

Gosenergoizdat, 1959. – 208 p.

3. **Tumanyan V.I.** Hydraulics of siphon spillways. – M. L.: Gosenergoizdat, 1949. – 99p.

4. **Levi N.I.** Simulation of hydraulic phenomena. – M., L.: Gosenergoizdat, 1960. – 235p.

5. **Lyakhter V.M., Prudovsky A.M.** Hydraulicsimulation. – M: Energoatomizdat, 1984. – 390 p.

Received on October 12, 2015.

#### Information about the authors

**Gurjev Alim Petrovich**, doctor of technical sciences, professor of the department of

complex usage of water resources and hydraulics; FSBEI HE RSAU – MTAA; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikovo, 19.

**Khanov Nartmir Vladimirovich**, doctor of technical sciences, head of the department of hydraulic structures; FSBEI HE RSAU – MTAA; 127550, Moscow, ul. Boljshaya Academicheskaya, 44; tel.: 8 (499) 976-00-15; e-mail: vkhanov@yahoo.com.

**Mezentseva Natalja Andreevna**, post graduate student; AO «Institute Hydroproject», 125993, г. Moscow, Volokolamskoye sh., 2; тел.: +7-985-484-16-78; e-mail: mezentceva89@mail.ru.

УДК 502/504:627.82.034.93

#### В. Я. ЖАРНИЦКИЙ, Е. В. АНДРЕЕВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва

### ГРУНТОВЫЕ ПЛОТИНЫ КАК ОБЪЕКТ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

*Прорыв грунтовых плотин происходит всегда неожиданно и стихийно. Поэтому для своевременного оповещения о чрезвычайной ситуации по-прежнему актуальны вопросы совершенствования и разработки систем прогноза риска таких ситуаций. Приводится системный подход к оценке риска аварий грунтовых плотин на основе характеристик, потенциально влияющих на степень поврежденности тела плотины и ее основания, где в поле влияния динамических нагрузок тело плотины рассматривается, как динамическая система, в которой выделяется ряд динамических переменных, характеризующих состояние системы и что величины таких переменных в любой отрезок времени представляются из определенного набора по определенным правилам. Отмечается, что понятие динамической системы есть теоретическая абстракция, как например материальная точка – частица грунта, несжимаемая жидкость, занимающая поровый объем грунта, газ в том же поровом объеме и т. д. Реальные гидротехнические сооружения могут рассматриваться, как динамические системы только в определенном приближении, в той мере, в какой при описании динамики можно игнорировать тонкие детали внутренней структуры грунта и его способности воспринимать приложенные нагрузки.*

*Низконапорные грунтовые плотины, прорыв плотины, опасность затопления, надежность, динамическая нагрузка, поле влияния, система.*

**Введение.** При значительных достижениях техники и совершенствовании технологии строительства, повышении общего уровня знаний, опыта и технических решений, аварии грунтовых плотин имеют место. Во всех известных случаях разрушений и повреждений плотин, последние были вызваны действием различных объективных и субъективных факторов. К числу первых относят природные стихийные явления: ураганы, катастрофические ливни (паводки), горные обвалы (оползни), землетрясения и др. К субъективным факторам относят ошиб-

ки в проектировании, низкое качество используемых грунтовых материалов, неудовлетворительное качество работ, отсутствие надежных методов контроля, устанавливающих качество текущей работы и отсутствие или ошибки в эксплуатации таких сооружений [2, 3]. Все эти события провоцируют возникновение чрезвычайных ситуаций, дестабилизируют экономику государства, приводят к увеличению пострадавших от таких происшествий и росту прямых и косвенных ущербов.

За последние 10 лет конца прошлого столетия в России от опасных природных и

техногенных процессов погибли более 3000 человек и пострадали около 200 тысяч [2].

В соответствии с [1] видно, что грунтовые плотины являются наиболее распространенным видом напорных гидротехнических сооружений и составляют 82,9 % от общего числа плотин мира. Учитывая особенности экономической ситуации сложившейся в 90-ые годы, в значительной степени, а в большинстве случаев полностью был утрачен финансовый и административный контроль над большей частью низко- и средненапорных сооружений на территории Российской Федерации, что в значительной степени повлияло на техническое состояние ГТС, большинство из которых перешло в категорию аварийных.

