

УДК 502/504:627.82.034.93

**В. Я. ЖАРНИЦКИЙ, Р. Г. СЕРГЕЕВ**

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

### **ПРОБЛЕМЫ И ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЙ НЕЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗОК НА ГРУНТОВЫЕ ПЛОТИНЫ**

*Рассмотрены проблемы и вопросы оценки влияния неэксплуатационных динамических нагрузок, взрывов, ударов и других кратковременных динамических воздействий на грунтовые плотины, расчетные случаи ударно-динамического воздействия на грунтовые сооружения, возможные сценарии ситуаций, приводящие к механическому ударному или динамическому воздействию на сооружение, подходы к созданию расчетно-теоретических методов оценки надежности и безопасности гидротехнических сооружений, обеспечивающих адекватный многовариантный анализ их технического состояния.*

*Грунтовые плотины, аварии, разрушения и повреждения плотин, долговечность, надежность и безопасность напорных грунтовых сооружений, ударно-динамическое воздействие, удар, взрыв, напряженно-деформированное состояние, детонационная волна, деформирование грунтов, идеально упругая среда, упругопластическая среда, вязкопластическая среда, нелинейно дилатационная модель, вероятностно-статистический метод.*

*There are considered problems and questions of assessment of the influence of non-operational dynamic loads, explosions, impacts and other short-term dynamic actions on soil dams, estimated cases of the impact – dynamic action on soil structures, possible scenarios of the situations resulting in the mechanical impact or dynamic action on the construction, approaches to the creation of design – theoretical methods, assessment of the reliability and safety of the hydraulic structures ensuring an adequate multi-variant analysis of their technical state of art.*

*Soil dams, failures, destructions and damages of dams, durability, reliability and safety of pressure soil structures, impact-dynamic action, impact, explosion, mode of deformation, detonating wave, soil deformation, perfectly elastic medium, elastoplastic medium, viscous-plastic medium, non-linear dilatation model, probabilistic statistical method.*

Важнейшей задачей гидротехнической науки и практики по-прежнему остается создание гидротехнических сооружений, оптимальных по надежности, долговечности и экономичности. За время эксплуатации гидротехнические сооружения подвергаются воздействиям различных типов нагрузок, как постоянных или эксплуатационных (собственный вес, гидростатическое давление, вибродина-

мические воздействия и др.), так и неэксплуатационных, возникающих в нештатных (трудно прогнозируемых) ситуациях (землетрясения, террористические акты, военные действия и т. п.), воздействие которых может привести к повреждению и даже к разрушению подпорных гидротехнических сооружений и, как следствие, катастрофическим последствиям, в том числе и для народного хозяйства.

Анализ распределения плотин по типам показывает, что грунтовые плотины являются наиболее распространенным видом напорных гидротехнических сооружений и составляют 82,9 % от общего числа плотин мира (рис. 1). Это обусловлено их максимальной экономичностью в период возведения и эксплуатации, строительством в относительно короткие сроки, использованием грунтов полезных выемок, возможностью устройства в сложных инженерно-геологических и климатических условиях, надежностью работы грунтового сооружения в районе высокой фоновой сейсмичности.

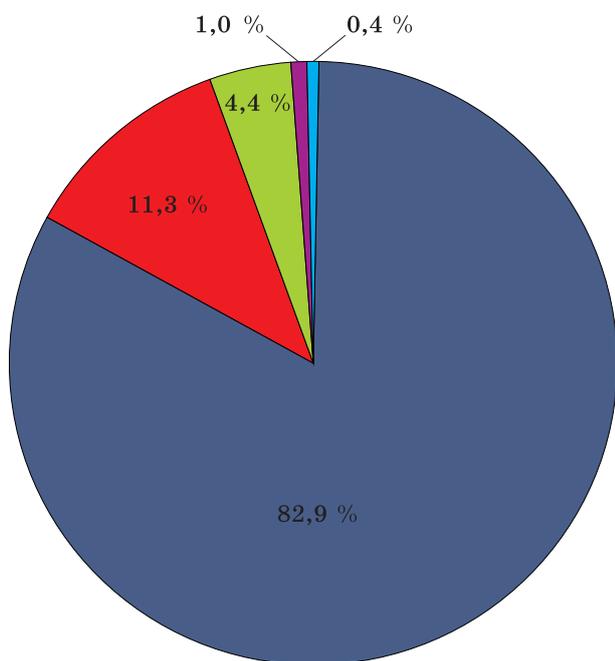


Рис. 1. Распределение плотин по типам (по данным Мирового регистра плотин): ■ – грунтовые; ■ – гравитационные; ■ – арочные; ■ – контрфорсные; ■ – многоарочные

