

УДК 627.132: 65.011.03

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ  
ЖИВУЧЕСТИ ПЛОТИН ПРИ АВАРИЯХ**

***Д.В. Стефанишин***

*Институт телекоммуникаций и глобального  
информационного пространства НАН Украины, г. Киев,  
доктор технических наук*

Научный и практический интерес к использованию статистических оценок при анализе аварийности плотин существует давно. Еще в 1786 г. в Германии вышла книга И. Зильбершлага «Аварии на плотинах», в которой, по-видимому, впервые были представлены результаты статистического анализа аварийности плотин [1]. В дальнейшем попытки научной систематизации статистики аварий на плотинах осуществлялись неоднократно – разными специалистами и в разных странах.

В частности, статистическим анализом аварий на плотинах в разные годы занимались такие всемирно известные ученые-гидротехники как М. Хиндерлендер (США, 1933 г.), А. Гельфер (СССР, 1936 г.), Дж. Шерард (США, 1963 г.), Э. Грунер (Швейцария, 1963, 1967, 1973 гг.), А. Губэ (Франция, 1979 г.), Г. Маринье (Канада, 1982 г.), Х. Блайнд (Австралия, 1983 г.), А.Ф. Сильвейра (Бразилия, 1983 г., 1990 г.), Ж.Л. Серафим (Бразилия, 1989 г.), М. Рациу (Румыния, 1989 г.) и другие [1-23].

Начиная с конца 60-х годов прошлого столетия, большую работу в области анализа аварий на плотинах, в том числе и статистического, проводит Международная комиссия по большим плотинам (ICOLD). Для этого в рамках ICOLD был создан специализированный комитет – «Технический комитет по авариям» (далее – Комитет). Наименование Комитета в разные годы изменялось в зависимости от поставленных перед ним задач, но цель преследовалась одна и та же – всестороннее изучение проблем аварийности на плотинах с целью повышения их надежности и безопасности. В 70-е годы Комитет именовался как «Комитет по старению плотин и водохранилищ», в 80-е и 90-е годы – «Комитет по статистическому анализу аварий на плотинах», в конце 90-х Комитет стал именоваться как «Комитет по безопасности плотин».

Благодаря усилиям ICOLD сбор данных об авариях на плотинах и их анализ начали осуществляться на международном уровне, централизованно, с участием полномочных представителей стран-участниц Комиссии, которые были представлены в Комитете. Одновременно со сбором данных об авариях в рамках Комитета начал создаваться международный реестр больших плотин. Это существенно расширило возможно-

сти для формирования репрезентативных статистических выборок данных, необходимых для анализа аварийности плотин, в частности в зависимости от их типа и конструкции.

Первый доклад Комитета «Уроки аварий на плотинах» («Leçons tirées des accidents de barrages») в качестве Генерального доклада был представлен в 1974 г. на конгрессе ICOLD в Париже [6]. В докладе были проанализированы собранные на конец 1965 г. данные о 534 случаях аварий (включая повреждения и разрушения) плотин.

В 1984 г. под руководством проф. М. Роша (Португалия) был опубликован доклад Комитета «Старение плотин и водохранилищ» («Deterioration of dams and reservoirs») [12]. В докладе рассматривались 1105 случаев аварий. Данные об авариях были собраны с участием 33 стран, которые зарегистрировали около 14700 больших плотин – сооружений высотой не менее 15 м либо с водохранилищами не менее 1 млн. м<sup>3</sup>. Впервые анализировалась аварийность на плотинах в зависимости от их типа, высоты, материалов, вида основания, периода строительства, продолжительности эксплуатации сооружений.

В 1995 г. Комитетом был выпущенный специализированный Бюллетень 99 «Dam failures – statistical analysis» [2], посвященный вопросам статистического анализа данных об авариях на плотинах. При его подготовке были использованы данные по 17405 зарегистрированным плотинам. При анализе, в частности, выделялись такие обстоятельства как тип, конструкция плотины, время, когда состоялась авария (при строительстве, первом наполнении водохранилища и т.п.), и возможные причины возникновения аварии.

В настоящее время среди специалистов уже нет сомнений относительно полезности статистических оценок аварийности плотин. Конечно, статистические оценки вероятностей аварий на плотинах не позволяют учитывать индивидуальные особенности отдельных гидросооружений, условий их эксплуатации и т.п., и, соответственно, не могут непосредственно использоваться в качестве оценок надежности индивидуальных плотин в каждом конкретном случае. Однако, как некоторые осредненные, обобщенные оценки аварийности для совокупности плотин (a portfolio), которые, например, относятся к определенному типу, конструкции, эти оценки, безусловно, заслуживают внимание.

