

Чашемов Довран, студент,  
АГТУ ВШН «Альметьевский государственный  
технологический университет» Высшая школа нефти

Научный руководитель:  
Мельникова Эльвира Фаизовна,  
АГТУ ВШН «Альметьевский государственный  
технологический университет» Высшая школа нефти

## ПРИМЕНЕНИЕ СХЕМЫ БЕРНУЛЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ НЕФТЕГАЗОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Аннотация.** В статье рассматривается применение схемы независимых испытаний Бернулли для оценки надежности нефтегазового оборудования в условиях периодических проверок. Обосновывается, что биномиальная модель позволяет количественно оценить вероятность безотказной работы системы, состоящей из множества однотипных элементов. Приведена математическая модель расчета риска отказа при фиксированном количестве агрегатов, а также показана зависимость надежности от кратности резервирования. Дополнительно введен показатель «математического ожидания экономического ущерба» и показана связь схемы Бернулли с «пуассоновским потоком отказов». Результаты могут быть использованы для оптимизации периодичности технического обслуживания (ТО) и расчета нормативов аварийного запаса ЗИП. Сделан вывод о практической ценности схемы Бернулли для планирования технического обслуживания и минимизации аварийных простоев на объектах добычи и транспортировки углеводородов.

**Ключевые слова:** Схема Бернулли, биномиальное распределение, надежность, нефтегазовое оборудование, вероятность отказа, резервирование, математическое ожидание ущерба, пуассоновский поток.

### Введение

Нефтегазовая отрасль характеризуется высокими требованиями к промышленной безопасности. Отказ оборудования (например, центробежного насоса на кустовой площадке, газоперекачивающего агрегата или запорной арматуры на трубопроводе) может привести не только к экономическим потерям, но и к экологической катастрофе и человеческим жертвам.

В большинстве случаев состояние оборудования можно описать дихотомической переменной: «работоспособен» или «неработоспособен». Для анализа таких систем классическая теория вероятностей предлагает «схему Бернулли» – последовательность независимых испытаний, в каждом из которых событие (отказ) происходит с постоянной вероятностью  $p$ . Цель данной работы – показать, как формула Бернулли используется для прогнозирования надежности парка нефтегазового оборудования, оценки финансовых рисков и обоснования резервирования.

### Основная часть

#### 1. Математическая модель (схема Бернулли)

Пусть на объекте эксплуатируется  $n$  однотипных единиц оборудования (например,  $n$  электроцентробежных насосов). Вероятность отказа одного насоса за время  $t$  (например, за месяц) равна  $p$ . Согласно схеме Бернулли, вероятность того, что ровно  $k$  единиц оборудования откажут за это время, вычисляется по формуле:

$$p_n(k) = C_n^k \cdot p^k \cdot q^{n-k} \quad (1)$$

где:



$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!} - \text{число сочетаний}; \quad (2)$$

$p$  – вероятность отказа одного элемента;

$q=1-p$  – вероятность безотказной работы одного элемента.

### 2. Оценка безотказной работы всего парка

Для оператора важно, чтобы все оборудование работало ( $k=0$ )

$$P_n(0) = q^n \quad (3)$$

Пример: Если ( $p = 0.1$ ) (10% износа), а ( $n=5$ ), то  $P_5(0) = 0.9^5 \approx 0.59$ . Значит, с вероятностью 59% аварий не будет.

### 3. Оценка риска массового отказа

Аварийная ситуация часто возникает, если откажет хотя бы  $m$  единиц оборудования (например, 2 из 5):

$$P(k \geq m) = \sum_{k=m}^n C_n^k p^k q^{n-k} \quad (4)$$

Это позволяет рассчитать, нужно ли вызывать дополнительную ремонтную бригаду или увеличивать складской запас запчастей.

### 4. Применение для резервирования

Схема Бернулли обосновывает метод «скользящего резерва». Если основное оборудование дублируется, система откажет только тогда, когда откажут все основные и резервные элементы одновременно.

Пример: На компрессорной станции работают 2 основных агрегата и 1 резервный. Отказ станции наступает при отказе любых 3 агрегатов (так как резерв один). Вероятность простоя станции:

$$P_{\text{общ}} = C_3^3 \cdot p^3 \cdot q^0 = p^3 \quad (5)$$

При  $p = 0.2$  простой без резерва = 0.2, с резервом = 0.008 (улучшение в 25 раз).