При значительных достижениях техники и совершенствовании технологии строительства, повышении общего уровня знаний, опыта и технических решений аварии грунтовых плотин возможны. Во всех известных случаях разрушения и повреждения плотин были вызваны действием различных объективных и субъективных факторов. К числу первых относят природные стихийные явления: ураганы, катастрофические ливни (паводки), горные обвалы (оползни), землетрясения и т. п. К субъективным факторам относят ошибки в проектировании, низ-

кое качество используемых грунтовых материалов, неудовлетворительное качество работ, отсутствие надежных методов контроля, устанавливающих качество текущей работы и ошибки в эксплуатации таких сооружений.

Дифференцирование аварий в зависимости от типа плотин и их высоты (для  $H = 5...15$ ;  $15...30$ ;  $30...50$  и  $50...100$  м) показывает, что основная их доля приходится на грунтовые плотины (рис. 2): соответственно 67,7; 82,1; 72,7 и 59,1 % от общего числа рассмотренных плотин в каждом интервале указанных высот [1–4].

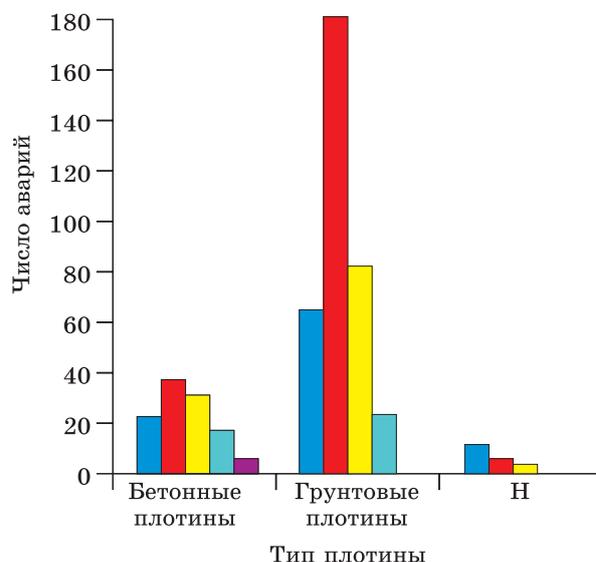


Рис. 2. Распределение аварий от типа плотин и их высоты: ■  $H = 5...15$  м; ■  $H = 15...30$  м; ■  $H = 30...50$  м; ■  $H = 50...100$  м; ■  $H > 100$  м

Приведенный анализ показывает, что наибольшее число аварий и повреждений происходит на плотинах высотой до 30 м (см. рис. 2). Это объясняется как недооценкой собственниками гидроузлов вопросов безопасности и низкой квалификацией эксплуатационных кадров, так и недостатком финансовых ресурсов [1–4].

Согласно генеральному докладу по вопросу 75 «Повреждения и аварии плотин» 19 Международного конгресса по большим плотинам, совершенно очевидна зависимость числа аварий плотин от времени их возведения [2–4]. Из 17 406 рассмотренных плотин 5268 было возведено до 1950 года. Из этого ряда 117 сооружений, или 2,2 %, разрушилось. Из оставшихся 12 138 плотин, построенных

в период 1951–1986 годов, выявлено 59 разрушений, или менее 0,5 %. Следует отметить, что около 70 % аварий плотин происходило в первые десять лет их эксплуатации, из них более половины наблюдалось в периоды строительства и начального наполнения водохранилища. Интенсивность аварий плотин, возведенных до 1990 года, превышает 4 % в год.

