

Гидротехническое строительство

Оригинальная статья

УДК 627.824.3.003.13:624.131.7

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-64-74>



ОБОСНОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН ОТ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ГРУНТОВ

Е.В. Андреев^{1✉}, В.Я. Жарницкий², Н.В. Ханов³

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации», Институт государственной службы и управления; г. Москва, Российская Федерация

² МОО «Академия проблем водохозяйственных наук»; г. Москва, Российская Федерация

³ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; г. Москва, Российская Федерация

¹ andreev-rf@mail.ru; ORCID: 0000-0001-6867-144X

² zharnitskiy@mail.ru; ORCID: 0000-0002-5764-4734

³ khanov@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0002-5764-4734

Аннотация. Цель исследований – обосновать экономическую эффективность от внедрения разработанной системы оперативной оценки геотехнического контроля грунтов для повышения эксплуатационной надежности грунтовых плотин, подвергнутых нестационарным воздействиям ударных и газодинамических нагрузок при взрывах. Применение теории надежности как основного метода исследований обусловлено нестационарностью и изменчивостью системы от воздействия внешних факторов, инструментарий которого позволил увязать инженерную задачу обеспечения и повышения эксплуатационной надежности с управленческими и финансово-экономическими решениями. В результате исследований внедрена в практику строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений разработанная система оценки качества послойной укладки грунтов в тело плотин и их осадки. Это позволяет сократить время проведения обследования грунтовой плотины, трудоемкость и объем работ, направленных на контрольные мероприятия, снижает трудозатраты и требования к квалификации персонала, что уменьшает объем финансовых вложений в реализацию мероприятий по поддержанию и повышению их эксплуатационной надежности. Сделан вывод о целесообразности разработанной системы оперативной оценки геотехнического контроля грунтов для поддержания и повышения эксплуатационной надежности грунтовых плотин как объекта повышенной опасности, что совершенствует действующий инструментарий реализации Федерального закона № 117 «О безопасности гидротехнических сооружений».

Ключевые слова: грунтовые плотины, эксплуатационная надежность гидротехнических сооружений, экономическая эффективность, стоимость работ, экономический ущерб, безопасная эксплуатация, отказы и повреждения плотин, жизненный цикл объекта

Формат цитирования: Андреев Е.В., Жарницкий В.Я., Ханов Н.В. Обоснование экономической эффективности повышения эксплуатационной надежности грунтовых плотин от внедрения системы оперативной оценки геотехнического контроля грунтов. Природообустройство. 2026;Т.19(4):64-74. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-64-74>

Scientific article

SUBSTANTIATION OF THE ECONOMIC EFFICIENCY OF INCREASING THE OPERATIONAL RELIABILITY OF EARTH DAMS FROM THE INTRODUCTION OF A SYSTEM FOR OPERATIONAL ASSESSMENT OF GEOTECHNICAL CONTROL OF SOILS

E.V. Andreev^{1✉}, V.Ya. Zharnitsky², N.V. Khanov³

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Institute of Public Administration and Management, Moscow, Russian Federation

²International Public Organization, Academy of Water Sciences, Moscow, Russian Federation

³Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education, Russian State Agrarian University, Moscow Timiryazev Agricultural Academy, A.N. Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management, and Construction, Moscow, Russian Federation

¹andreev-rf@mail.ru; ORCID: 0000-0001-6867-144X

²zharnitskiy@mail.ru; ORCID: 0000-0002-5764-4734

³khanov@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0002-5764-4734

Abstract. The purpose of the study: to substantiate the economic efficiency of the implementation of the developed system of operational assessment of geotechnical soil control, in order to increase the operational reliability of earth dams subjected to non-stationary effects of shock and gas dynamic loads during explosions.

Research methodology. The application of the theory of reliability as the main research method is due to the non-stationary nature and variability of the system from the impact of external factors, the tools of which made it possible to link the engineering task of ensuring and increasing operational reliability with managerial, financial and economic decisions.

Results. The introduction into the practice of construction and operation of hydraulic structures of the developed system for assessing the quality of layered soil laying in the body of the dam and their precipitation, which allows to assess the likelihood of changes in the level of operational reliability of the hydraulic structure, reduces the time of inspection of the earth dam, the complexity and amount of work for control measures., it reduces the amount of financial investment in the implementation of measures to maintain and improve their operational reliability. **Conclusion.** The article concludes that the developed system of operational assessment of geotechnical soil control is appropriate for maintaining and improving the operational reliability of earth dams as high-risk facilities, and improves the existing tools for implementing Federal Law No. 117 «On the Safety of Hydraulic Structures».

Keywords: earth dams, operational reliability of hydraulic structures, economic efficiency, cost of work, economic damage, safe operation, failures and damage to dams, the life cycle of the facility

Citation format: Andreev E.V., Zharnitsky V.Ya., Khanov N.V. Substantiation of the economic efficiency of increasing the operational reliability of earth dams from the introduction of a system for operational assessment of geotechnical control of soils. *Prirodoobustroystvo*. 2026;19(4):64-74. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-64-74>

Введение. За последние годы количество грунтовых плотин с высокой степенью износа превысило 85%, что требует разработки эффективных механизмов по привлечению инвестиций в их реконструкцию и поддержанию эксплуатационной надежности. Для этого требуется предложить не только эффективный, но и экономически обоснованный метод, позволяющий на разных стадиях жизненного цикла гидротехнических сооружений оценить качество укладки грунта для недопущения образования аварий и катастроф, наносящих прямой экономический и неэкономический ущерб региональной экономике.

