

УДК 502/504:624.131.1:626/627

**В. Я. Жарницкий**, доктор техн. наук**Н. Ф. Жарницкая**, инженер

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

## К ВОПРОСУ ЭКОНОМИКИ НАДЕЖНОСТИ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА УКЛАДКИ ГРУНТОВ В ТЕЛО НАПОРНЫХ ГРУНТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ И ПРОГНОЗА ИХ ДЕФОРМАЦИЙ

*Расчет экономической эффективности разработанных методов обеспечения качества укладки грунтов в тело плотины и прогноза их деформаций предлагается выполнять с учетом параметра, который оценивает изменение надежности сооружения от реализации предложенных мероприятий.*

*It is proposed to fulfil an estimation of the economic efficiency of the developed methods of quality maintenance of ground laying into the dam body and prognosis of their deformation taking into account the parameter which evaluates the structure reliability changes from realization of the proposed measures.*

Расчет показателя экономической эффективности, произведенный авторами на основе теоретических и экспериментальных исследований методов оперативного обеспечения качества укладки глинистых грунтов и горной массы из известняка в тело каменно-земляных плотин и прогноза деформаций этих сооружений по качеству выполненного уплотнения грунта, является непростой задачей, так как для принятия тех или иных управленческих решений при достижении поставленных целей используют, как правило, стандартные экономические показатели. Поставленные цели определяют и характер показателей эффективности. Например, если цель — достичь выгоды при использовании производственного предприятия, то рассчитывать необходимо такие показатели, как чистая приведенная прибыль, доходность, объем производства и т. д.

В рамках задач исследования конечной целью являлось повышение надежности и долговечности каменно-земляных плотин на этапе их строительства за счет эффективных методов контроля качества укладки грунтов и прогноза деформаций тела и подошвы грунтовых

сооружений. Отсюда и набор показателей экономической эффективности должен информативно отражать аспект увеличения надежности. Рассмотрим, какие показатели надежности могут быть использованы в качестве величин экономической эффективности.

Проблемы надежности с различных позиций рассматривались в работах по нескольким научным направлениям. Математическое обоснование теории надежности разрабатывали известные математики Б. В. Гнеденко, А. Д. Соловьев и др. [1–3]. Однако наиболее близка к заданному авторами согласованию экономического анализа и задач технической надежности является позиция, реализуемая в работе В. И. Эдельмана [4]. Рассмотрим основные положения указанных теорий.

Классическая теория надежности рассматривается обычно в контексте технических проблем. Согласно ГОСТ 13377–75, надежность есть свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в определенных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического об-

служивания, ремонта и транспортирования. Данное понимание надежности принимается в классической теории технической надежности, математические основы которой получены в работах Б. В. Гнеденко, Б. К. Беляева, А. Д. Соловьева и др. Основу этой теории составляет расчет и поиск наиболее оптимальных в некотором смысле условий и правил эксплуатации объектов. При этом объектами могут быть изделия, системы и их элементы, в частности сооружения, установки, машины и т.д.

Фундаментальными понятиями в теории надежности являются отказ и безотказность. Согласно ГОСТ 13377-75, отказ — это «событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта». Работоспособное состояние — состояние объекта, при котором он выполняет заданные функции, сохраняя значения заданных нормативов в пределах установленной документацией. Достаточно часто рассматривают такой дефект: временное изменение параметра изделия (объекта), в результате чего некоторый период времени оно (он) не будет функционировать. Такие дефекты называются сбоями.

Под безотказностью объекта понимают его способность сохранять работоспособность в течение некоторого времени. В качестве показателей надежности используют вероятность безотказной работы, вероятность безребойной работы, интенсивность отказа, среднее время безотказной работы и т. п. Эти показатели рассчитывают для изделий, которые не подлежат восстановлению. В случае, если изделия могут быть подвергнуты ремонту, целесообразно рассматривать показатели ремонтпригодности: вероятность восстановления, интенсивность восстановления, среднее время восстановления, коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности. Определения, основные формулы, а также варианты их использования для решения задачи приведены в таблице.