В последние годы особое внимание уделяется функционированию подпорных гидротехнических сооружений не только из-за их во многих случаях неудовлетворительного технического состояния, возраста, но и из-за опасения возникновения чрезвычайных ситуаций в условиях возможного проведения террористических актов и военных действий, т. е. в условиях воздействия на сооружения неэксплуатационных нагрузок. Механизм аварий и повреждений плотин, вызванных указанными действиями, не поддается достоверному прогнозу в полной мере. Вместе с тем, учитывая, что терроризм и военные действия преследуют цель нанесения максимально возможного ущерба, следует

ожидать, что объектами указанных действий могут стать наиболее уязвимые и доступные для подрывов, обстрелов и бомбардировок сооружения и их элементы, например, быки водосбросов, контрфорсы, крепления и экраны верховых откосов грунтовых плотин. Подрыв массивных бетонных сооружений маловероятен, поскольку требует значительной подготовки по времени и использования больших объемов взрывчатых веществ, потому не может быть незамеченным. Число террористических актов в России за 2002–2006 годы составило 1616. Данные распределения терактов по масштабу с оценкой их частоты в год, т. е. вероятности терактов в год для России, с учетом их условно равномерного распределения во времени, говорит об актуальности разработок качественно новых расчетно-теоретических методов оценки надежности и безопасности гидротехнических сооружений с применением расчетных комплексов, обеспечивающих адекватный многовариантный анализ их технического состояния (таблица) [3].

**Число террористических актов в России за 2002–2006 годы**

Общее количество терактов	Масштаб терактов	Число терактов	Частота терактов в год
1616	Небольшие	1340	$2,68 \times 10^2$
	Средние	220	$4,40 \times 10$
	Крупные	54	$1,08 \times 10$
	Очень крупные	2	$0,40 \times 10^0$

Конструктивно все грунтовые подпорные гидротехнические сооружения примерно схожи, в том числе по виду и сочетанию действующих на них постоянных и временных нагрузок. Можно разработать общую методику расчета гидротехнических сооружений с учетом воздействия взрывных и ударных нагрузок. Для напорных гидротехнических сооружений целесообразно определить степень эксплуатационных, статических, динамических и аварийных нагрузок.

Для оценки влияния неэксплуатационных нагрузок в виде кратковременного динамического воздействия на сооружения необходимо:

определить действующие нагрузки на гидротехническое сооружение;

рассчитать напряженно-деформированное состояние и кинематические параметры основных элементов конструкции

сооружения;

рассчитать кинематические параметры сооружения в целом.

Представляется возможным и целесообразным рассмотреть следующие расчетные случаи:

воздействие взрыва – что может привести к взрыву и разрушению элементов гидротехнического сооружения или отдельных сооружений гидроузла?

влияние взрыва на целостность гидротехнического комплекса (гидроузла), включающее ударное воздействие на гидротехническое сооружение осколков отдельных конструктивных элементов гидроузла;

влияние неэксплуатационных динамических нагрузок на несущие конструктивные элементы тела плотины.

Схема определения нагрузок,

возникающих при воздействии взрыва, является ключевым фактором при выборе подходов и концепций в создании конструктивных решений гидротехнических сооружений и их расчетов. Это обусловлено отсутствием следующих экспериментальных данных: о параметрах взрыва (аварийного или в результате террористического акта) в ближней зоне взрыва; о характере и типах образующихся при этом внеэксплуатационных нагрузок и их сочетании, вероятностном распределении нагрузки по конкретной области сооружения; о случайном характере ударного воздействия.

Понятно, что мощность взрыва является величиной переменной и будет тем сильнее, чем большее количество неблагоприятных факторов соединятся. Поэтому степень повреждения гидротехнического сооружения будет зависеть от величины влияния энергии взрыва в ударной волне в ближней зоне взрыва.

Снижение степени повреждения тела плотины, а также негативного влияния ударного импульса при воздействии взрыва гидроагрегата можно обеспечить как на стадии проектирования, так и в период эксплуатации гидротехнического сооружения.

До настоящего времени расчеты нагрузок на гидросооружения, в том числе и на тело плотины, от воздействия взрыва практически не проводились. В зоне взрыва распространяется детонационная волна с постоянным избыточным давлением. В этой связи проблема определения нагрузок на сооружения при действии ударного импульса связана в первую очередь со случайным характером воздействия, а разнообразие возникающих случаев требует обязательного учета их специфики.