На всех этапах эксплуатации грунтовых плотин, при использовании различных методов, инструментов и оборудования для определения геотехнических показателей грунтов как

строительного материала, всегда будет присутствовать их неопределенность – главным образом, ввиду несоответствия фактической плотности грунта, уложенного в тело плотины, действительному значению, которое получают только в технологических картах в ходе строительства объекта. Опытные укатки грунта, выполняемые для установления технологических параметров укладки грунтового материала и строительных показателей свойств грунта после его уплотнения, также не дают достаточно объективных значений показателей свойств грунта, так как не учитывают пространственную изменчивость карьерного грунта. К тому же и условия проведения «опытных укаток» отличаются от масштабов основного этапа производства работ на объекте, что вносит в жизненный цикл эксплуатируемых грунтовых плотин дополнительные

финансово-экономические категории затрат для обеспечения надежности гидротехнических сооружений и недопущения ущерба региональной экономике [1].

Существенным упущением имеющихсся методов оценки уплотнения грунта в теле сооружения является то, что при их использовании отсутствует возможность оперативного определения таких контролируемых выходных показателей уплотненного грунта, как коэффициент уплотнения, прочность, водопроницаемость и другое по образцам, которые отбираются для оценки качества выполненного уплотнения в слое. Это повышает затраты на этапе эксплуатации грунтовых плотин и требует проведения мероприятий по обоснованию экономической эффективности инвестиций в оценку надежности и безопасности эксплуатируемых гидротехнических объектов [2].

Все это объясняет необходимость и важность наличия такой системы геотехнического освидетельствования качества уложенного с уплотнением грунта, которая бы являлась не затратной, не сложной по расчетному обоснованию, нетрудоемкой, понятной и доступной для профильных специалистов, а главное – не снижающей объективность и достоверность, существенно сокращала бы время на их определение и не требовала бы привлечения дополнительных экономических ресурсов на постоянной основе на протяжении всего жизненного цикла эксплуатируемых грунтовых плотин [3].

Цель исследований: обоснование экономической эффективности от внедрения разработанной системы оперативной оценки геотехнического контроля грунтов для повышения эксплуатационной надежности грунтовых плотин, подвергнутых нестационарным воздействиям ударных и газодинамических нагрузок при взрывах.

Материалы и методы исследований. Определение показателя экономической эффективности обеспечения надежности разработанной системы оперативной оценки качества укладки грунтов в тело грунтовых плотин, а также осадок по заранее заданным параметрам, определяющим качество укладки грунтов в гидротехническое сооружение, является в большей степени инженерной, а не управленческой задачей, потому что опосредованно увязывается с обоснованием экономических и управленческих решений в ходе проектирования и эксплуатации грунтовых плотин, но непосредственно влияющих на объем инвестиций в обеспечение этих параметров. Поэтому более целесообразным является изучение взаимосвязи осуществляемых инвестиций в обеспечение проектной и эксплуатационной

надежности грунтовых плотин и уровня полезного эффекта от проводимых мероприятий, так как некоторые мероприятия либо могут иметь номинальный характер, либо напрямую не относиться к обеспечению конструкционной надежности тела грунтовой плотины.

При решении инженерной задачи по обеспечению качества строительных работ и уложенных в тело плотин грунтов итоговым результатом (целью) было обеспечение безопасности, эксплуатационной надежности и долговечности грунтовых плотин как на этапе их возведения, так и в течение более длительного периода их эксплуатации за счет эффективности данных методов, что снижает экономические затраты на обеспечение жизненного цикла грунтовых плотин. При оценке экономической эффективности инвестиций в повышение надежности грунтовых плотин важно, чтобы выбранные показатели отражали именно этот аспект. Таким образом, показатели надежности могут служить мерой экономической эффективности вложений, направленных на продление срока службы грунтовых плотин.

Проблематика надежности исследовалась с различных точек зрения в рамках научных теорий и подходов. Основные работы [4, 5], в которых заложены и рассматриваются основы теории надежности, – это труды Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляева, А.Д. Соловьева и В.А. Колемаева. При этом важно, что для решения задачи, сформулированной в рамках наших исследований, более близкой к обеспечению технической надежности через экономические категории и оценку их экономической эффективности является работа В.И. Эдельмана [6]. Для этого можно привести анализ основных положений существующих теорий надежности для корреляции ее экономического смысла с техническими аспектами решаемой нами задачи.

Если рассматривать теорию надежности в традиционном формате, становится понятно, что она отражает в основном технические аспекты решаемых задач, где такое понятие, как надежность, определяется способностью гидротехнического сооружения выполнять заданные функции, сохраняя при этом проектные характеристики в заранее установленных пределах при условии, что эксплуатация сооружения происходит без отклонений от заданных проектных характеристик и сооружение не подвергается нестационарным нагрузкам и воздействиям. В данном формате она является отражением классических формулировок технической, а не экономической теории надежности, описание которой предлагается

в трудах таких ученых, как Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин [7] и др.

Ключевые направления, которые можно выделить в данной теории, – это направления, связанные с расчетным обоснованием условий эксплуатации грунтовых плотин, наиболее приближенных к проектным значениям.

С технической стороны в теории надежности можно сформулировать следующее:

- Нарушение работоспособности грунтовой плотины классифицируется как отказ технической системы, вызывающий экономические последствия.

- Если грунтовая плотина выполняет заданные функции и не отклоняется в каких-либо параметрах от проектных значений, то данное состояние можно классифицировать как работоспособное [8].

- Если грунтовая плотина на протяжении продолжительного периода обеспечивает воспроизводственный цикл и достижение заданных экономических показателей, то данное состояние объекта может быть классифицировано как безотказное.

Важно отметить, что данные определения не несут в себе экономического содержания, что побуждает нас к установлению такой связи.

В рамках экономической эффективности и целесообразности осуществления инвестиций в обеспечение надежности гидротехнических сооружений более целесообразным было бы оценивать такие повреждения технических систем, которые бы могли привести к остановке или замедлению воспроизводственного цикла или увеличить расходы на эксплуатацию грунтовой плотины и ее вспомогательных элементов, что также могло бы снизить экономическую эффективность всего проекта в целом [8]. Такие события в большей степени соответствуют цели исследований с точки зрения оценки целесообразности инвестиций в обеспечение и повышение надежности гидротехнических сооружений в рамках нанесения потенциально экономического ущерба, поскольку грунтовые плотины являются объектом повышенной опасности [9]. Поэтому при оценке экономической эффективности проводимых мероприятий, связанных с повышением эксплуатационной надежности грунтовых плотин, следует учитывать качественное изменение таких параметров, как вероятность и среднее время безотказной и бесперебойной работы гидротехнического сооружения.