Учитывая замечания, указанные в таблице, необходимо отметить, что при оценке надежности мало внимания уделяется вопросу оптимизации затрат на проведение мероприятий, повышающих эту надежность, либо вопрос оптимизации экономических показателей отодвигается на второй план. Существует мнение, что экономия средств, идущих на обеспечение надежности технических систем, — один из факторов, способствующих техногенным катастрофам. Таким образом, использование методов классической теории надежности в поставленной авторами задаче является ограниченным. Однако ущерб — это не только прямые потери и затраты, но и нереализованные возможности использования объекта, связанные с отказами технических систем.

Задачи оптимизации можно рассматривать как итоговые в цепи задач экономики надежности технических систем. Авторы предлагают рассматривать два варианта постановки задач оптимизации.

Вариант 1. Пусть приведенные затраты на обеспечение заданной надежности технической системы составляют  $Z_1$  в год, годовой ущерб от отказов (без планируемых мероприятий по защите) —  $Y_1$  в год. При осуществлении мероприятий по защите от отказов прогнозируются приведенные затраты  $Z_{зм}$ , оценка ущерба в результате проведения таких мероприятий ожидается равной  $Y_2$ . Мероприятия по защите технической системы от отказов эффективны в случае выполнения условия

$$(Z_{зм} + Y_2) < Y_1.$$

Таким образом, заданная величина надежности технической системы при осуществлении такого рода мероприятий будет достигнута при меньшей величине приведенных затрат, т.е.

$$(Z_{зм} + Y_2 + Z_1) < (Y_1 + Z_1). \quad (1)$$

Вариант 2. Определим  $Z_1$  как приведенные затраты на обеспечение надежности,  $Y_1$  — годовой ущерб системы при ее отказах,  $H_1$  — показатель

Некоторые показатели в технической теории надежности

Показатель и его определение	Расчетные формулы и аргументы	Применимость к исследуемому вопросу
Вероятность безотказной работы $P(t)$ – это вероятность того, что в заданном интервале времени $t$ в изделии не возникает отказа	$P(t) = \frac{N - N_0}{N},$ где $N$ – число изделий, поставленных на испытание (эксплуатацию); $N_0$ – число изделий, отказавших в течение времени $t$	Очевидно, для оценки эффективности необходимо рассмотреть две вероятности: а) вероятность, вычисленную для плотин, при строительстве которых не использовались предложенные мероприятия, – базовая вероятность; б) вероятность, вычисленную для плотин, при строительстве которых такие мероприятия использовались. Второй показатель на данный момент рассчитать невозможно. При расчете первого показателя будут использоваться неоднородные данные, поэтому он не будет отражать реального положения дел в рассматриваемом аспекте
Вероятность бессбойной работы $P_{сб}(t)$ – это вероятность того, что в заданном интервале времени $t$ будет отсутствовать сбой в изделии	$P_{сб}(t) = \frac{N - N_0}{N},$ где $N$ – число изделий, поступивших на эксплуатацию; $N_0$ – число изделий, в которых произошел сбой в течение времени $t$	
Среднее время безотказной работы $T$ – это математическое ожидание работы изделия до первого отказа	$T = \int_0^{\infty} P(t) dt$	
Интенсивность отказа $\lambda(t)$ – это условная плотность вероятности возникновения отказа не восстанавливаемого до определенного момента времени объекта, при условии, что до этого момента отказ не возник	$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{ср}(\Delta t)},$ где $n(\Delta t)$ – число отказавших изделий в интервал времени $\Delta t$ ; $N_{ср}(\Delta t)$ – среднее число исправных изделий в интервале времени $\Delta t$	
Вероятность восстановления $S(t)$ – это вероятность того, что отказавшее изделие будет восстановлено в течение времени $t$	$S(t) = \frac{n_{в}}{N_{ов}},$ где $n_{в}$ – число изделий, время восстановления которых было меньше заданного времени $t$ ; $N_{ов}$ – число изделий, оставшихся на этапе восстановления	Данные показатели имеет смысл рассматривать лишь для анализа эксплуатационной, а не строительной надежности
Интенсивностью восстановления $M(t)$ называют условную плотность распределения времени восстановления для момента времени $t$ при условии, что до этого момента восстановления изделия не произошло	$M(t) = \frac{n_{в}(\Delta t)}{N_{в.ср}(\Delta t)},$ где $n_{в}(\Delta t)$ – число восстановленных изделий за время $\Delta t$ ; $N_{в.ср}(\Delta t)$ – среднее число изделий, которые были восстановлены в течение времени $\Delta t$	
Среднее время восстановления $T_{в}$ – это натуральная величина ожидания восстановления	$T_{в} = \int_0^{\infty} [1 - S(t)] dt$	
Коэффициент готовности $K_{Г}(t)$ – это вероятность того, что изделие работоспособно в произвольный момент времени $t$	Стационарная оценка: $K_{Г} = (\sum t_{pi}) / (\sum t_{pi} + \sum t_{bi}),$ где $t_{pi}$ – $i$ -й интервал времени исправной работы изделия; $t_{bi}$ – интервал времени восстановления изделия; $n$ – число отказов изделия	