Поэтому важнейшей задачей является проблема узаконивания механизма эксплуатации бесхозных низко- и средненапорных грунтовых плотин. Также важно определить порядок сбора информации о техническом состоянии ГТС с оформлением соответствующих документов. ГТС не имеющие собственников несут в себе потенциальную опасность для жизни и здоровья людей, а также для имущественного фонда находящегося в потенциальной зоне затопления. Большинство таких сооружений было построено в период с 1970–1990 годы и предназначались для хозяйственных нужд населения (орошение и мелиорация сельскохозяйственных земель, водопоя крупного рогатого скота). Такие сооружения так же могут служить точками притяже-

ния для совершения террористических актов потому, как не имеют соответствующей зоны отчуждения для гражданского населения.

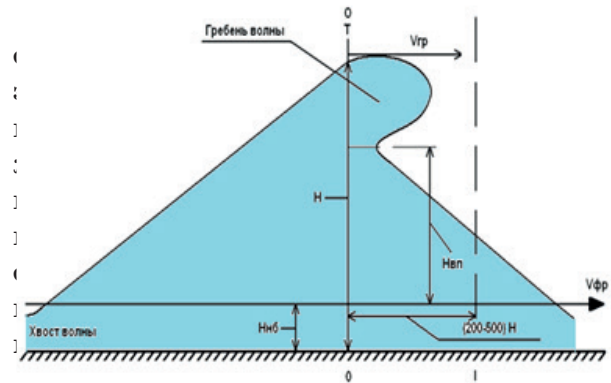


Рис. 1. Волна прорыва

Причинами прорыва ГТС, могут быть, как природные факторы (землетрясения, увеличение атмосферных осадков, оползни) так и конструктивные дефекты ГТС прогрессирующие во времени из-за ненадлежащего контроля за их состоянием [4]. Ответственность за ущерб, нанесенный в результате прорыва бесхозных ГТС несут администрации муниципальных районов на территории, которых они расположены. Однако оформить правоустанавливающие документы муниципалитеты не в состоянии, так как для этого требуются немалые средства.



Рис. 2. Разрушение объектов инфраструктуры в нижнем бьефе после прорыва плотин

**Об оценке риска аварий на ГТС.** Важно выработать системный подход к оценке риска аварий на ГТС, для этого необходимо произвести анализ состояния низко- и средненапорных плотин. Это позволит выработать организационно-технические решения, ряд практических мер по предупреждению опасности прорыва ГТС и сведет к минимуму угрозы для жизни и здоровья людей, а также имущественного фонда, и окружающей среды.

Сложность оценки риска аварий заключается еще и в многофакторности характеристик, потенциально влияющих на степень поврежденности тела плотины и ее основания. Например, полнота исходной информации, особенности геологии, климатическая зона размещения ГТС, а самое главное конструктивная схема и назначение объекта, что характеризуется режимом работы сооружения. При этом, если возникают отказы затворов

водосбросных сооружений, то это можно классифицировать, как отказ механической части оборудования или отказ электрических систем, так похожих на аварии в промышленной сфере где все элементы «цепи-надежности» в достаточной степени стандартизованы. Аварии грунтовых плотин вследствие нарушения устойчивости или прочностных характеристик сооружения совсем не похожи на аналогичные в промышленности. Также нельзя забывать об анализе риска аварий на ГТС из-за ошибочных действий персонала, как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации сооружения.

В связи с этим возникает необходимость возможности оценки риска аварии, на основе многофакторной модели включающей максимально возможное количество критериев, а также учитывающей класс сооружения и его назначение (рис. 3) [7].

