

**В.Я. ЖАРНИЦКИЙ, Е.В. АНДРЕЕВ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Российский государственный аграрный университет РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва,  
Российская Федерация

### **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВОЛНОВЫХ НАГРУЗОК НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ**

*Если рассматривать гидротехнические сооружения как систему, то нагрузки в этой системе являются наименее изученными составляющими, т.к. имеют широкий диапазон изменчивости как по временным параметрам, так и по пространственным. Расчётные модели и подходы, которые используются в практике проектирования, имеют достаточно условный характер. Наиболее характерными ошибками в процессе установления нагрузок является их описание по временным параметрам, что приводит к искажению картины динамического поведения гидротехнического сооружения, т.к. именно при динамических воздействиях на сооружение ярко проявляется обратная связь между влиянием нагрузок и самой системой. При исследовании такие нагрузки можно классифицировать как внешние и внутренние. По природе происхождения нагрузки и воздействия весьма разнообразны и проявляются в специфичных формах. Основой анализа воздействий могут служить теория надёжности и применение методов статики и динамики при расчётах гидротехнических сооружений. Существует несколько подходов, решающих задачу о воздействии ветровых волн на гидротехнические сооружения. Основной подход – замещение набегающих на гидротехническое сооружение нерегулярных волн регулярными волнами. Второй подход учитывает волновое воздействие как случайный процесс, возникающий во времени и не регламентированный чёткими интервалами воздействия. Для получения объективных данных о величине наработки и, соответственно, остаточном эксплуатационном ресурсе гидротехнических сооружений необходимо учитывать множество воздействий, как природного, так и техногенного характера. Учёт влияния волновых нагрузок при этом является неотъемлемой частью при формировании расчётной модели оперативной оценки остаточного ресурса гидротехнических сооружений.*

*Гидротехнические сооружения, долговечность, период наблюдений, временной ряд, статистические данные, прогноз состояния, волновое воздействие, ветровые волны, статистическое описание.*

**Введение.** Для построения расчётных моделей грунтовых плотин важными составляющими являются определение и классификация нагрузок на сооружение. Если рассматривать гидротехнические сооружения как систему, то нагрузки в такой системе являются наименее изученными составляющими, так как они имеют широкий диапазон изменчивости, как по временным параметрам, так и по пространственным, и те расчётные модели, которые используют в практике проектирования, имеют достаточно условный характер.

Наиболее частыми ошибками в процессе установления нагрузок является их описание по временным параметрам, что в свою очередь приводит к искажению картины динамического поведения гидротехнического сооружения. Именно при динамических воздействиях на сооружение ярко проявляется обратная связь между влиянием нагрузок и самой системой, например, «сооружение-основание». Сама по себе нагрузка является одним из способов описания взаимосвязи гидротехнического сооружения с окружающей средой, но, естественно, не является

единственной. Например, при описании не силового, а кинематического влияния, когда внешние усилия по отношению к эксплуатируемому гидротехническому сооружению ограничивают или вовсе препятствуют поворотам и перемещениям отдельных частей системы. Условия такого характера, называемые связями, очень часто имеют место практически в любой системе и должны учитываться при построении математической модели расчёта остаточного эксплуатационного ресурса. Конечно, абсолютно жёсткой связи сооружения с основанием или облицовочных материалов с поверхностью верхнего бьефа быть не может. Поэтому справедливо отметить не столько роль непосредственно нагрузок, сколько так называемые воздействия на сооружения. При исследовании гидротехнического сооружения можно классифицировать нагрузки, как внешние и внутренние. Но и такое определение не является исчерпывающим, так как не отражает таких факторов внешней среды, как химическое взаимодействие и, как следствие, коррозию отдельных элементов системы, а также изменение расчётной схемы сооружения в процессе эксплуатации в результате разрушения отдельных связей.

Используемый в современной практике метод расчёта по предельным состояниям предлагает отталкиваться от понятий нормативной величины нагрузки и, соответственно, расчётной величины. Считается, что нормативная величина нагрузки определена нормами проектирования и в какой-то степени соответствует максимальному значению, которое может быть допустимо при штатной эксплуатации гидротехнического сооружения. Но при исследовании бесхозных гидротехнических сооружения такая формулировка становится весьма расплывчатой. Затруднительным является обоснование, каким образом определяется нормальная эксплуатация сооружения и что означает формулировка «наибольшая», отсюда следует, что нагрузки разного характера имеют достаточно широкий диапазон и вероятность проявления. При этом не реализуется одно из базовых условий проектирования – обеспечение равной надёжности одинаковым по классификации сооружениям, которые подвергаются разным нагрузкам, так как для разрушения гидротехнического сооружения не обязательно влияние максимальных значений нагрузок, если обеспеченность надёжностью отдельных его частей не превышает 60% от проектной.