уровня надежности технической системы при затратах в год. Условием эффективности затрат на осуществление мероприятий по защите технической системы от отказов является выполнение неравенства (1). Осуществление рассматриваемых мероприятий при

том же уровне надежности обеспечивает экономию суммарных затрат:  $(Y_1 + Z_1) - (Z_{зм} + Y_2 + Z_1) = \Delta Z.$

За счет этой экономии может быть обеспечен более высокий уровень надежности технической системы, т. е. если  $Z_1$  в год обеспечивает надежность

$H_1$ , то приращение затрат  $\Delta Z$  в год обеспечивает приращение надежности  $\Delta H$ :

$$F(Z_1) = H_1; F(Z_1 + \Delta Z) = H_1 + \Delta H, \quad (4)$$

где  $F$  — некоторая зависимость между величиной затрат на обеспечение надежности и самой надежностью технической системы.

Другой подход — относить надежность экономической системы к характеристикам планирования производства, определяющим уменьшение рисков непредвиденных затрат, направленных на обеспечение бесперебойной работы сооружения. В западной практике этот подход реализуется в проведении так называемого сценарного анализа, или стресс-анализа (например, анализа монтажа буровых платформ) [5]. Аналитики вырабатывают возможные варианты развития климатической, геологической ситуации, а специально подобранный персонал рассчитывает эффект от применения возможных мероприятий в случае возникновения нештатной ситуации. В задачу аналитиков входит системный анализ совокупности предлагаемых мероприятий и выбор наиболее оптимальных. Таким образом, возникает заготовленный пакет рекомендаций-планов для реализации тех или иных строительных процедур в случае негативной смены условий внешней и внутренней сред.

К сожалению, ни один из рассматриваемых подходов не удовлетворяет условиям поставленной задачи. Оценка надежности экономической системы как характеристики планирования производства, определяющей уменьшение рисков непредвиденных затрат, направленных на обеспечение бесперебойной работы сооружения, не предполагает исследования капитальных строений. Стресс-анализ требует сложной методической работы, «привязанной» к конкретному сооружению, геологическим особенностям и режиму эксплуатации объекта, что выходит за рамки исследования процесса строительства.

В полученных авторами решениях и разработанных методах предполагается сокращение времени и объема работ

для достижения не меньшего проектного уровня надежности. Такое утверждение основано на логических выводах и результатах, которые являются базовыми при разработке предлагаемых решений и методов и подтверждены практикой строительства каменно-земляных плотин «Саура» ( $H = 78$  м, 1990–1996 гг.), «Абраш» ( $H = 50$  м, 1994–1995 гг.), «Сахаби» ( $H = 68$  м, 1999–2003 гг.) и «Эль Хвез» ( $H = 42$  м, 2001–2003 гг.) в Сирийской Арабской Республике. Такой аспект в расчетах Эдельмана не рассматривается.

Под эффективностью авторы вынуждены принимать не классическое определение эффективности финансовой операции, рассчитываемое как соотношение фактической прибыли и затраченных на получение этой прибыли средств, а финансовое выражение ожидаемой разницы в затратах по двум вариантам.