На эксплуатируемых гидротехнических объектах ситуации, приводящие к механическому ударному или динамическому воздействию на сооружение, могут развиваться по одному из следующих сценариев:

столкновение судовой техники с сооружением;

подрыв автомобиля с взрывчатым веществом на гребне плотины;

подрыв заряда взрывчатого вещества, заложенного в гребень плотины;

падение воздушного судна (самолета) на гребень плотины;

падение самолета с зарядом взрывчатого вещества на гребень или откосы плотины.

Главные отличия ударных воздействий от взрывных следующие: взаимодействие ударяющего тела с конструкцией; ограниченная площадь приложения нагрузки; кратковременное действие; волновые процессы, возникающие в теле плотины, и т. п.

Поэтому при расчетах необходимо учитывать местное и общее действие удара. Местное действие удара сопровождается возникновением локальных деформаций и разрушений (проникание в тело плотины, разрушение материала верхнего бьефа плотины). Общее действие характеризуется значительными общими деформациями, которые могут привести к серьезным последствиям.

Сложности определения нагрузок от ударного воздействия связаны с тем, что параметры воздействия, физические и геометрические характеристики соударяемой массы в основном неизвестны и имеют случайный характер, а экспериментальные и теоретические результаты по ударному воздействию тел с неоднородными физическими характеристиками в настоящее время практически отсутствуют.

В нашей стране и за рубежом были проведены исследования, которые показали, что при соударении деформирующейся массы с преградой свыше 80 % кинетической энергии поглощается соударяемой массой вследствие пластических деформаций [6–9].

На сегодняшний день определены основные подходы к оценке воздействия деформируемого тела при соударении с преградой. Если известны геометрические размеры и масса тела, то при ударе масса распределяется равномерно по его объему, причем средняя плотность и усредненный модуль упругости тела оказываются на порядок меньше плотности и модуля упругости преграды. Результаты исследований показывают, что толщина несущих конструкций при ударе зависит от действующего ударного импульса в большей мере, чем от его формы, поскольку форма импульса тождественно отображается законом изменения скорости, а импульс, как известно, существенно зависит от физических характеристик соударяемых тел [6–9].

Следует также отметить, что при ударном воздействии возникает определенное количество ситуаций, имеющих случайный характер, а расчет напряженно-деформированного состояния и кинематических параметров сооружений требует их учета, поэтому обоснование прочности конструкции сооружения при ударном воздействии должно выполняться на основе многовариантного учета всех специальных случаев и определения из них наиболее неблагоприятного.

Нагрузки на сооружение от действия удара определяются по эмпирическим формулам, а действующие импульсы принимаются в виде линейных и кусочно-линейных функций. Проблема снижения действующих нагрузок на тело грунтовой плотины или несущие конструкции других сооружений гидроузла требует решения задачи о прохождении волны в сплошных многослойных средах с учетом взаимодействия защитной толщи с основной конструкцией.

Допускаемые динамические нагрузки от действия взрыва, так же как и статические нагрузки, должны быть оценены по деформации, которая несет опасность для эксплуатации сооружения [7]. Действие взрыва вызывает в грунтах целый ряд быстротекущих механических процессов. Возникновение взрывной газовой камеры в весьма короткие промежутки времени [8, 9], давящей на окружающий грунт с огромной силой, обуславливает зарождение и движение взрывных волн, изменяющих во времени напряженно-деформированное состояние массива грунта и движение частиц со скоростью, меняющейся от нескольких тысяч метров в секунду до нуля.

В качестве предельной нагрузки предлагается принимать такой уровень воздействия, при котором происходят незатухающие деформации. Вследствие кратковременности взрывного воздействия после прекращения его действия приобретенная кинетическая энергия в последующем движении полностью расходуется для преодоления внутреннего трения среды [6–9].

Динамические свойства грунтов зависят от вида динамических воздействий. Чтобы их определить, применяют методы исследования напряженно-деформированного состояния в процессе распределения

возникающих волн напряжений. Основными характеристиками динамических свойств грунтов являются [6–9]:

характеристики упругих и поглощающих свойств при динамических нагрузках малой интенсивности (непревышающий предел текучести);

обобщенные коэффициенты жесткости оснований;

характеристики сжимаемости грунтов при динамических нагрузках значительной интенсивности (превышающий предел текучести);

динамические характеристики сопротивляемости деформациям формоизменения (сдвига) и предельного состояния (прочности грунтов).