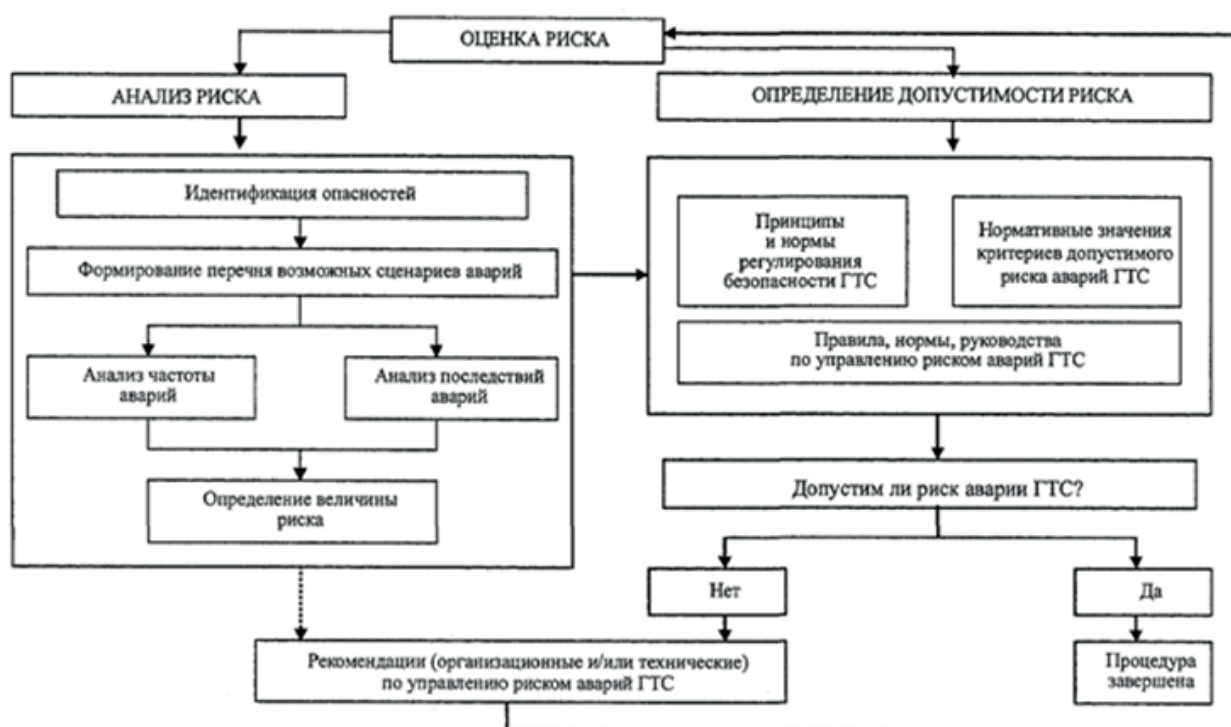


Рис. 3. Основные составляющие процедуры анализа и оценки риска аварий ГТС [7]

Анализ риска в обязательном порядке включает три основные стадии [7]:

идентификация опасностей – выявление всех возможных нежелательных явлений, процессов и событий, способных привести к аварии анализируемого сооружения; по результатам идентификации опасностей разрабатывается перечень

сценариев аварий, возможных на сооружении;

анализ частоты – оценка (качественная и/или количественная) среднегодовой вероятности реализации выявленных на предыдущей стадии нежелательных явлений, процессов и событий, а также основных сценариев аварий, возможных на сооружении;

анализ последствий – оценка (качественная и/или количественная) ущерба (вреда) от возможных на анализируемом гидротехническом сооружении аварий, наносимого персоналу объекта, населению, имуществу и окружающей природной среде [7].

Многофакторная модель оценки риска аварии позволит в достаточной степени получить объективную информацию о состоянии ГТС и в необходимые сроки разработать план мероприятий по ликвидации угрозы затопления.

Организация и планирование работ по определению риска аварий гидротехнических сооружений предполагает проведение ряда подготовительных и практических мероприятий:

формализацию проблем, анализируемых гидротехнических сооружений;

определение источников информации о сооружении с оценкой его территориального расположения для определения предполагаемого ущерба в случае разрушения объекта;

определение критериев оценки риска аварии для конкретного сооружения.

Для объективной оценки технического состояния ГТС необходимо иметь и такие источники информации, как наличие собственника, проектной документации, исходной информации по местоположению и условиях эксплуатации сооружения (хотя бы за последние пять лет), данные об авариях на объекте, результаты предыдущих наблюдений и обследований, если таковые имеются.

На этапе эксплуатации и реконструкции гидротехнического сооружения целью анализа риска является:

уточнение информации об основных опасностях (например, при изменении социально-экономической инфраструктуры в нижнем бьефе гидроузла);

оценка соответствия состояния ГТС и условий его эксплуатации современным нормам и правилам;

определение приоритетных мер по ремонту и реконструкции ГТС, обоснование эффективности затрат на ремонт и реконструкцию;

разработка декларации безопасности эксплуатируемого ГТС;

расчет вероятного вреда, который может быть причинен в результате аварии ГТС, обоснование страховых тарифов и

ставок;

квалифицированное расследование причин имевших место аварий и неполадок на ГТС;

разработка рекомендаций по организации безопасной эксплуатации ГТС, взаимодействию с органами надзора, страховыми компаниями и др.;

совершенствование планов локализации аварийных ситуаций и действий в чрезвычайных ситуациях;

разработка антитеррористических паспортов объектов и др. [7].