Подзадачи, решение которых позволит увеличить экономическую эффективность:

разработка оперативных методов определения строительных геотехнических показателей глинистых грунтов (параметров Проктора, прочности, водопроницаемости), горной массы из известняков (плотности и прочности уплотненного скального материала, кубиковой прочности породы) и усовершенствование системы оперативного контроля качества укладки глинистых грунтов («чистых» и содержащих включения) в противодиффузионные элементы и горной массы из известняков в упорные призмы плотин. В результате применения полученных методов уменьшается время выполнения контролирующих мероприятий, снижаются объемы рабочего времени персонала, производящего контроль, а также квалификационные требования к нему;

разработка методов прогноза деформации тела плотины по качеству выполненного уплотнения грунта и перемещений подошвы грунтового сооружения. Использование данных методов изменяет объем работ, связанный с до-

стижением проектных параметров напорного грунтового сооружения.

Решение этих подзадач является, безусловно, экономически эффективным при выполнении двух условий. Во-первых, техническая надежность конструкций не должна уменьшаться. Во-вторых, разность между стоимостью

строительства объекта, выполненного без применения данных мероприятий  $D_{\text{баз}}$ , и стоимостью строительства объекта, выполненного с применением данных мероприятий  $D$ , должна быть положительной. В противном случае для расчета эффективности необходимы определенные условия (рис. 1).