По природе происхождения нагрузки и воздействия весьма разнообразны и проявляются они в достаточно специфичных формах. При этом выборка наблюдений за гидротехническими сооружениями позволяет выделить некоторые общие моменты для анализа этих воздействий в целом на сооружение. Основой для такого анализа может служить теория надёжности, а также применение методов статики и динамики при расчётах гидротехнических сооружений. С применением знаний и опыта этих направлений происходит подбор нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения, их моделирования и определения реакции сооружения на внешние и внутренние воздействия.

#### **Материалы и методы исследований.**

Волнение поверхности водохранилища оказывает серьёзное влияние на гидротехническое сооружение. Значительными нагрузками на гидротехнические сооружения оказываются так называемые гравитационные волны, которые происходят из-за нагона ветра на поверхность воды в водохранилище. Такие волны можно подразделить на:

- нерегулярные волны, элементы которых изменяются случайным образом;
- регулярные волны, элементы которых не изменяются в данной точке акватории;
- бегущие волны, видимая форма которых перемещается в пространстве;
- стоячие волны, видимая форма которых не перемещается в пространстве [1].

В практике проектирования установлена взаимосвязь увязки интенсивности волнения водной поверхности в баллах с показателем высоты волны 3%-й обеспеченности  $h_{3\%}$ , таблица [1]. Во всех вариантах имеется ввиду, что 1%-ая обеспеченность даёт расчётный показатель высоты волны, который не будет превышен с вероятностью 0,01хг.

На сегодняшний момент существует несколько подходов, решающих задачу о воздействии ветровых волн на гидротехнические сооружения. Основной подход заключается в замещении набегающих нерегулярных волн на гидротехническое сооружение регулярными волнами. При этом подходе не учитывается случайный характер процесса нагрузки. Второй подход учитывает волновое воздействие как случайный процесс, возникающий во времени и не регламентированный чёткими интервалами воздействия.

Таблица

Степень волнения, баллы	Характеристика волнения	Высота волны $h_{3\%}$ , м
0	Отсутствует	0
I	Слабое	0...0,002
II	Умеренное	0,002...0,020
III	Значительное	0,020...0,056
IV	Значительное	0,056...0,143
V	Сильное	0,143...0,440
VI	Сильное	0,440...1,285
VII	Очень сильное	1,285...2,580
VIII	Очень сильное	2,580...4,320
IX	Исключительное	Свыше 4,320

Первым результатом по теории волнового движения жидкости можно считать гипотезу о малости высоты волны, которая гласит, что профиль волны имеет простую синусоидальную форму [1]

$$\eta = \cos(kx - \omega t), \quad (1)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $\lambda$  – длина волны.

Это решение, часто называемое волной Эйри, не могло объяснить многие наблюдавшиеся эффекты. Классические результаты

Г. Стокса [2], решившего нелинейную задачу о так называемых волнах конечной высоты (второе приближение), уточнили профиль волны [1]

$$\eta = \cos(kx - \omega t) + \frac{k^2 [2sh^2(k\sqrt{\mu}) - 3]}{4\omega^2 sh(k\sqrt{\mu})} \cos 2(kx - \omega t) \quad (2)$$

где  $\mu = (H/\lambda)^2$  – квадрат относительной глубины водоёма ( $H$  – глубина).

Данной формулировкой подтверждаются все основные характеристики постоянного волнения в зависимости от глубины водохранилища. Поэтому можно сказать, что при волнении высота волны больше увеличивается, нежели уменьшается относительно успокоенной поверхности водохранилища. Значение ширины ложбины больше значения ширины гребня. Данный показатель имеет свойство к увеличению с возрастанием крутизны волны (рис. 1). Можно отметить, что частицы грунта со дна водоёма имеют большую скорость на гребне, чем в ложбине волны, и эта разница усиливается пропорционально уменьшению глубины водоёма.