На этапе вывода из эксплуатации и консервации гидротехнического сооружения целью анализа риска может быть:

обоснование необходимых и достаточных мер по выводу из эксплуатации и консервации объекта, обеспечивающих его безопасность на указанных стадиях жизненного цикла ГТС;

обоснование возможности размещения новых объектов на территории законсервированного сооружения и др. [7].

Критерии допустимого риска аварий гидротехнических сооружений могут быть заданы нормативно-правовыми актами или (до выхода в свет нормативов) определены на этапе организации и планирования работ. Основные требования к выбору критериев допустимого риска – их обоснованность и определенность. В общем виде основой для определения критериев допустимого риска являются:

отечественное и зарубежное законодательство по безопасности гидротехнических сооружений;

правила и нормы безопасности в области гидротехники;

дополнительные требования специально уполномоченных органов надзора и контроля за безопасностью ГТС;

сведения об имевших место авариях гидротехнических сооружений различных типов и их последствиях;

региональные законодательные и нормативные акты;

соглашение о допустимости риска аварий ГТС между заинтересованными сторонами;

опыт практической деятельности [7].

**Динамические системы.** В зависимости от региона эксплуатации, гидротехническое сооружение может эксплуатироваться в разных полях нагрузок. Например,

важно учитывать влияние динамических нагрузок в сейсмоактивных регионах на гидротехнические сооружения.

В связи с этим, существует проблема классификации нагрузок влияющих на гидротехническое сооружение. Например, поле влияния статических нагрузок на тело плотины и последствия от такого резко отличается от воздействия динамических нагрузок на тоже сооружение по времени воздействия и величине приложенных сил. Поэтому целесообразно уделить особое внимание сооружениям, потенциально попадающим под такое сочетание нагрузок, как на этапе проектирования, когда обосновывается конструкция тела сооружения, так и во время эксплуатации.

В поле влияния динамических нагрузок тело плотины можно рассмотреть, как динамическую систему. В такой системе можно выделить ряд динамических переменных, характеризующих состояние системы и что величины таких переменных в любой отрезок времени будут происходить из определенного набора по определенным правилам. Если состояние гидротехнического сооружения задается набором  $X$ -величин, то измеренное состояние во времени, или динамику изменения гидротехнического сооружения, можно представить как движение точки в  $X$ -мерном фазовом пространстве, которое называют фазовой траекторией.

Понятие динамической системы применительно к гидротехническому сооружению нельзя рассматривать как систему с чисто механическим содержанием, то есть совокупность сооружений связанных силовым взаимодействием и подчиняющихся системе дифференциальных уравнений вытекающих из законов Ньютона [4].

Итак, тело плотины можно представить, как динамическую систему, то есть как некое фазовое пространство. Тело грунтовой плотины не является однородной средой с точки зрения равномерного восприятия кратковременных динамических нагрузок, поэтому его проще рассматривать, как однофазную среду, состоящую из большого количества его идентичных копий. Поскольку определенный объем грунта представлен совершенно определенным количеством частиц грунта в данном объеме, то в фазовом пространстве данная

система представляется облаком изображающих точек. С течением времени каждая изображающая точка может перемещаться в фазовом пространстве, в зависимости от приложенных нагрузок, как предписано динамическими уравнениями системы, так что форма облака и его размеры могут изменяться. Может случиться, что объем облака будет оставаться постоянным (рис. 4, а) [4].

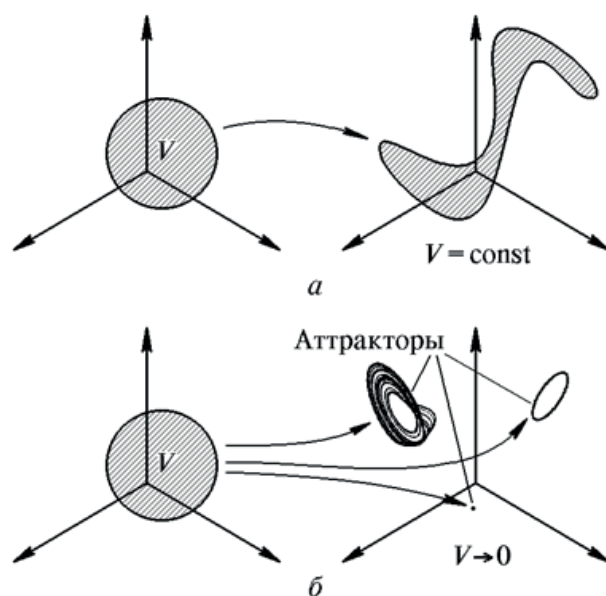


Рис. 4. К определению консервативных (а), и диссипативных (б) динамических систем