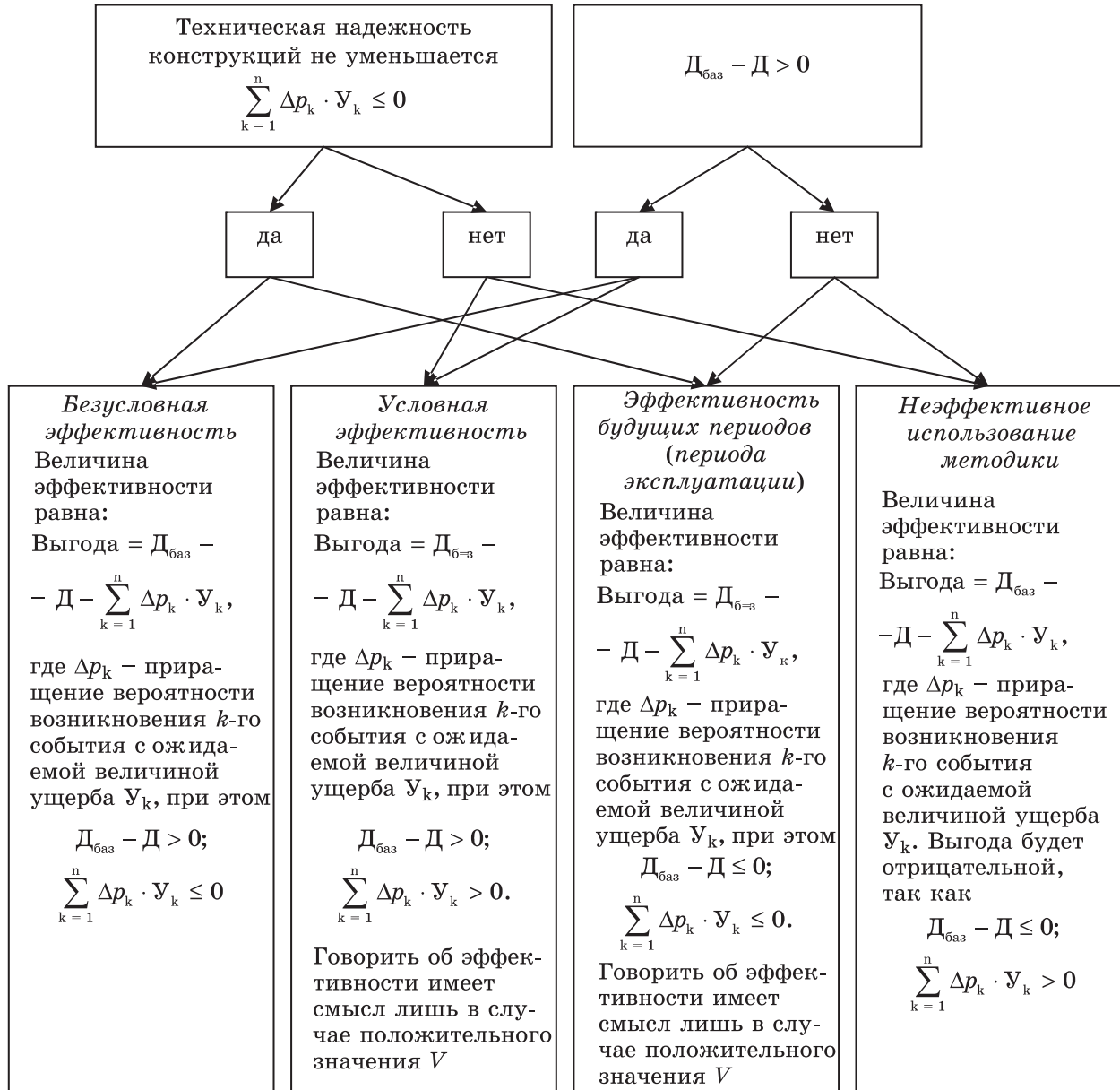


Рис. 1. Принцип расчета эффективности

Общая формула для расчета выгоды мероприятий будет иметь следующий вид:

$$\text{Выгода} = D_{\text{баз}} - D - \sum_{k=1}^n \Delta p_k Y_k, \quad (5)$$

где  $\sum_{k=1}^n \Delta p_k Y_k$  — величина, с помощью которой оценивают изменение надежности при реализации предлагаемых мероприятий.

Рассмотрим метод оценки ущерба-прибыли от увеличения надежности. В нашем случае имеет смысл применять так называемый экспертный метод. Эксперты должны ответить на следующие вопросы: указать список событий аварийного характера, вероятность происхожде-

ния которых изменяется в результате применения разработанных мероприятий, их число будет равно  $n$ ;

дать оценку величины изменения ожидаемой частоты происхождения каждого из аварийных событий —  $\Delta p_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ ;

дать оценку приведенной величины ущерба в случае безусловного происхождения аварийного события  $Y_k$ .

Если вероятность происхождения  $k$ -го события аварийного характера увеличивается, то  $\Delta p_k > 0$ , иначе  $\Delta p_k \leq 0$ . Следовательно, величина потерь от ущерба такого события в случае  $\Delta p_k > 0$  будет положительной и равной  $Y_k \cdot \Delta p_k$ . Если

$$\sum_{k=1}^n \Delta p_k Y_k < 0, \quad (6)$$

то можно говорить, что комплекс мероприятий увеличивает надежность.

Величина  $Y_k$  считается приведенной, если фактический ущерб  $Y_{\text{факт. } k}(t)$ , свершившийся в ожидаемый момент  $t$ , дисконтирован (приведен с учетом временной стоимости денег) к современному моменту времени:

$$Y_k = Y_{\text{факт. } k}(t) e^{-t \ln(1 + \delta)}, \quad (7)$$

где  $\delta$  — безусловная процентная ставка, принятая для расчетов.

Если момент времени не определен [5], происхождение аварийного события становится равновероятным на временном промежутке  $[t_1, t_2]$ , т.е.

$$Y_k = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} Y_{\text{факт. } k}(t) e^{-t \ln(1 + \delta)} dt. \quad (8)$$

Рассмотрим формулы расчета показателя  $(D_{\text{баз}} - D)$ .

В случае решения первой подзадачи (разработка оперативных методов оценки и обеспечения качества укладки грунтов в тело каменно-земляных плотин) применение методов должно быть заложено на стадии планирования, поэтому разность  $D_{\text{баз}} - D$  будет зависеть от результатов применения методов оптимизации сроков планирования. Так как данных для анализа решений двух оптимизационных работ в базовом методе и в методе, предполагающем использование авторской методики, нет,

то произвести корректную оценку величины  $D_{\text{баз}} - D$  не представляется возможным. Однако можно утверждать, что эта величина будет положительной. Допустимы два случая.

*Первый случай.* Проведение ранее установленных методов определения геотехнических показателей грунтов является работой, относящейся к критическому пути в сетевом графике планирования. Общая продолжительность всего комплекса работ тогда уменьшается на время, которое является разностью времени определения свойств грунтов в базовом варианте и времени определения свойств грунтов разработанными оперативными методами  $\Delta T$  (в днях), если (в нашем варианте) эта работа также лежит на критическом пути либо  $\Delta T$  равно величине разности общего времени критического пути и ближайшего времени подкритического пути (рис. 2).

Пусть  $A$  — величина финансового выигрыша от досрочного окончания строительства на один день. Тогда оценка вклада в размер  $D_{\text{баз}} - D$ , определяемого досрочным окончанием работ (по сравнению с базовым вариантом), равна  $\Delta T \cdot A$ .