В настоящей статье на основе статистики аварий сделана попытка проанализировать живучесть плотин при авариях в зависимости от вида материалов, из которых они выполнены (бетонные и из грунтовых материалов), и типа (гравитационные, арочные, контрфорсные, земляные, каменно-земляные, каменно-набросные).

Под живучестью плотин далее будет пониматься их способность не разрушаться и удерживать напорный фронт при авариях, нарушениях и повреждениях.

Живучесть плотин как свойство определяется многими факторами. Значение при этом могут иметь тип и конструкция плотины. Можно предположить, что одни плотины в зависимости от их типа, конструкции, материалов могут признаваться более живучими гидросооружениями, другие – менее живучими, что может влиять на окончательный выбор типа и конструкции индивидуальной плотины с учетом требований по безопасности в процессе ее вариантного проектирования.

Живучесть плотин устанавливалась относительно так называемых инцидентов (incidents) и собственно аварий (accidents), которые завершились разрушениями или серьезными повреждениями гидросооружений, с необходимостью аварийной сработки водохранилища, проведения ремонтно-восстановительных работ и т.п. При этом под инцидентами, следуя терминологии ICOLD, понимались нарушения, которые приводили или могли привести к авариям.

При формировании статистических выборок использовались данные, которые отображены в докладах Комитета по авариям на плотинах и в Бюллетене 99 ICOLD [2]. Учитывались также статистические данные об авариях, приводимые в Приложении 1 к Бюллетеню 119 ICOLD «Classification of reported failures» [22].

В связи с разнородностью имеющихся статистических данных об авариях расчетные выборки включали разное количество плотин. В частности, случаи всех зарегистрированных нарушений (инцидентов) на плотинах, к которым были отнесены также повреждения и разрушения, рассматривались в выборке, состоящей из 17405 плотин. Случаи серьезных повреждений и разрушений (accidents) рассматривались в выборке, состоящей из 17100 плотин.

При анализе использовалась следующая классификация аварий плотин по последствиям, принятая ICOLD:

P-1 – разрушение плотины катастрофического характера с прорывом напорного фронта, в результате чего пришлось отказаться от восстановления гидросооружения (учтено 84 случая таких аварий);

P-2 – разрушение катастрофического характера, после чего плотина восстанавливалась (118 случаев, из которых 24 аварии с прорывом напорного фронта);

P-1 – повреждение плотины, которая находилась в эксплуатации и не разрушилась благодаря опорожнению водохранилища (154 случая);

P-2 – повреждение плотины при введении в эксплуатацию, которое не привело к ее разрушению благодаря своевременному опорожнению водохранилища (70 случаев);

P-3 – повреждение плотины при строительстве, которое не помешало восстановить гидросооружение и заполнить водохранилище после ремонта (40 случаев).

## Предотвращение аварий зданий и сооружений

Общие статистические данные относительно всех зарегистрированных нарушений (инцидентов) на плотинах и различных аварий в соответствии с приведенной выше классификацией аварий для статистической выборки с 17100 плотин, а также статистические оценки вероятностей нарушений и аварий, которые были получены автором на интервале в 150 лет, приводятся в табл. 1, 2.

Таблица 1

Статистические вероятности возникновения нарушений (инцидентов) и аварий на плотинах (оценки получены на интервале 150 лет для выборки из 17100 плотин)

| Вид инцидента/аварии                   | Количество | Полные вероятности | Ежегодные вероятности, год <sup>-1</sup> |
|--|------------|--------------------|--|
| Нарушения                              | 1623       | 0,0930             | $6,51 \cdot 10^{-4}$                     |
| Серьезные нарушения                    | 1369       | 0,0785             | $5,45 \cdot 10^{-4}$                     |
| Все аварии                             | 466        | 0,0273             | $1,84 \cdot 10^{-4}$                     |
| Повреждения                            | 264        | 0,0154             | $1,04 \cdot 10^{-4}$                     |
| Разрушения                             | 202        | 0,0118             | $7,92 \cdot 10^{-5}$                     |
| Разрушения с прорывом напорного фронта | 108        | 0,0063             | $4,22 \cdot 10^{-5}$                     |