Данные показатели в классическом сценарии могут быть применены к грунтовым плотинам, находящимся в высокой степени износа и не подлежащим ремонту или восстановлению.

Когда грунтовые плотины подлежат восстановлению и в принципе являются ремонтнопригодными, более целесообразным было бы принимать показатели, непосредственно связанные с ремонтнопригодностью. К ним в данном случае и в большей степени подходят такие показатели, как вероятность восстановления ремонтнопригодности, среднее время ремонтнопригодности потенциально опасной грунтовой плотины в целях недопущения экономического ущерба населению и инфраструктуре региона, где они расположены. Также необходимо учесть такой показатель, как среднее время, за которое можно восстановить ремонтнопригодность, а также коэффициент технического использования, зависящий от интенсивности использования потенциально опасных объектов [10, 11].

В таблице 1 представлены применимость в рамках исследуемого вопроса, определение и вышеупомянутые показатели, аргументы и их расчетные формулы, позволяющие делать выводы о том, что есть существенные расхождения в подходах к оценке надежности в ее классической и в экономической теории. Если классическая теория надежности ориентирована на рассмотрение в большей степени аспектов технического характера, то экономическая теория ориентирована на интеграцию технических показателей к экономическим оценкам. Такой аспект нужно учитывать на этапе инвестиционного анализа потенциального объекта, потому что в данном случае результирующим фактором при принятии решения является сопоставление экономических затрат с достигнутым эффектом по повышению эксплуатационной надежности и безопасности грунтовых плотин.

К основным задачам при оценке количественных показателей экономической эффективности в результате инвестиций в повышение надежности эксплуатируемых грунтовых плотин могут быть отнесены:

- снижение количества отказов, и как следствие – снижение убытков, что в свою очередь ведет к уменьшению средств на ремонт или замену оборудования, а также ликвидации последствий стихийных бедствий от разрушения гидротехнических сооружений;

- снижение или предотвращение косвенных экономических последствий в виде сохранения положительной репутации, отсутствие штрафов и санкций на предприятие, и как следствие – обеспечение непрерывного воспроизводственного цикла;

- увеличение срока службы и надежности всего объекта, что ведет к снижению затрат

на текущий и капитальный ремонт гидротехнических сооружений;

– общее повышение надежности и безопасности в ходе работы гидротехнических сооружений, что ведет к снижению рисков с нанесением ущерба жизни и здоровью людей.

В этой связи можно сделать вывод о том, что экономическая целесообразность инвестиций в обеспечение надежности и безопасной работы грунтовых плотин оценивается через призму

таких технических показателей, как интенсивность отказов, надежность, а также интенсивность отказов уже эксплуатируемого объекта. Ключевое решение об осуществлении инвестиций, особенно в условиях экономических изменений, является в большей степени управленческим [10]. При этом принятие подобных решений зачастую основывается на сопряжении экономических и технических показателей оцениваемой системы (табл.).

Таблица. Показатели технической теории надежности
Table. Indicators of the technical theory of reliability

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 грунтовой плотине не возникнет отказ.	$P(t) = \frac{N - N_0}{N};$ где N – число объектов, участвующих в испытании (эксплуатации); N_0 – число объектов, отказавших в течение времени t .	Очевидно, для оценки эффективности необходимо рассмотреть две вероятности: во-первых, вероятность, вычисленную для грунтовых плотин, при строительстве которых не использовались предложенные мероприятия (базовая вероятность); во-вторых, вероятность, вычисленную для грунтовых плотин, при строительстве которых такие мероприятия использовались. Второй показатель на данный момент рассчитать невозможно. Расчет первого показателя будет использовать неоднородные данные, поэтому не отразит реальное положение дел в рассматриваемом аспекте.
Вероятность бесперебойной работы $P_{сб}(t)$ – это вероятность того, что в заданном интервале времени t будет отсутствовать сбой в работе грунтовой плотины.	$P_{сб}(t) = \frac{N - N_0}{N};$ где N – число объектов, поступивших на эксплуатацию; N_0 – число объектов, на которых произошел сбой в течение времени t .	
Среднее время безотказной работы T – это математическое ожидание работы грунтовой плотины до первого отказа.	$T = \int_0^{\infty} P(t)dt;$	
Интенсивность отказа $\lambda(t)$ – это условная плотность вероятности возникновения отказа невозматываемой грунтовой плотины до определенного момента времени 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 грунтовых плотин в интервал времени (Δt) ; $N_{ср}(\Delta t)$ – среднее число исправных изделий в интервал времени (Δt) .	
Вероятность восстановления $S(t)$ – это вероятность того, что отказавшая грунтовая плотина будет восстановлена в течение времени t .	$S(t) = \frac{n_b}{N_{ов}};$ где n_b – число грунтовых плотин, время восстановления которых меньше заданного времени t ; $N_{ов}$ – число грунтовых плотин, оставшихся на восстановлении.	
Интенсивность восстановления $M(t)$ – условная плотность распределения времени восстановления для момента времени t при условии, что до этого момента не произошло восстановление грунтовой плотины.	$M(t) = \frac{n_b(\Delta t)}{N_{всп}(\Delta t)};$ где $n_b(\Delta t)$ – число восстановленных грунтовых плотин за время Δt ; $N_{всп}(\Delta t)$ – среднее число грунтовых плотин, которые не были восстановлены в течение времени Δt .	Данные показатели имеют смысл рассматривать лишь для анализа эксплуатационной, а не строительной надежности.
Среднее время восстановления T_b – это натуральная величина ожидания восстановления.	$T_b = \int_0^{\infty} (1 - S(t))dt;$	
Коэффициент готовности $K_r(t)$ – это вероятность того, что грунтовая плотина работоспособна в произвольный момент времени t .	Стационарная оценка: $K_r = (\sum t_{pi}) / (\sum t_{pi} + \sum t_{bi});$ где t_{pi} – i -й интервал времени исправной работы грунтовой плотины; t_{bi} – интервал времени восстановления грунтовой плотины; n – число отказов грунтовой плотины.	