Исследованиями динамических свойств грунтов занимался Н. Д. Красников [7]. Он изучал волновые процессы, происходящие в грунтах при динамических воздействиях, описывал их математически, исследовал расчетные схемы моделей, изучал свойства грунтов [6–9].

Грунты в динамике рассматривают как сплошные среды, непрерывно заполняющие пространство. При рассмотрении волновых процессов в грунтах наибольшее применение находят следующие модели грунтов: идеально упругой (линейной и нелинейной) и упругопластической среды (Х. А. Рахматулина, С. С. Григоряна и др.); вязкопластической среды (Г. М. Ляхова); нелинейная дилатационная модель (А. П. Синицина) и др. [6–9].

При расчетах гидротехнических сооружений, подверженных многообразному сочетанию эксплуатационных и ударно-динамических (неэксплуатационных) нагрузок, необходимо использовать вероятностно-статистические методы, позволяющие с достаточной долей вероятности прогнозировать степень влияния и нанесенного ущерба.

#### Выводы

Сложное напряженно-деформированное состояние грунтового сооружения в процессе высокоинтенсивного нагружения имеет ярко выраженный характер, который требует учета взаимодействия волн напряжений в теле плотины и локализации зон повреждения. Задача пространственного расчета грунтовой плотины должна рассматриваться в рамках единого комплексного подхода к эксплуатационным, статическим и ударно-

динамическим нагрузкам, что требует создания качественно новых расчетно-теоретических методов оценки надежности и безопасности гидротехнических сооружений, обеспечивающих адекватный многовариантный анализ их технического состояния.

1. **Жарницкий В. Я.** Оперативный геотехнический контроль в обеспечении качества устройства каменно-земляных плотин и прогноз их деформаций по результатам строительства: монография. – М.: ФГБОУ ВПО МГУП, 2013. – 172 с.

2. **Радченко С. В.** Причины повреждений и аварий грунтовых плотин (по данным СИГБ) // Известия ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева. – 2010. – Т. 258. – С. 99–113.

3. World Register of Dams. – Paris: ICOLD, 1985. – 753 p.

4. ICOLD. GENERAL REPORT. QUESTION 75. – Florence: Incidents and Failures of Dams, 1997.

5. **Каякин В. В.** Оценка вероятности и риска террористических актов на гидро-

технических сооружениях // Гидротехническое строительство. – 2009. – № 4. – С. 15–18.

6. **Зарецкий Ю. К., Ломбардо В. Н.** Статика и динамика грунтовых плотин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.

7. **Красников Н. Д.** Динамические свойства грунтов и методы их определения. – М.: Стройиздат (Ленинградское отделение), 1970. – 242 с.

8. **Ляхов Г. М.** Основы динамики взрыва в грунтах и жидких средах. – М.: Недра, 1964. – 216 с.

9. **Ляхов Г. М., Полякова Н. И.** Волны в плотных средах и нагрузки на сооружения. – М.: Недра, 1967. – 231 с.

Материал поступил в редакцию 01.10.13.

**Жарницкий Валерий Яковлевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Основания и фундаменты, строительство и экспертиза объектов недвижимости»

Тел. 8-905-720-30-72

E-mail: Zharnitskiy@msuee.ru,

**Сергеев Роман Геннадьевич**, аспирант

Тел. 8-916-053-90-57

УДК 502/504:627.8:532.5

## В. И. АЛТУНИН

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

## О. Н. ЧЕРНЫХ

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

## ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАБОТЫ НИЖНИХ БЪЕФОВ ГОФРИРОВАННЫХ ВОДОПРОПУСКНЫХ ТРУБ

*Приведены результаты экспериментальных исследований водопропускных сооружений из гофрированных металлических труб. Выявлены основные факторы, позволяющие определить глубину и скорость водного потока на выходе из гофрированной трубы с гладким лотком по дну.*

*Металлические гофрированные водопропускные трубы, экспериментальные исследования, безнапорный и полупонапорный режимы работы, гладкий лоток, коэффициент шероховатости.*

*The results of experimental researches of culvert constructions made of corrugated metal pipes are given. There are identified the main factors which make it possible to determine the depth and speed of the water flow on the outlet of the corrugated pipe with a smooth bottom tray.*

*Corrugated metal culvert pipes, experimental studies, non-pressure and semi-pressure modes of operation, smooth tray, roughness coefficient.*