Таблица 2

Статистические вероятности возникновения аварий на плотинах (оценки получены на интервале 150 лет для выборки из 17100 плотин)

| Вид аварии | Количество аварий | Полные вероятности | Ежегодные вероятности, год <sup>-1</sup> |
|------------|-------------------|--------------------|--|
| P-1        | 84                | 0,0049             | $3,28 \cdot 10^{-5}$                     |
| P-2        | 118               | 0,0069             | $4,62 \cdot 10^{-5}$                     |
| П-1        | 154               | 0,0090             | $6,03 \cdot 10^{-5}$                     |
| П-2        | 70                | 0,0041             | $2,74 \cdot 10^{-5}$                     |
| П-3        | 40                | 0,0023             | $1,56 \cdot 10^{-5}$                     |
| Все аварии | 466               | 0,0273             | $1,84 \cdot 10^{-4}$                     |

Приведенные в табл. 1, 2 статистические оценки вероятностей реализации различных по последствиям аварийных событий на плотинах убедительно свидетельствуют о том, что плотинам присуща живучесть, поскольку не все нарушения заканчивались авариями и не все аварии сопровождались разрушением и прорывом напорного фронта.

Влияют ли на живучесть плотин их тип, вид материалов, конструкция? Ответ на этот вопрос важен с точки зрения оценки, какие плотины более безопасны – бетонные или из грунтовых материалов.

Статистика аварий показывает, что в процентном отношении меньше всего инцидентов фиксировалось на бетонных плотинах гравита-

ционного типа (небольшую часть из них составляют также плотины из каменной кладки), а именно до 3,1% от общего количества гидросооружений этого типа. Далее идут арочные (4,4%) и контрфорсные плотины (5,1%). Среди плотин из грунтовых материалов меньше всего различного рода нарушений фиксировалось на земляных плотинах (6,7%). Со значительным разрывом далее следуют каменно-набросные (10,9%) и каменно-земляные плотины (до 17% от общего количества плотин этого типа).

В то же время каменно-земляные плотины по статистике демонстрируют высокую (по сравнению с 17% уровнем «повреждаемости») живучесть против аварий, если учесть то, что только 4% от всех зарегистрированных ICOLD каменно-земляных плотин испытали аварии.

Наиболее надежными против аварий по статистике следует признать арочные плотины (1,5% аварий из общего их количества), дальше идут гравитационные плотины (1,9%) и контрфорсные (2,2%). Наиболее предрасположенными к авариям по статистике оказываются каменно-набросные плотины (около 5% аварий от общего количества плотин данного типа). Меньше всего аварий среди плотин из грунтовых материалов произошло на земляных плотинах (2,5% от общего их количества).

Для количественной оценки живучести плотин на основе статистических оценок аварийности предлагается использовать следующий статистический коэффициент:

$$K_v = 1 - \frac{n_{acc}}{n_{inc}},$$

где  $n_{acc}$ ,  $n_{inc}$  – количество плотин, на которых произошли аварии, и общее количество нарушений на плотинах определенного типа, которые предшествовали этим авариям, соответственно.

Здесь коэффициент живучести  $K_v$  определяется как дополнение к единице статистического коэффициента аварийности, который был предложен А.Ф. Сильвейрой [20]. Назовем  $K_v$  статистическим коэффициентом живучести плотин против перехода инцидентов в аварии.

Так, согласно данным ICOLD [2] на 1984 г. среди  $n_{inc} = 1369$  серьезных нарушений на грунтовых плотинах  $n_{acc} = 82$  случая заканчивались прорывом напорного фронта. Для бетонных плотин их количество, соответственно, составляет:  $n_{inc} = 734$ ,  $n_{acc} = 26$ . Получаем статистические коэффициенты живучести против прорыва напорного фронта: для грунтовых плотин – 0,94, для бетонных плотин – 0,96. Эти оценки могут свидетельствовать о меньшей живучести грунтовых плотин по сравнению с бетонными плотинами против прорыва напорного фронта.

## Предотвращение аварий зданий и сооружений

В табл. 3 приводятся статистические вероятности инцидентов и аварий на плотинах основных типов, а в табл. 4 – статистические коэффициенты живучести плотин соответствующих типов против перехода инцидентов в аварии.

