивность отказов» имеет немонотонный характер, совпадающий с кривой плотности распределения, но отличающийся от традиционного представления «параметра потоков отказов» [15, 16].

Большее распространение получают вероятностно-физические модели надежности [17-19], которые могут заменить существующий аппарат исследования и прогнозирования надежности. Вероятностно-физический подход основан на использовании законов распределения отказов (моделей надежности), вытекающих из анализа физических процессов деградации и приводящих к отказу. При этом процессы деградации рассматриваются в виде случайных процессов. Такой подход к исследованию надежности, в отличие от детерминированного физического, назван вероятностно-физическим [20], поскольку он непосредственно устанавливает связь вероятности достижения предельного уровня физическим определяющим параметром, то есть связывает значение вероятности отказа и физических параметров, вызывающих отказы. Вследствие этого параметры получаемого вероятностного распределения отказов имеют определенный физический смысл. В частности, в двухпараметрических вероятностно-физических моделях отказов параметр масштаба совпадает со значением средней скорости изменения определяющего параметра, а параметр формы – с коэффициентом вариации этой скорости. Распределение отказов (распределение наработки до отказа), параметры которого имеют конкретную интерпретацию, в отличие от строго вероятностных распределений (моделей) отказов (экспоненциального, Вейбулла, логарифмически нормального и др.), принято называть вероятностно-физическим распределением (моделью) отказов [20]. Однако в научно-технической литературе встречается целый ряд различных определений таких моделей: «физико-статистические», «физико-математические», «физико-вероятностные» и др. Все эти определения отражают одну идею: функция распределения наработки до отказа является функцией некоторых статистических характеристик объекта или процесса деградации.

Решение основных задач надежности как априорными, так и апостериорными методами (рис. 1), в конечном итоге сводится к оценке параметров распределения искомой величины - наработки до отказа, на отказ, ресурс и т.д. Одним из наиболее важных показателей, используемых при решении задач надежности с применением диффузионных распределений, является коэффициент вариации. А коэффициент вариации, как обобщенная характеристика с достаточной для инженерной практики точностью, может быть оценен априори на основании исследований как процессов деградации

(прочности, усталости, изнашивания, разрушения и др.), так и статистических данных об отказах при эксплуатации горной техники. Благодаря конкретной физической интерпретации параметров диффузионных распределений на их основе решаются такие задачи теории надежности, как расчет надежности систем, планирование контрольных и определительных испытаний на надежность, расчет запасных частей, расчет долговечности и др.

В настоящее время на основе двухпараметрических диффузионных распределений разработаны методы решения всех основных задач – оценки надежности узлов горных машин и механизированных комплексов. При этом определяются наиболее полные характеристики надежности – функции распределения наработки на отказ, ресурса и др., которые позволяют оценить любые показатели надежности – среднюю наработку, гамма-процентный ресурс, вероятность безотказной работы за заданный интервал наработки, остаточный ресурс и др. Разработаны стандарты [21–23], которые обуславливают решения задач надежности на основе диффузионных распределений.

Таким образом, имеются основания для внедрения математического аппарата более адекватных двухпараметрических моделей надежности в практику исследования надежности как отдельных узлов горных машин, так и комплексно-механизированных технологий в целом. Высокая универсальность двухпараметрических диффузионных распределений позволяет решить задачу унификации методов измерений надежности элементной базы и технических систем.

Уточнение оценок показателей надежности на всех этапах, в том числе и на этапе проектирования, объективно приведет к повышению надежности.

Применение математического аппарата на основе диффузионных распределений дает не только более точные прогнозные оценки по сравнению с традиционным математическим аппаратом, но и позволяет решать больше типовых задач надежности. Так, если на основе DN-распределения решается 25 типовых задач надежности, то на основе экспоненциального распределения только 13 [24].

Таким образом, в настоящее время имеется возможность сквозного использования двухпараметрических вероятностно-физических моделей отказов при оценке надежности горнодобывающих технологий на этапах проектирования, производства и эксплуатации горно-шахтного оборудования. При этом применение аппарата более адекватных двухпараметрических физических моделей надежности приводит не только к уточнению оценок показателей надежности, но и к существенному экономическому эффекту. Одновременно решается задача унификации методов измерений надежности отдельных узлов и механизированного комплекса в целом. Применение вероятностно-физических моделей позволяет более эффективно решать задачи ускоренной оценки надежности горнодобывающих технологий.