Ущерб от сбоев в работе грунтовых плотин не ограничивается прямыми финансовыми потерями или расходами. Он также включает в себя упущенные выгоды, возникающие ввиду невозможности использования грунтовой плотины в полной мере.

Упущенные возможности, вызванные отказами, могут привести к значительному экономическому ущербу и потере экономической устойчивости предприятия, в ведении которого находится грунтовая плотина, поскольку они останавливают производственный процесс и увеличивают расходы, не связанные напрямую с производственным циклом предприятия.

Задачи по оптимизации затрат на обеспечение эксплуатационной надежности объектов повышенной опасности являются логическим завершением процесса обоснования привлечения инвестиций, если эти инвестиции направлены на повышение надежности грунтовых плотин. Можно выработать два основных подхода к решению задач оптимизации работы грунтовых плотин.

Подход 1. Расчет целесообразности инвестиций в обеспечение и повышение надежности грунтовых плотин. Для реализации данного подхода принимаются: Z_1 – ежегодные затраты на поддержание заданного уровня надежности грунтовой плотины; Y_1 – ежегодный ущерб от отказов грунтовой плотины (без принятия мер по защите); $Z_{зм}$ – затраты на проведение мероприятий по защите от отказов грунтовой плотины; Y_2 – ожидаемый ущерб после проведения мероприятий по защите от отказов грунтовой плотины.

Эффективными можно считать инвестиции, если их объем не будет больше затрат на ликвидацию последствий в случае разрушения грунтовой плотины:

$$(Z_{зм} + Y_2) < Y_1. \quad (1)$$

В этой связи можно сделать вывод о том, что в случае достижения данного показателя заданный уровень надежности грунтовой плотины с помощью защитных мер потребует меньших общих затрат. Это означает, что общие приведенные затраты (включая затраты на поддержание надежности и защитные меры) будут ниже, чем без них:

$$(Z_{зм} + Y_2 + Z_1) < (Y_1 + Z_1). \quad (2)$$

Подход 2. Оценка экономии и повышение надежности грунтовой плотины. При реализации этого подхода принимаются: Z_1 – ежегодные затраты на обеспечение надежности

грунтовой плотины; Y_1 – ежегодный экономический ущерб от отказов грунтовой плотины; H_1 – уровень надежности грунтовой плотины при затратах Z_1 .

Здесь, как и в первом подходе, мероприятия по защите являются эффективными, если $(Z_{зм} + Y_2) < Y_1$.

Данная методика может быть обоснована, если при осуществлении инвестиций не происходит снижения уровня надежности грунтовой плотины:

$$(Y_1 + Z_1) - (Z_{зм} + Y_2 + Z_1) = \Delta Z, \quad (3)$$

где ΔZ – достигнутая экономия.

Сэкономленные средства (ΔZ) могут быть reinvestированы в достижение более высокого уровня надежности. Если затраты Z_1 обеспечивают надежность H_1 , то дополнительная сумма ΔZ позволит увеличить надежность грунтовой плотины на величину ΔH :

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

где F – функция, описывающая зависимость между затратами на обеспечение надежности грунтовой плотины и самим уровнем надежности.

Подход 3. Суть данного подхода заключается в рассмотрении грунтовой плотины не как системы технических показателей, а как системы управленческих и экономических решений. В рамках сценарного анализа можно найти похожие предложения, которые реализованы у зарубежных авторов.

Специалисты разрабатывают различные сценарии развития событий (например, климатических или геологических изменений). Затем эксперты рассчитывают экономические последствия применения различных мер в случае наступления форс-мажорных/нештатных ситуаций. Задача аналитиков заключается в комплексном анализе всех предложенных мер для минимизации потенциального ущерба и разработке необходимых организационно-строительных мероприятий в случае проявления негативных факторов, влияющих на работу потенциально опасных объектов.

Ключевыми аспектами такого анализа являются:

- Оценка рисков: *идентификация и количественная оценка потенциальных угроз, которые могут повлиять на надежность грунтовой плотины и всего гидроузла в целом.*
- Разработка сценариев: *создание реалистичных сценариев развития событий, учитывающих различные внешние факторы (природные катаклизмы, экономические кризисы, технологические сбои и т.д.).*

- Моделирование последствий: *прогнозирование экономического ущерба и операционных потерь для каждого сценария.*

- Эффективность применяемых мер: *анализ эффективности осуществления инвестиций и их вклад в обеспечение показателей надежности грунтовых плотин.*

- Оптимизация инвестиционных решений: *определение оптимального значения инвестиционных средств для достижения заданных показателей надежности грунтовой плотины или всего гидроузла в целом.*

Своевременность такого анализа позволила бы определить не только объем инвестиционных ресурсов, необходимых для ликвидации последствий и экономического ущерба, а именно предотвратить эти последствия, то есть на ранней стадии принять эффективные управленческие решения по недопущению образования аварий и катастроф на грунтовых плотинах.

Безопасность эксплуатируемых грунтовых плотин, подвергшихся влиянию нестационарных ударных воздействий и газодинамическим нагрузкам при взрыве, обеспечивается современными подходами к осуществлению своевременного финансирования в их ремонт и обеспечению надежности. Поэтому для снижения рисков прямого ущерба от разрушений более выгодным является поэтапное финансирование проектов, связанных с обеспечением и повышением их надежной и безопасной эксплуатации, что в рамках реализации подобных проектов требует автоматизации как финансовых, так и управленческих решений [12].