Таблица 3

Статистические вероятности инцидентов (нарушений и аварий)  
на плотинах (оценки получены автором на интервале 150 лет)

| Плотины           | Количество инцидентов, % | Вероятности инцидентов |                              |
|-------------------|--------------------------|------------------------|------------------------------|
|                   |                          | Полные                 | Ежегодные, год <sup>-1</sup> |
| Гравитационные    | 3,1                      | 0,031                  | 0,000210                     |
| Арочные           | 4,4                      | 0,044                  | 0,000300                     |
| Контрфорсные      | 5,1                      | 0,051                  | 0,000349                     |
| Земляные          | 6,7                      | 0,067                  | 0,000462                     |
| Каменно-земляные  | 17,0                     | 0,170                  | 0,001241                     |
| Каменно-набросные | 10,9                     | 0,109                  | 0,000769                     |

Таблица 4

Статистические вероятности аварий на плотинах разных типов  
и коэффициенты живучести  $K_v$  против перехода инцидентов в аварии

| Плотины           | Количество аварий, % | Вероятности аварий |                              | $K_v$ |
|-------------------|----------------------|--------------------|------------------------------|-------|
|                   |                      | Полные             | Ежегодные, год <sup>-1</sup> |       |
| Гравитационные    | 1,9                  | 0,019              | 0,000128                     | 0,39  |
| Арочные           | 1,5                  | 0,015              | 0,000101                     | 0,66  |
| Контрфорсные      | 2,2                  | 0,022              | 0,000148                     | 0,57  |
| Земляные          | 2,5                  | 0,025              | 0,000169                     | 0,63  |
| Каменно-земляные  | 4,0                  | 0,040              | 0,000272                     | 0,77  |
| Каменно-набросные | 5,0                  | 0,050              | 0,000342                     | 0,54  |

В табл. 5 приводятся результаты расчетов ежегодных статистических вероятностей возникновения нарушений, аварий и разрушительных аварий на бетонных плотинах. В табл. 6 приводятся статистические коэффициенты живучести бетонных плотин против перехода нарушений в аварии  $K_{v(FI)}$ , нарушений в разрушительные аварии  $K_{v(AI)}$ , аварий в разрушительные аварии  $K_{v(AF)}$ . В табл. 7 приводятся осредненные статистические характеристики аварийности грунтовых плотин. Все оценки были получены на интервале 150 лет. Использовались данные [2, 22, 23].

## Предотвращение аварий зданий и сооружений

Таблица 5

Ежегодные вероятности нарушений, аварий и разрушительных аварий на бетонных плотинах

| Типы плотин          | Все нарушения | Все аварии | Разрушительные аварии |
|----------------------|---------------|------------|-----------------------|
| Гравитационные       | 0,000210      | 0,000128   | 0,000041              |
| Арочные              | 0,000300      | 0,000101   | 0,000022              |
| Контрфорсные         | 0,000349      | 0,000148   | 0,000120              |
| Все бетонные плотины | 0,000239      | 0,000125   | $4,54 \cdot 10^{-5}$  |

Таблица 6

Статистические коэффициенты живучести бетонных плотин против перехода нарушений в аварии  $K_{v(F|I)}$ , нарушений в разрушительные аварии  $K_{v(A|I)}$ , аварий – в разрушительные аварии  $K_{v(A|F)}$

| Типы гребель         | $K_{v(F I)}$ | $K_{v(A I)}$ | $K_{v(A F)}$ |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|
| Гравитационные       | 0,39         | 0,80         | 0,67         |
| Арочные              | 0,66         | 0,92         | 0,78         |
| Контрфорсные         | 0,57         | 0,65         | 0,18         |
| Все бетонные плотины | 0,45         | 0,81         | 0,65         |

Таблица 7

Ежегодные статистические вероятности возникновения аварий и коэффициенты живучести грунтовых плотин  $K_{v(F|I)}$ ,  $K_{v(A|I)}$ ,  $K_{v(A|F)}$

| Все нарушения | Все аварии | Разрушительные аварии | $K_{v(F I)}$ | $K_{v(A I)}$ | $K_{v(A F)}$ |
|---------------|------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| 0,000824      | 0,000261   | $7,78 \cdot 10^{-5}$  | 0,68         | 0,90         | 0,70         |

По результатам проведенных исследований можно утверждать, что живучесть плотин зависит от вида материалов и типа гидросооружений, а также от характера протекания аварий.

Следует отметить более высокую живучесть бетонных плотин в сравнении с плотинами из грунтовых материалов, когда речь идет об авариях, связанных с прорывом напорного фронта. Однако в контексте аварийности в целом, с учетом мероприятий, которые обычно реализуются при аварийных ситуациях, грунтовые плотины в сравнении с плотинами из бетона оказываются более живучими. Так, статистические коэффициенты живучести грунтовых плотин при нарушениях против перехода в аварии в зависимости от типа гидросооружений находятся в пределах 0,54-0,77, тогда как для бетонных плотин – в пределах 0,39-0,66.

Наименьшая живучесть при нарушениях присуща бетонным гравитационным плотинам (коэффициент живучести 0,39). Характерно, что по статистике нарушения на гравитационных плотинах случались в наименьшем количестве среди всех типов плотин, а аварии – лишь немного чаще, чем на арочных плотинах. Однако полученные нами результаты указывают на то, что хотя нарушения на гравитационных плотинах случались реже всего, они имели наиболее серьезные последствия.