*Второй случай.* Если в базовом варианте определение свойств и обеспечение качества укладки грунтов в тело плотины не лежит на критическом пути, то может случиться так, что  $\Delta T = 0$ . Однако и в том и в другом случае происходит финансовый выигрыш, состоящий в снижении объемов рабочего времени персонала, производящего контроль, а также уменьшаются затраты, определяемые эксплуатацией лабораторного оборудования. Оценим их величиной  $B$ .

В случае решения второй подзадачи (использование методов прогноза деформации тела плотины по качеству выполненного уплотнения грунта и перемещений подошвы грунтового сооружения) появляется возможность учета затрат, которые производятся для выполнения объема работ, являющегося разностью объема прогнозной досып-

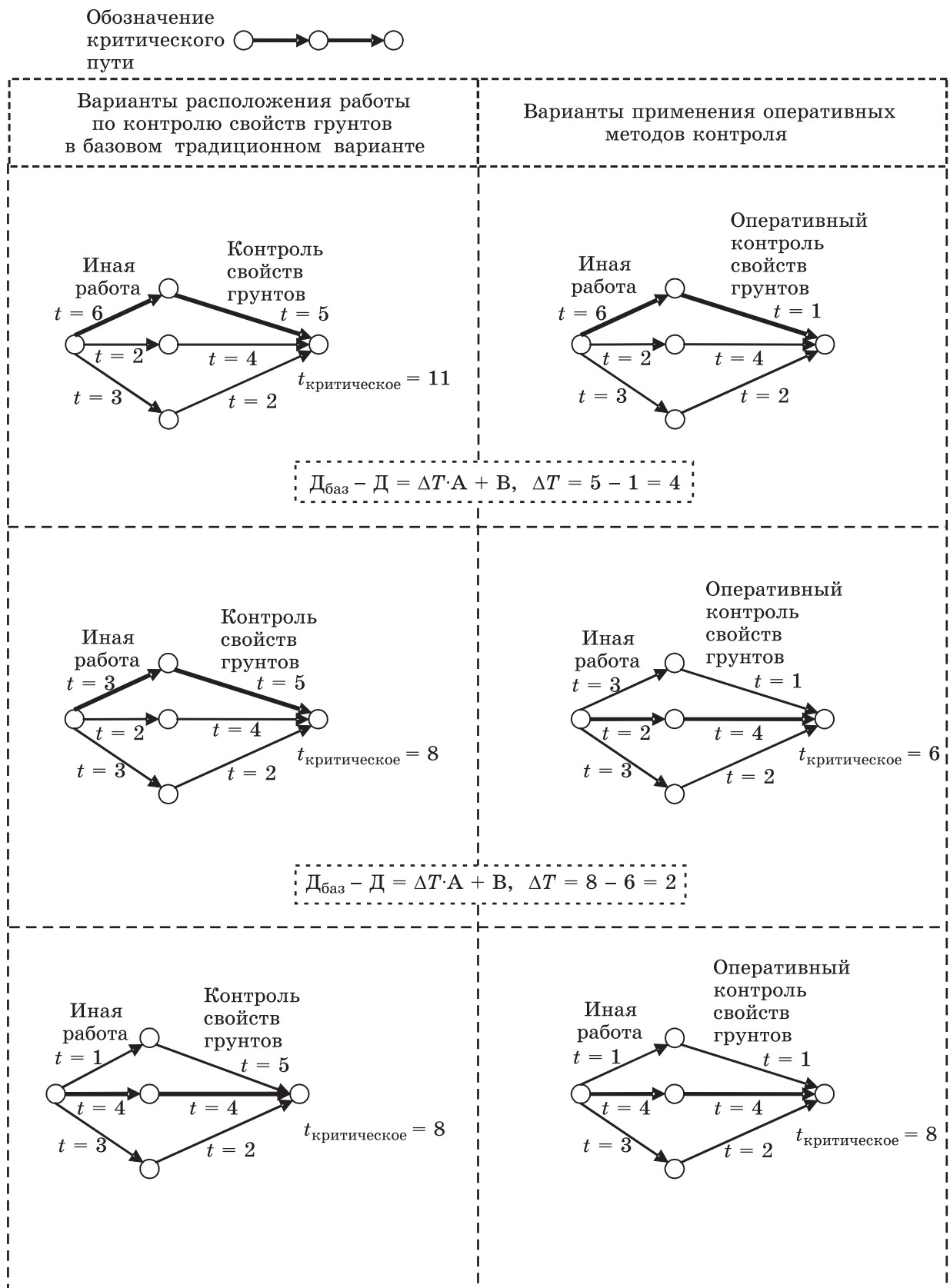


Рис. 2. Примеры расчета  $D_{\text{баз}} - D$  в случае использования оперативных методов оценки свойств и обеспечения качества укладки грунтов

ки и объема, вычисленного с использованием предлагаемых методов. В величину  $D_{\text{баз}} - D$  в этом случае будут входить следующие слагаемые.

Пусть объем грунтов, который «экономится» в результате применения предлагаемых методов, равен  $V(s)$ , где  $s$  — величина ожидаемой деформации. Величину  $V$  рассчитываем так:

$$V = z \int_0^g \frac{s}{H} h(x) dx, \quad (9)$$

где  $z$  — ширина гребня плотины, на котором выполняется «строительный подъем»;  $g$  — длина гребня плотины;  $h(x)$  — проектная высота (мощность) «строительного подъема» по длине гребня плотины;  $H$  — максимальная высота плотины.

От величины ожидаемой деформации тела грунтовой плотины будет зависеть площадь поверхности, которую необходимо выполнить в процессе производства работ по устройству «строительного запаса». Площадь поверхности при постоянной ширине гребня плотины  $z$ , по которой выполняется «досыпка», является суммой длин слоев  $L_0 + L_1 + \dots + L_N$  грунта с конкретной толщиной, умноженной на  $z$ . Длины слоев и их число « $N + 1$ » зависят от ожидаемой величины  $s$ , поэтому

$$L_k = \int_0^g \text{Hev} \left( \frac{s}{H} h(x) - 0,3k \right) dx, \quad (10)$$