Таким образом, рассматриваемые подходы к оптимизации надежности грунтовых плотин и экономической системы в целом (от прямого расчета затрат и ущерба до комплексного сценарного анализа) направлены на достижение главной цели: обеспечение стабильной и эффективной работы объекта в условиях неопределенности и потенциальных рисков.

Инвестиции в обеспечение эксплуатационной надежности грунтовых плотин можно рассмотреть с точек зрения как прямых затрат, так и упущенных возможностей, что является критически важным элементом долгосрочной стратегии обеспечения жизненного цикла объекта.

Важно отметить и такой аспект: разработанные нами методы оперативной оценки по обеспечению качества устройства грунтовых плотин, как и прогноза их осадок, предполагают сокращение объема, трудоемкости и времени на выполнение этих работ, что подтверждается практикой

отечественного и зарубежного строительства грунтовых плотин. Такой подход/сценарий в работах В.И. Эдельмана отсутствует.

В рамках третьего подхода рассматривается надежность экономической системы как совокупного результата реализованных технических характеристик в результате воспроизводственного цикла грунтовой плотины в составе гидроузла. В связи с достаточно ограниченным количеством источников финансирования подобных проектов и их отраслевой спецификой основные управленческие и инвестиционные решения должны быть направлены на поддержание воспроизводственного цикла гидротехнического сооружения и надежности его основных проектных показателей.

Результаты и их обсуждение. Для оценки экономической эффективности предложенного метода в рамках рассматриваемой задачи мы принимаем следующее правило: под эффективностью понимаем не классическую финансовую прибыль (отношение прибыли к затратам), а ожидаемую разницу в затратах между двумя альтернативными вариантами.

Повышение экономической эффективности проекта в результате инвестиций может затрагивать следующие направления его реализации:

1. Совершенствование геотехнического освидетельствования грунтов, укладываемых в тело грунтовой плотины, и сокращение времени на производство данного вида работ.

В результате внедрения разработанной методики происходит оптимизация по таким категориям затрат, как сокращение времени, трудоемкости и объемов работ на контрольные мероприятия, уменьшение трудозатрат и требований к квалификации персонала. Это высвобождает дополнительные инвестиционные средства, которые могут быть направлены на повышение надежности и обеспечение непрерывности воспроизводственного цикла гидротехнического сооружения.

2. Разработка методов оперативной оценки отклонения основных показателей надежности гидротехнического сооружения от проектных значений и динамика их развития. Это приводит к экономии финансовых ресурсов на протяжении всего жизненного цикла грунтовой плотины с учетом длительного срока эксплуатации гидротехнических сооружений. Таким образом, высвобождаются значительные инвестиционные ресурсы, которые могут быть направлены на повышение надежности и обеспечение безопасной эксплуатации грунтовой плотины.

Экономическая эффективность предложенных мероприятий будет доказана, если:

1. Не произойдет снижение надежности грунтовой плотины и отклонение ее основных характеристик от проектных показателей.

2. Разница между затратами на строительство без использования методов оперативной оценки качества устройства грунтовых плотин и прогноза их осадок ($D_{\text{баз}}$) и с ними (D) является положительной. Если это условие не выполняется, расчет эффективности становится некорректным. В этой связи зависимость для оценки экономической эффективности привлечения инвестиций приобретает следующий вид:

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

где $\sum_{k=1}^n \Delta p_k \cdot Y_k$ – показатель, отражающий суммарную выгоду от повышения надежности объекта, полученную в результате реализации предложенных мероприятий.

Для оценки ущерба и выгоды от повышения надежности грунтовой плотины предлагается использовать экспертный метод, когда экспертам на разрешение ставятся вопросы:

1. Определить перечень аварийных событий, на которые влияют предложенные меры (обозначим их количество как n).

2. Оценить, как изменится ожидаемая частота возникновения каждого из этих событий ($\Delta p_k, k=1, 2, \dots, n$).

3. Оценить приведенный экономический ущерб от каждого аварийного события, если оно произойдет (Y_k).

Когда вероятность возникновения аварийной ситуации типа « k » возрастает, это отражается положительным значением показателя ($\Delta p_k > 0$). В обратном случае, если вероятность возникновения аварийной ситуации не увеличивается, показатель Δp_k будет меньше или равен нулю ($\Delta p_k \leq 0$). Ожидаемые потери от события ($\Delta p_k > 0$) будут положительными и определяться как произведение ущерба (Y_k) на показатель изменения вероятности (Δp_k).

Если суммарное значение, полученное путем умножения ущерба от каждого типа аварии (Y_k) на изменение вероятности его возникновения (Δp_k) по всем возможным типам аварий (от 1 до n), оказывается меньше нуля:

$$\left(\sum_{k=1}^n \Delta p_k \cdot Y_k < 0 \right),$$

это означает, что разработанный и внедренный комплекс мероприятий повышает общую надежность объекта.

Для корректного сравнения ущербов, нанесенных в разное время, используется понятие «приведенный ущерб». Фактический ущерб, нанесенный в определенный момент ($Y_{\text{факт.}k}(t)$), приводится к текущему моменту с учетом стоимости денег во времени (дисконтируется):

$$Y_k = Y_{\text{факт.}k}(t) e^{-t \ln(1+\delta)}, \quad (6)$$

где d – безрисковая процентная ставка, используемая для расчетов.

Если момент возникновения аварии на грунтовой плотине не имеет значения и предполагается, что авария может произойти с равной вероятностью в любой момент времени на интервале от t_1 до t_2 , то приведенный ущерб определяется путем интегрирования:

$$Y_k = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} Y_{\text{факт.}k}(t) e^{-t \ln(1+\delta)} dt. \quad (7)$$

Разница между базовыми затратами и затратами при использовании новой методики, обозначаемыми как $D_{\text{баз}}$ и D , может интерпретироваться по-разному в зависимости от решаемой задачи.