1. *Антипов И.В.* Физико-техническое обоснование параметров высокопроизводительных угледобывающих комплексов нового поколения [Текст] / И.В. Антипов // Фізико-технічні проблеми гірничого виробництва. Фізика і механіка гірничих процесів на великих глибинах. – Донецьк: Інститут фізики гірничих процесів НАН України, 2008. – С. 69–80.
2. *Сапицкий К.Ф.* Надежность технологических процессов эксплуатационного участка шахты [Текст] / К.Ф. Сапицкий, С.И. Мирошников, В.И. Чекавский. – М.: «Недра», 1978. – 182 с.
3. *Гетопанов В.Н.* Проектирование и надежность средств комплексной механизации [Текст] / В.Н. Гетопанов, В.М. Рачек. – М.: «Недра», 1986. – 208 с.
4. *Антипов И.В.* Новая классификация отказов горно-шахтного оборудования [Текст] / И.В. Антипов, Э.Ю. Сухаревский // Физико-технические проблемы горного производства, вып. 8. – Донецк: ИФГП НАН Украины, 2005. – С. 207–213.
5. *Стрельников В.П.* Новая технология исследования надежности [Текст] / В.П. Стрельников // Математические машины и системы. – 1997. – № 2. – С. 78–83.
6. *Антипов И.В.* Моделирование надежности технологических процессов методом группового учета аргументов [Текст] / И.В. Антипов, М.В. Корнеев // Теория и практика проектирования, строительства и эксплуатации высокопроизводительных подземных рудников, М. – 1990. – С. 202–203.
7. *Coppola A.* The Status of the Reliability Engineering Technology // Reliability Society Newsletter. – 1997. – № 43. – P. 7–10.
8. *Антипов И.В.* Моделирование производственных процессов методом группового учета аргументов [Текст] / И.В. Антипов, А.Н. Шкуматов // Проблемы экологии. – Общегосударственный научно-технический журнал, 2000. – № 1. – С. 5–9.
9. *Гнеденко Б.В.* Элементарное введение в теорию вероятностей [Текст] / Б.В. Гнеденко, А.Я. Хинчин. – 8-е изд., испр. – М.: Наука, 1976. – 165 с.
10. *Сотсков Б.С.* Физика отказов и определение интенсивности отказов [Текст] / Б.С. Сотсков // О надежности сложных технических систем. – М.: Советское радио, 1966. – С. 289–306.
11. *Хевиленд Р.* Инженерная надежность и расчет на долговечность [Текст] / Р. Хевиленд / Пер. с англ. – М.: Энергия, 1966. – 231 с.
12. *Шор Я. Б.* Статистические методы анализа и контроля качества и надежности [Текст] / Я.Б. Шор. – М.: Советское радио, 1962. – 252 с.
13. *Neubeck K.* MIL-HDBK-217 and the real // RAC Journal. – 1994. – № 2. – P. 15–18.
14. *Norman V. Fuqua* "Physics of Failure" - historic perspective // RAC Journal. – 1995. №2. – P. 27–30.
15. *Шукайло В.Ф.* Некоторые вопросы теории восстановления и усталостной надежности механических элементов [Текст] / В.Ф. Шукайло // О надежности сложных технических систем. – М.: Советское радио, 1966. – С. 125–149.
16. *Birnbaum Z.W., Saunders S.C.* A new family of life distribution // Appl. Prob. – 1969. – № 6. – P. 319–347.
17. *Дружинин Г. В.* Надежность автоматизированных производственных систем [Текст] / Г.В. Дружинин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 480 с.
18. *Проникав А. С.* Надежность машин [Текст] / А.С. Проникав. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.



19. Бароне П.П. Надежность и качество механических систем [Текст] / П.П. Бароне, А.В. Звиедрис, Н.К. Салениекс. – Рига: Авотс, 1982 – 85 с.
20. Стрельников В.П. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем [Текст] / В.П. Стрельников, А.В. Федухин. – К.: Логос, 2002. – 486 с.
21. ДСТУ 2862-94. Надежность техники. Методы расчета показателей надежности. Общие требования. Введ. 01.01.96. – 39 с.
22. ДСТУ 3004-95. Надежность техники. Методы оценки показателей на дежности по экспериментальным данным. – Введ. 01.01.96. – 122 с.
23. ДСТУ 3942-99. Надежность техники. Планы испытаний для контроля средней наработки до отказа (на отказ). Часть 2. Диффузионное распределение. – Введ. 01.01.00. – 34 с.
24. ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения. – Введ. 01.01.99. – 43 с.

I.B. Антипов, I.O. Турбор

### ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ГІРНИЧОДОБУВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ІМОВІРНІСНО-ФІЗИЧНИМИ МЕТОДАМИ

*Представлено нову класифікацію методів оцінки надійності технічних систем, таких як гірничодобувні технології. Показано, що імовірнісно-фізичний підхід дає не тільки більш точні прогнозні оцінки в порівнянні з традиційним математичним апаратом, але й дозволяє вирішувати більше типових задач надійності гірничодобувних технологій.*

I.V. Antypov, I.A. Turbor

### EVALUATION OF A MINING TECHNOLOGY'S RELIABILITY USING THE PROBABILISTIC PHYSICAL METHODS

*New classification of technical systems reliability estimation methods is presented with mining technologies as an example. It is shown that probabilistic physical approach gives more accurate prognosis estimations as compared to conventional mathematical tools as well as allows solving more standard problems of mining technologies reliability.*