где  $\text{Hev}(x)$  — функция, принимающая значения 1, если  $x \geq 0$ , и 0 (в математике она известна как функция Хэвисайда).

Таким образом,  $L = L_0 + L_1 + \dots + L_N$ . Число  $N$  определяют так, чтобы  $L_N > 0$ ,  $L_{N+1} = 0$ .

Справедливость приведенных рассуждений подтверждают следующие расчеты. Экономическая эффективность  $D_{\text{баз}} - D$  при устройстве «строительного подъема (запаса)» для плотин «Сахаби» ( $H = 68$  м) и «Саура» ( $H = 78$  м) с учетом фактической степени

выполненного уплотнения грунта в сооружении (вторая подзадача) составила соответственно 80 и 56 % от затрат, необходимых для устройства «строительного запаса» плотин в соответствии с проектными прогнозами (цены соответствовали федеральным единичным расценкам на строительные работы ФЕР-2001-01 (Сб.1: Земляные работы) без учета налогообложения, инфляционных и региональных коэффициентов).

**Ключевые слова:** экономическая эффективность, надежность и долговечность каменно-земляных плотин, экономическая теория надежности, вероятность восстановления, интенсивность восстановления, коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности, риски непредвиденных затрат, сценарный анализ, стресс-анализ.

#### Список литературы

1. **Гнеденко, В. В.** Математические методы в теории надежности [Текст] / В. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. — М. : Наука, 1965. — 524 с.
2. **Беляев, Ю. К.** Надежность технических систем [Текст] / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин. — М. : Радио и связь, 1985. — 608 с.
3. **Гнеденко, В. В.** Математические методы в теории надежности [Текст] / В. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. — М. : Наука, 1965. — 524 с.
4. **Эдельман, В. И.** Надежность технических систем: экономическая оценка [Текст] / В. И. Эдельман. — М. : Экономика, 1989. — 151 с.
5. **Бартон, Т.** Комплексный подход к риск-менеджменту: стоит ли этим заниматься [Текст] / Т. Бартон, У. Шенкир, П. Уокер. — М. : Вильямс, 2003. — 231 с.
6. **Колемаев, В. А.** Математическая экономика [Текст] / В. А. Колемаев. — М. : Юнити, 2005. — 399 с.