Задача 1. Оптимизация укладки грунтов в тело плотины. При разработке оперативных методов контроля качества укладки грунтов в каменно-земляные плотины эти методы должны применяться на этапе планирования. Поэтому разница в затратах ($D_{\text{баз}} - D$) будет зависеть от того, насколько успешно удастся оптимизировать сроки планирования. Поскольку нет достаточных данных для сравнения результатов оптимизации в базовом варианте и при использовании новой методики, точную оценку величины ($D_{\text{баз}} - D$) сделать сложно. Однако можно с уверенностью сказать, что эта величина будет положительной, и здесь возможны два сценария.

Сценарий 1. Постоянный контроль качества в ходе реализации инвестиционного проекта. Если стандартные методы определения свойств грунтов являются частью критического пути в сетевом графике работ, то внедрение оперативных методов сократит общее время их выполнения. Это сокращение времени составит ΔT (в днях), которое является разницей между временем определения свойств грунтов по стандартным методам и новым оперативным методам. Если новый метод также попадает на критический путь, то экономия будет равна ΔT . Если же он попадает на ближайший подкритический путь, то экономия будет равна разнице между временем критического и подкритического путей (рис. 1).

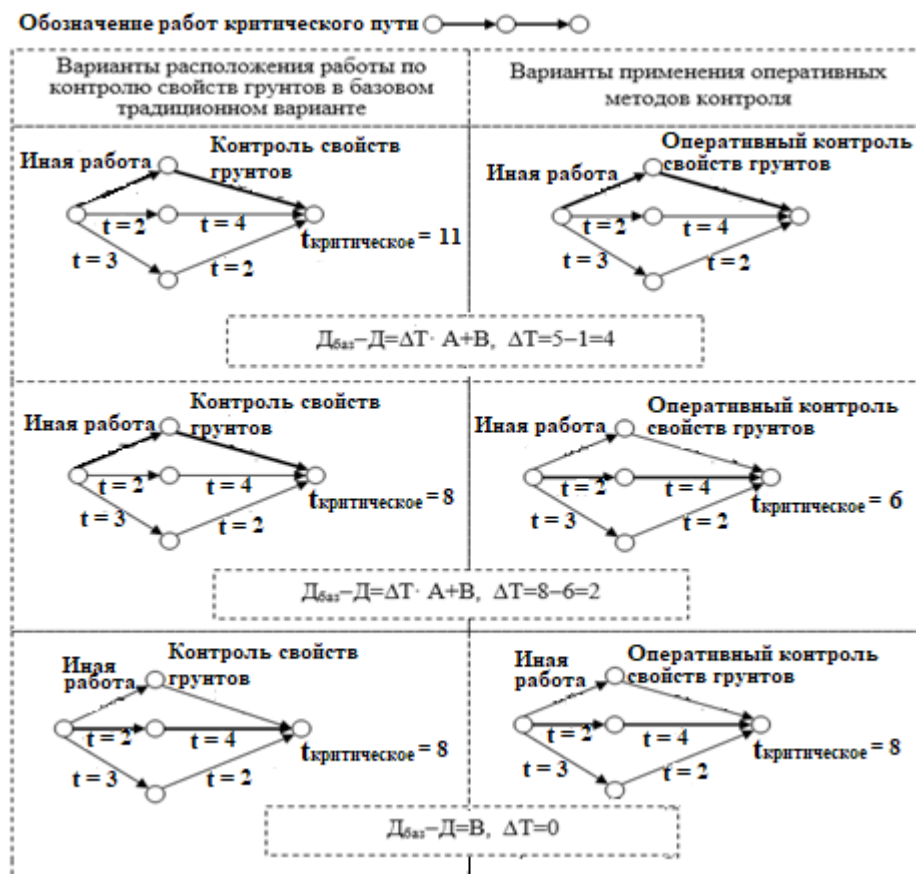


Рис. 1. Определение показателя экономической эффективности ($D_{\text{баз}} - D$) при использовании системы оперативной оценки качества укладки грунтов

Fig. 1. Determination of the economic efficiency indicator ($D_{\text{баз}} - D$) when using the system of operational assessment of the quality of soil laying

Если предположить, что «А» – это экономический эффект от досрочного завершения строительства, то вклад в общую экономию от досрочного завершения работ составит ($\Delta T \cdot A$).

Сценарий 2. Контроль качества не на критическом пути. Если в базовом варианте определение свойств грунтов не влияло на критический путь, то сокращение времени может быть незначительным ($\Delta T = 0$). Экономический эффект от инвестиций в повышение надежности грунтовых плотин будет очевидным, так как сократятся затраты персонала на текущий обязательный мониторинг технического состояния грунтовой плотины и снизятся затраты на содержание и эксплуатацию лабораторного оборудования. Данные показатели экономической эффективности оценим величиной «В».

Задача 2. Прогнозирование осадки тела и основания грунтовой плотины. При использовании методов прогнозирования деформаций тела грунтовой плотины на основе качества уплотнения грунта и применении новых подходов к оценке качества уплотнения экономическая эффективность будет проявляться в предотвращении потенциальных аварийных ситуаций

и связанного с ними экономического ущерба. В этом случае разница ($D_{\text{баз}} - D$) будет отражать сумму предотвращенных ущербов от возможных деформаций, которые могли бы возникнуть при использовании стандартных методов.

Объем грунта (V) при ожидаемой величине осадки сооружения (S), который удастся сэкономить при использовании методов прогнозирования деформаций тела грунтовой плотины на основе качества уплотнения грунта, будет определяться как

$$V = z \int_0^g \frac{S}{H} h(x) dx, \quad (8)$$

где z – проектная ширина гребня плотины, на которую приходится «строительный подъем»; g – проектная длина гребня плотины; $h(x)$ – проектная мощность (толщина) «строительного подъема» по гребню сооружения; H – проектная высота грунтовой плотины.