Таблица 1

Сравнение схем резервирования при  $p = 0.1$

Схема резервирования	Формула надежности по Бернулли	Вероятность безотказной работы
Без резерва (1 эл.)	$1 - p$	0.900
Нагруженный резерв 1 из 2	$1 - p^2$	0.990
Скользкий резерв 2+1	$1 - p^3$	0.999

### 5. Математическое ожидание ущерба (финансовая модель)

Одна вероятность отказа – это хорошо, но для нефтегазового бизнеса важнее **ожидаемый убыток**. Пусть отказ одного оборудования влечет ущерб  $C_1$  (руб./час простоя, включая потерю добычи, ремонт и экологические штрафы). Тогда за период при  $k$  отказах суммарный ущерб:

$$S = C_1 \cdot k \quad (6)$$

Поскольку  $k$  – случайная величина (распределена по Бернулли), то **математическое ожидание ущерба**:

$$E[S] = C_1 \cdot E[k] = C_1 \cdot (n \cdot p) \quad (7)$$

Пример:

На кусте 10 скважин ( $n=10$ ) вероятность отказа ЭЦН за месяц  $p = 0.05$  ущерб от одного отказа = 500 000 руб.

$$E[k] = 10 \cdot 0.05 = 0.5 \text{ отказа/мес}$$

$$E[S] = 500000 \cdot 0.5 = 250000 \text{ руб/мес}$$



Это позволяет **финансово обосновать** профилактику: если ежемесячное техническое обслуживание всех насосов стоит 200 000 руб/мес, его выгодно делать; если 600 000 – нет.

### 6. Переход к потоку отказов (связь с распределением Пуассона)

Реальное нефтегазовое оборудование работает непрерывно. Если интервалы времени между отказами распределены экспоненциально (интенсивность отказов  $\lambda$ ) то число отказов за время  $t$  подчиняется **закону Пуассона**, который является предельным случаем схемы Бернулли при  $n \rightarrow \infty, p \rightarrow 0, np = \lambda t$ :

$$P(k) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} \quad (8)$$

Практическое правило:

- Если оборудование одно  $\rightarrow$  используем экспоненциальное распределение.
- Если много однотипных элементов  $\rightarrow$  схема Бернулли.
- Если время наблюдения велико и отказы редки  $\rightarrow$  Пуассон.

Пример для газоперекачивающего агрегата (ГПА):

Интенсивность отказов  $\lambda=0.01$  отказа/день. Вероятность ровно 2 отказов за 30 дней по Пуассону:

$$P(2) = \frac{(0.3)^2}{2} e^{-0.3} \approx 0.033 \quad (9)$$

По схеме Бернулли (если разбить дни на испытания) получится почти то же самое – это и есть **теорема Пуассона**.

### 7. Практические ограничения и компенсирующие меры

Схема Бернулли имеет ограничения, которые необходимо учитывать при анализе реального нефтегазового оборудования.

Таблица 2

Ограничения схемы Бернулли и способы их компенсации

Ограничение	Как компенсировать в нефтегазе
Независимость отказов	Ввести коэффициент группового отказа $\rho$ (например, 0.2) и скорректировать $p'=p+\rho$ для аварий с общей причиной (скачок давления, коррозия)
Постоянство $p$ во времени	Разбить срок службы на этапы: приработка ( $p$ убывает), нормальная эксплуатация ( $p$ const), старение ( $p$ растет)
Дискретное время	Переходить к пуассоновскому потоку для непрерывного мониторинга
Однотипность элементов	Использовать обобщенную схему Бернулли с разными $p_i$ для каждого типа оборудования

### Заключение

Проведенный анализ показывает, что схема Бернулли является базовым, но недостаточным инструментом для оценки надежности нефтегазового оборудования. Ее ценность:

1. Простота оценки парка из  $n$  одинаковых агрегатов без сложного моделирования.

2. Возможность рассчитать страховой запас (число отказов, которое не будет превышено с вероятностью 95%):

$$k_{95\%} = \max\{k: \sum_{i=0}^k P_n(i) \leq 0.95\} \quad (10)$$



Это позволяет определить, сколько запасных частей дерМесто для уравнения.жать на складе.

3. Финансовый риск через  $E[S] = npC_I$  – инструмент для обоснования бюджета на ТО и ремонт.

4. Обоснование резервирования по схеме «N+1» или «2N».

Ограничения:

Схема неприменима для последовательных цепочек оборудования (где работает формула надежности последовательного соединения) и при наличии сильных общих причин отказов (коррозия, скачки напряжения, ошибки персонала).

*Список литературы:*

1. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 2021. – 576 с. (Глава 5: Повторные независимые испытания).
2. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей. – М.: Эдиториал УРСС, 2019. – 448 с.
3. Острейковский В. А. Теория надежности: Учебник для вузов. – М.: Юрайт, 2020. – 380 с. (Раздел «Биномиальное распределение отказов»).
4. РД 08-200-98.Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности (в части расчета вероятности отказов технических устройств).
5. Smith D. J. Reliability, Maintainability and Risk: Practical Methods for Engineers. – Elsevier, 2021. – 350 p. (Chapter 6: Bernoulli trials in oil&gas).
6. ГОСТ Р 27.301-2011. Надежность в технике. Анализ надежности.
7. Козлов Б. А., Ушаков И. А.\*\* Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. – М.: Сов. радио, 1975. (Классика по схемам Бернулли в технике).
8. Лепихин А. М., Мочалов И. А.\*\* Оценка надежности нефтегазового оборудования с использованием биномиального распределения // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 7. – С. 84–87.