Это характерно для консервативных систем, к которым относятся, в частности, гамильтоновы системы. Для гамильтоновой системы размерность фазового пространства  $N$  четная; состояние задается набором динамических переменных  $(q_i, p_i)$  (где  $i = 1, \dots, N/2$ ), называемых обобщенными координатами и импульсами. Количество пар координат и импульсов, то есть величину, вдвое меньшую размерности фазового пространства, называют числом степеней свободы. Для систем с непрерывным временем динамика задается уравнениями Гамильтона:

$$p_i = \frac{\partial H(p_1, p_2, \dots, p_{N/2}, q_1, q_2, \dots, q_{N/2})}{\partial q_i};$$

$$p_i = \frac{\partial H(p_1, p_2, \dots, p_{N/2}, q_1, q_2, \dots, q_{N/2})}{\partial p_i}.$$

где  $H(p_1, p_2, \dots, p_{N/2}, q_1, q_2, \dots, q_{N/2})$  – определенная для каждой данной системы функция  $N$  переменных именуемая гамильтонианом.

Гамильтонова система с дискретным временем в самом общем случае может быть выражена неявно, через одну функцию  $N$  переменных  $F(p_1, p_2, \dots, p_{N/2}, q'_1, q'_2, \dots, q'_{N/2})$ , называемую производящей функцией:

$$p_i = \frac{\partial F(q_1, q_2, \dots, q_{N/2}, q_1, q_2, \dots, q_{N/2})}{\partial q_i};$$

$$p_i = \frac{\partial F(q_1, q_2, \dots, q_{N/2}, q'_1, q'_2, \dots, q'_{N/2})}{\partial \dot{q}_i}.$$

Здесь величины отмеченные штрихами относятся к следующему моменту дискретного времени [4].

Если рассматривать работу грунтовой плотины, как диссипативную систему то для них характерно, что с течением времени облако изображающих точек концентрируется на одном или нескольких подмножествах фазового пространства обладающих нулевым фазовым объемом (рис. 4, б). Это означает, что режим, возникающий в системе предоставленной самой себе, в течение длительного времени, становится независимым от начального состояния (по крайней мере, при вариации начальных условий в некоторых конечных пределах). Простым примером аттрактора системы можно представить тело грунтовой плотины в нормальном эксплуатационном состоянии (в состоянии покоя).

Следует четко понимать, что понятие динамической системы есть теоретическая абстракция, как например материальная точка – частица грунта, несжимаемая жидкость, занимающая поровый объем грунта, газ в том же поровом объеме и др. Реальные гидротехнические сооружения могут рассматриваться, как динамические системы только в определенном приближении, в той мере, в какой при описании динамики можно игнорировать тонкие детали внутренней структуры грунта и его способности воспринимать приложенные нагрузки [4].

### Вывод

Таким образом, чтобы показать многофазовую неоднородность и нестабильность гидротехнических сооружений из грунтовых материалов и невозможность объективной оценки показателя эксплуатационной надежности по «стандартному» набору критериев, из-за невозможности отнести их ни к статическим, ни к динамическим системам, потому что существует

множество неконтролируемых показателей «областей системы», поведение которых при различных кратковременных динамических и квазидинамических нагрузках сложно предсказать, в сравнении с «идеальной» динамической системой, где по исходному состоянию зная силы, действующие на систему и ее физическую сущность, можно определить конечное состояние.

### Библиографический список

1. World Register of Dams. – Paris: ICOLD, 1985. – 753р.
2. **Жарницкий В. Я., Андреев Е. В.** Проблемы эксплуатационной надежности и безопасности грунтовых плотин // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 1. – С. 42–47.
3. **Жарницкий В. Я., Андреев Е. В.** Принципы формализации в построении математической модели оценки надежности низконапорных грунтовых плотин // Природообустройство. – 2012. – № 4. – С. 39–44.
4. **Кузнецов В. С.** Критерии оценки надежности и безопасности грунтовых плотин // Известия ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева. – Т. 238. – М.: Стройиздат, 1983.
5. **Кузнецов С. П.** Динамический хаос. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2001. – 296 с.
6. Министерство по чрезвычайным ситуациям РФ. МЧС России // [Эл. документ].
7. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. СО 153-34.20.501-2003 [Электронный ресурс]. – URL: [http://znaytovar.ru/gost/2/SO\\_15334205012003\\_Pravila\\_texn.html](http://znaytovar.ru/gost/2/SO_15334205012003_Pravila_texn.html) (Дата обращения 28.01.2016).
8. Методические указания по проведению анализа риска аварий гидротехнических сооружений: СТП ВНИИГ 210.02. НТ-04. – С.-Пб.: ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева, 2005.