Площадь поверхности, требующая «строительного запаса», напрямую зависит от ожидаемой величины осадки грунтовой плотины (S). При фиксированной ширине гребня z эта площадь представляет собой сумму длин слоев грунта ($L_0 + L_1 + \dots + L_N$) с определенной толщиной,

умноженную на z . Количество слоев $(N + 1)$ и их длина определяются величиной S :

$$L_k = \int_0^S H \operatorname{Ei} \left(\frac{s}{H} h(x) - 0,3k \right) dx, \quad (9)$$

где $H_{\operatorname{Ei}(x)}$ – функция Хэвисайда (при $x \geq 0$, и 0 принимает значение 1).



Рис. 2. Плотина «Сахаби» (САР) на этапе строительства (русло реки «Beit Yashut»)

Fig. 2. The Sahabi site (SAR) at the construction stage (Beit Yashut riverbed)

Выводы

Корректность представленных рассуждений подтверждается анализом действующих тарифов на земляные работы без учета инфляционных, региональных коэффициентов и проведенными расчетами по разработанной методике для каменно-земляных плотин «Сахаби» ($H = 68$ м) и «Саура» ($H = 78$ м). Экономическая выгода составила 80 и 56%

Список использованных источников

1. Секисов А.Н., Клименко В.В., Хорошев А.А., Сторчун Б.И. Основные тенденции и перспективы привлечения инвестиций в строительный сектор // Первый экономический журнал. 2024. № 9 (351). С. 168-175. DOI: 10.58551/20728115_2024_9_168. EDN: FRITOF
2. Пехтин В.А. Научное обобщение технико-экономических решений по строительству каменно-земляных плотин в условиях Крайнего Севера: специальность 05.23.07 «Гидротехническое строительство»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Пехтин Владимир Алексеевич. Санкт-Петербург, 1999. 307 с. EDN: QDATLP
3. Лопатина М.Г. Повышение эксплуатационной надежности грунтовых плотин в условиях потенциального заиливания дренажа: специальность 05.23.07 «Гидротехническое строительство»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лопатина Маргарита Геннадьевна. Санкт-Петербург, 2009. 162 с. EDN: QEMPOX
4. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. 3-е изд., стер. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2024. 584 с.
5. Колемаев В.А. Математическая экономика: Учебник для вузов. 3-е изд., стер. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2022. 399 с.
6. Эдельман В.И. Надежность технических систем: экономическая оценка. М.: Экономика, 1989. 151 с.

Количество слоев N «строительного запаса» определяется из условия:

$$L_N > 0, L_{N+1} = 0.$$

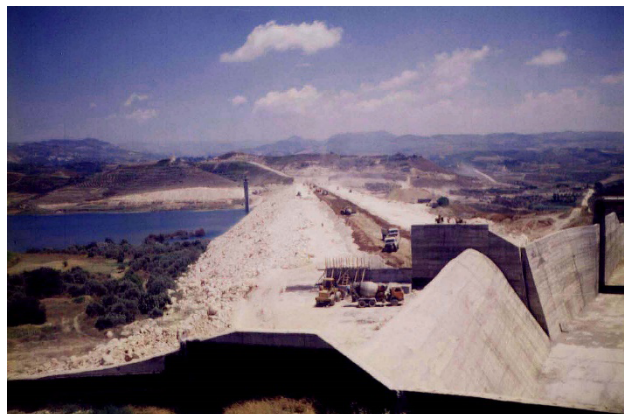


Рис. 3. Плотина «Саура» (САР) на этапе строительства (русло реки «Snoubar»)

Fig. 3. Saura dam (SAR) at the construction stage (Snoubar riverbed)

соответственно от затрат, предусмотренных проектными расчетами, на устройство «строительного запаса» грунтовых плотин. Это подтверждает целесообразность внедрения разработанной методики в практику проектирования, строительства и эксплуатации грунтовых плотин как объекта повышенной опасности в целях повышения их эксплуатационной надежности и безопасности.

References

1. Sekisov A.N., Klimenko V.V., Khoroshev A.A., Storchun B.I. Main trends and prospects for attracting investments in the construction sector // First Economic Journal. 2024. № 9(351). P. 168-175. DOI: 10.58551/20728115_2024_9_168. EDN: FRITOF
2. Pekhtin V.A. Scientific Generalization of Technical and Economic Solutions for the Construction of Stone-Earth Dams in the Far North: Specialty 05.22.07 "Hydraulic Engineering": Dissertation for the Degree of Doctor of Technical Sciences / Vladimir Alekseevich Pekhtin. Saint Petersburg, 1999. 307 p. EDN: QDATLP
3. Lopatina M.G. Improving the operational reliability of earth dams under conditions of potential drainage siltation: specialty 05.22.07 "Hydraulic engineering": dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Lopatina Margarita Gennadyevna. Saint Petersburg, 2009. 162 p. EDN: QEMPOX
4. Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solovyov A.D. Mathematical Methods in Reliability Theory. 3rd ed., revised. Moscow: UNITY-DANA, 2024. 584 p.
5. Kolemaev V.A. Mathematical Economics: Textbook for Higher Educational Institutions. 3rd stereotype. MOSCOW, UNITY-DANA PUBL., 2022. 399 p.
6. Edelman V.I. Reliability of technical systems: economic assessment. Moscow, Ekonomika Publ., 1989. 151 p.