В то же время, именно каменно-земляные плотины, которые согласно статистике чаще всего повреждались, следует признать наиболее живучим типом плотин при нарушениях. В мире успешно строятся и эксплуатируются сверхвысокие плотины (высотой до 300 м) этого типа в чрезвычайно сложных инженерно-геологических условиях.

Высокую живучесть при нарушениях демонстрируют также земляные плотины, которые являются наиболее распространенным типом плотин в мире. В последнее время, особенно в информационном пространстве Украины, часто распространяется откровенно спекулятивная информация о недостаточной надежности гидросооружений по причине того, что большинство плотин в стране являются земляными, а они будто бы не могут быть достаточно надежными. Однако полученные нами коэффициенты живучести свидетельствуют в пользу земляных плотин как одного из наиболее надежных и безопасных типов гидросооружений.

### Библиографический список

1. Беллендир Е.Н., Ивашинцов Д.А., Стефанишин Д.В. и др. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений. – СПб.: ОАО ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2003, 2004. Т. 1.
2. ICOLD. Dam failures – statistical analysis. Bull. No. 99. – Paris. 1995.
3. ICOLD. The use of risk analysis to support dam safety decisions and management. Trans. of the 20-th Int. Congress on Large Dams. Vol. 1. Q. 76. 19-22 September. – Beijing-China. 2000.
4. Векслер А.Б., Ивашинцов Д.А., Стефанишин Д.В. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений. – СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2002.
5. Gruner E. Dam disaster. Proc. ICE. Vol. 24. – London, 1963. P. 47-60.
6. Leçons tirées des accidents de barrages// Gen. Rep. ICOLD. – Paris, 1974.
7. Goubet A. Risques associés aux barrages// La Houille Blanche. 1979. N.8. P. 475-490.
8. Rißler P. Zur Sicherheitsdiskussion über Talsperrendämme// Wasserwirtschaft. 1981. V.71. №7/6. S. 200-205.
9. Marinier G. Safety of dams in operation.// Trans. of the 14-th Cong. on Large Dams. 1982. – Rio de Janeiro. Vol. 1. Gen. Rep. Q52. P. 1471-1510.



10. Blind H. The Safety of Dams// Int. Water Power & Dam Construction. 1983. Vol. 35. No. 5. P. 17-21.
11. Silveira A.F. Deterioration in dams and reservoirs// Proc. of the 20-th IAHR Congress. – Moscow, 1983. Vol. 2. P. 443-456.
12. ICOLD. Deterioration of dams and reservoirs. A.A. Balkema, 1984.
13. Kalystyan E.S. Statistical analysis of distribution of concrete dam foundation failures// Proc. of the Int. Conf. on Safety of Dams/ – Coimbra. 1984. P. 311-319.
14. Гогоберидзе М.И., Микашвили Ю.Н. и др. Риск повреждения и разрушения грунтовых плотин// Гидротехническое строительство. 1984. №4. С. 35-38.
15. Lebreton A. Les ruptures et accidents graves de barrages// La Houille Blanches. 1985. 6/7. P. 529-544.
16. Bury K.V., Kreuzer H. The assessment of risk for a gravity dam// Int. Water Power & Dam Construction. 1986. Vol. 38. No.12. P. 36-40.
17. Розанов Н.С., Царев А.И. и др. Аварии и повреждения больших плотин/ Под ред. А.А. Борового. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
18. Rațiu M., Constantinescu C. Comportanea construcțiilor și amenajărilor hidrotehnice. Editura Tehnică. – București. 1989.
19. Serafim J.L., Coutinho-Rodrigues J.M. Statistics of dam failures: a preliminary report// Int. Water Power & Dam Construction. 1989. Vol. 41. No. 4. P. 30-34.
20. Silveira A.F. Some considerations on the durability of dams// Int. Water Power & Dam Construction. 1990. Vol. 42. No. 2. P. 20-27.
21. ICOLD. Ageing of dams and appurtenant works. Bull. No. 93. Paris. 1994.
22. ICOLD. Rehabilitation of dams and appurtenant works – State of the art and case histories. Bulletin 119. Appendix 1. Classification of reported failures. – Paris, 2001.
23. Стефанишин Д.В. Прогнозирование аварийности проектируемых и строящихся плотин на основе результатов статистического анализа произошедших аварий// Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. 2008. Т.251. С. 3-9.