Материал поступил в редакцию 02.11.2015.

### Сведения об авторах

**Жарницкий Валерий Яковлевич**, доктор технических наук, профессор кафедры оснований и фундаментов, строительства и экспертизы объектов недвижимости; ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени

К. А. Тимирязева; 127550, г. Москва, ул. Большая Академическая, 44; тел.: +7-905-720-30-72; e-mail: zharnitskiy@mail.ru.

**Андреев Евгений Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры оснований и фундаментов,

строительства и экспертизы объектов недвижимости; ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева; 127550, г. Москва, ул. Большая Академическая, 44; тел.: +7-929-648-09-27; e-mail: Andreev-rf@mail.ru.

**V. YA. ZHARNITSKIY, E. V. ANDREEV**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian Timiryazev State Agrarian University», Moscow

## EARTH DAMS AS AN OBJECT OF THE DYNAMIC SYSTEM

*Break of soil dams always happens unexpectedly and spontaneously. Therefore for the timely warning about an emergency situation topical questions of improvement and development of risk forecasting systems of such situations are still urgent. The system approach to the assessment of accidents risk of soil dams on the basis of the characteristics which potentially influence the damage degree of the dam body and its basis where in the field of influence of dynamic loadings the dam body is considered as a dynamic system in which a number of dynamic variables characterizing the condition of the system stands out and the values of such variables are given in any interval of time from a certain set according to certain rules. It is noted that the conception of a dynamic system is a theoretical abstraction, as an example, a material point – a ground particle, incompressible liquid occupying a porous volume of ground, gas in the same porous volume etc. Actual hydraulic engineering structures can be considered as dynamic systems only in the certain approximation, in such a measure when at the description of the dynamics it is possible to ignore thin details of the internal structure of soil and its capability to take the applied loading.*

*Low-head soil dams, dam break, risk of flooding, reliability, dynamic load, field of influence, system.*

### References

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

2. Zharnitskiy V. Ya., Andreev E. V. Problems of operational reliability and safety of earth dams // Izvestiya vuzov. Geodesy and aerosurveying. – 2013. – № 1. – P. 42–47.

3. Zharnitskiy V. Ya., Andreev E. V. Principles of formalization in building a mathematical model of assessment of reliability of low-head earth dams // Environmental engineering. – 2012. – № 4. – P. 39–44.

4. Kuznetsov V. S. Criteria of assessment of reliability and safety of soil dams // Izvestiya VNIIG named after B.E. Vedeneev. – V. 238. – M.: Strojizdat, 1983.

5. Kuznetsov S. P. Dynamic chaos. – M.: Publishing house of physical-mathematical literature, 2001. –

296 p.

6. The RF Ministry of emergency situations. MCHS of Russia // [El. Document].

7. Rules of technical operation of power stations and networks of the Russian

Federation. CO CO 153-34.20.501-2003 – URL: [http://znaytovar.ru/gost/2/SO\\_15334205012003\\_Pravila\\_texn.html](http://znaytovar.ru/gost/2/SO_15334205012003_Pravila_texn.html)

8. Methodological instructions on carrying out an analysis of accidents risks of hydraulic structures: CTPVNIIG 210.02. HT-04. – S.-Pb.: VNIIG named after B.E. Vedeneev, 2005.

Received on November 2, 2015.

### Information about the authors

**Zharnitskiy Valeriy Yakovlevich**, doctor of technical sciences, professor of the chair of bases and foundations, construction and examination of real estate objects; FSBEU HE RSAU-MTAA; 127550, Moscow, ul. Boljshaya Academicheskaya, 44; tel.: +7-905-720-30-72; e-mail: zharnitskiy@mail.ru.

**Andreev Yevgeniy Vladimirovich**, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of bases and foundations, construction and examination of real estate objects; FSBEU HE RSAU-MTAA; 127550, Moscow, ul. Boljshaya Academicheskaya, 44; tel.: +7-929-648-09-27; e-mail: Andreev-rf@mail.ru.