7. Беляев Ю.К., Богатырев В.А., Болотин В.В. Надежность технических систем. М.: Радио и связь, 1985. 608 с.
8. Шакарна Салех. Оценка надежности гидротехнических сооружений на основе системного подхода с учетом сейсмических условий: Дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2012. 158 с. EDN: QFVIKJ
9. Крутов Д.А. Гидротехнические сооружения: надежность и безопасность плотин: Учебник для вузов. М.: Изд-во Юрайт, 2026. 307 с. // Образовательная платформа Юрайт. URL: <https://urait.ru/bcode/589764>
10. Радзинский А.В. Надежность грунтовых плотин с противотифльтрационным элементом в виде «стены в грунте»: Дис. ... канд. техн. наук. Уфа. 2014. 128 с. EDN: JXWKUV
11. Алексаньян А.А. Управление промышленной безопасностью эксплуатации морских гидротехнических сооружений шельфа юга Вьетнама (на примере месторождения «Дракон» СП «Вьетсовпетро»): Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2011. 25 с. EDN: ZOKJGF
12. Рыженко Н.Ю. Автоматизация оценки и прогнозирования безопасности гидротехнических сооружений накопителей жидких промышленных отходов: Дис. ... канд. техн. наук. Петрозаводск, 2006. 138 с. EDN: QEDIKD

Информация об авторах

Евгений Владимирович Андреев, канд. техн. наук, доцент кафедры «Государственного регулирования экономики ИГСУ РАНХиГС»; ORCID: 0000-0001-6867-144X; SPIN-код: 4590-9890; AuthorID: 804270; andreev-rf@mail.ru

Валерий Яковлевич Жарницкий, д-р техн. наук, профессор; Президент МОО «Академия проблем водохозяйственных наук»; ORCID: 0000-0002-5764-4734; SPIN-код: 1080-9924; AuthorID: 527542; zharnitskiy@mail.ru

Нартмир Владимирович Ханов, д-р техн. наук, профессор кафедры гидротехнических сооружений; WoS ResearcherID: L-1087-2013; Scopus AuthorID: 6603959022; ORCID: 0000-0002-5764-4734; SPIN-код: 4314-8184; AuthorID: 464889; khanov@rgau-msha.ru

Вклад авторов

Е.В. Андреев – формулирование целей, задач и выводов исследования, проведение натурных наблюдений, выбор методов исследования, обоснование экономической эффективности от внедрения методов оперативной оценки геотехнических показателей грунтов гидротехнических сооружений, подготовка, редактирование и доработка окончательной версии статьи; В.Я. Жарницкий – проведение натурных испытаний в период возведения каменно-земляных плотин, разработка и апробация методов оперативной оценки геотехнических показателей грунтов на обследуемых каменно-земляных плотинах, подготовка и обработка эмпирической базы исследования; Н.В. Ханов – обработка и формирование результатов натурных исследований, разработка сценариев внедрения методов оперативной оценки геотехнических показателей грунтов гидротехнических сооружений применительно к решаемым задачам с учётом внешних факторов (природные катаклизмы, экономические кризисы, технологические сбои).

Поступила в редакцию / Received 15.06.2026

Одобрена после рецензирования / Approved 03.09.2026

Принята к публикации / Accepted 04.09.2026

7. Belyaev Yu.K., Bogatyrev V.A., Bolotin V.V. Reliability of technical systems [J. Moscow, Radio and connection Publ., 1985. 608 p.

8. Shakarna Saleh. Assessment of the reliability of hydraulic structures based on a system approach taking into account seismic conditions: specialty 05.23.07 "Hydraulic engineering construction": dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Shakarna Saleh. Samara, 2012. 158 p. EDN: QFVIKJ

9. Krutov D.A. Hydraulic structures: reliability and safety of dams: a textbook for higher educational institutions. Moscow, Yurayt Publ., 2026. 307 p. Text: electronic // Yurayt Educational Platform [site]. URL: <https://urait.ru/bcode/589764>

10. Radzinskiy A.V. Reliability of soil dams with a counter-seepage element in the form of a "wall in the soil": specialty 05.23.07 "Hydrotechnical construction": dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Radzinsky Aleksandr Vladimirovich, 2014. 128 p. EDN: JXWKUV

11. Aleksanyan A.A. Management of industrial safety of operation of marine hydraulic structures of the shelf of the south of Vietnam (on the example of the Dragon field of JV Vietsovpetro): specialty 05.26.03 "Fire and industrial safety (by industries)": Abstract of the Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences / Aleksanyan Artur Aramovich. Ufa, 2011. 25 p. EDN: ZOKJGF

12. Ryzhenko N.Yu. Automation of assessment and forecasting of safety of hydraulic structures of liquid industrial waste storage facilities: specialty 05.13.06 "Automation and control of technological processes and production (by industries)": Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences / Ryzhenko Natalya Yurievna. Petrozavodsk, 2006. 138 p. EDN: QEDIKD

About the authors

Evgeny V. Andreev, CSs (Tech), associate professor of the Department of State Regulation of the Economy of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Institute of Public Administration and Management; ORCID: 0000-0001-6867-144X; SPIN code: 4590-9890; AuthorID: 804270; andreev-rf@mail.ru

Valery Ya. Zharnitsky, DSs (Tech), President of MOO "Academy of Water Management Sciences"; ORCID: 0000-0002-5764-4734; SPIN code: 1080-9924; AuthorID: 527542; zharnitskiy@mail.ru

Nartmir V. Khanov, DSs (Tech), professor of the Department of Hydraulic Structures; WoS ResearcherID: L-1087-2013; Scopus AuthorID: 6603959022; ORCID: 0000-0002-5764-4734; SPIN-код: 4314-8184; AuthorID: 464889; khanov@rgau-msha.ru

Contribution of the authors

E.V. Andreev – formulation of goals, objectives and conclusions of the study, field observations, selection of research methods, justification of economic efficiency from the introduction of methods for operational assessment of geotechnical indicators of soils of hydraulic structures, preparation, editing and revision of the final version of the article;

V.Y. Zharnitsky – conducting full-scale tests during the construction of stone-earth dams, development and testing of methods for operational assessment of geotechnical indicators of soils on the surveyed stone-earth dams, preparation and processing of the empirical base of the study;

N.V. Khanov – processing and formation of the results of field studies, development of scenarios for the implementation of methods for the operational assessment of geotechnical indicators of soils of hydraulic structures in relation to the tasks to be solved, taking into account external factors (natural disasters, economic crises, technological failures).