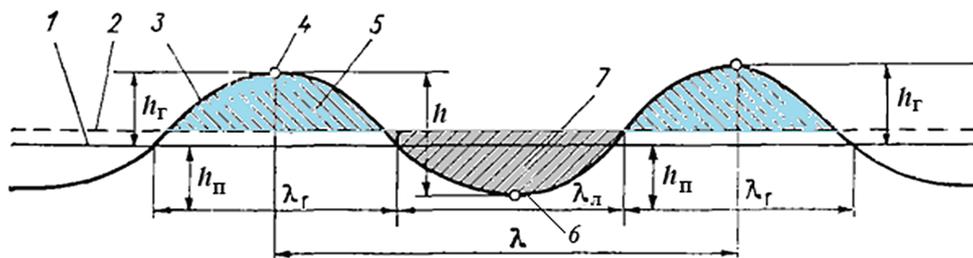


Рис. 1 Профиль волны и её элементы:

1 – статический уровень, 2 – средняя волновая линия, 3 – профиль волны, вершина волны, 5 – гребень волны,  $\lambda_r$  – длина гребня,  $\lambda_d$  – длина ложбины,  $h$  – высота волны,  $h_r$  – высота гребня,  $h_n$  – заглубление подошвы

В данном решении при глубине водохранилища более 5 метров (рис. 2 а) находившиеся на глубине  $z$  частицы жидкости вращаются по кругу с радиусом  $h \cdot \exp \cdot (kz)$  и перемещаются горизонтально поступательно со скоростью  $h^2 k \omega \cdot \exp(2k)$  (Стоксово течение). С уменьшением глубины водохранилища траектории кругового движения частиц воды приобретают вид эллиптического, рисунок 2 б, при которой горизонтальная ось неизменна по отношению к диаметру круга, в то время, как чётко наблюдается уменьшение вертикальной оси.

Так называемая теория Стокса удовлетворяет описанию наблюдаемых явлений

при глубинах водохранилищ  $H/\lambda \geq 0,1$ . Для водохранилищ с меньшей глубиной достаточно точные результаты даёт так называемая теория кноидальных волн де Фриза и Кортвега:

$$\eta = \eta_{min} + hcn^2(kx - \omega t, m), \quad (3)$$

где  $\eta_{min}$  – соответствующее подошве волны отклонение;  $cn$  – эллиптическая функция Якоби с модулем  $m$  ( $0 \leq m \leq 1$ ).

Для акваторий с небольшой глубиной, при расчёте которых используется теория кноидальных волн, преобладает горизонтальное движение скорости частиц жидкости.

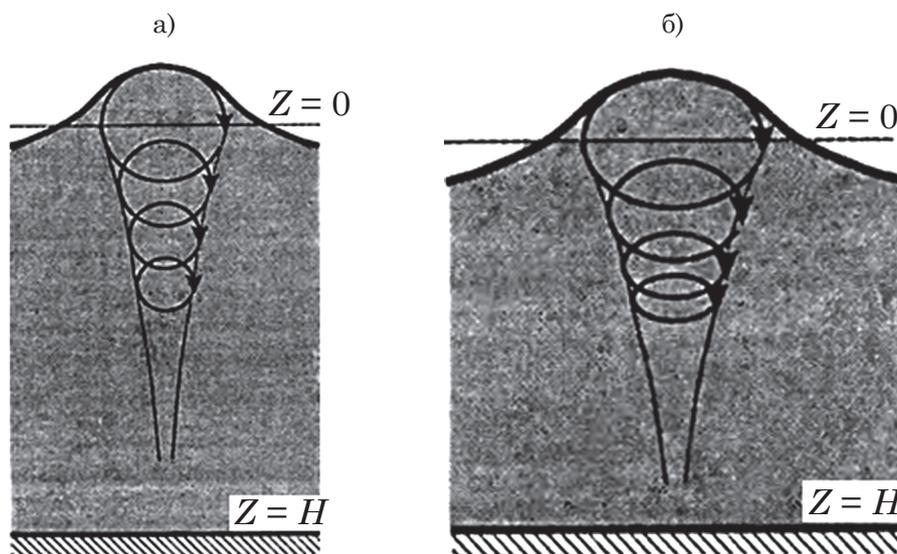


Рис. 2. Строение поверхностных волн [1]

**Результаты исследований.** При оценке остаточного эксплуатационного ресурса гидротехнических сооружений статистические методы, описывающие уровень волнения, предполагают учёт сложного характера нерегулярного волнения, если рассмотреть его как случайный стационарный процесс. За основные показатели таких статистических характеристик можно принять среднюю высоту волн  $\bar{h}$  и, соответственно, средний пе-

риод  $\bar{T}$  и функцию распределения, определяющую вероятность периодов и, соответственно, высот действующих на гидротехническое сооружение волн.

Если вычислить функцию распределения, то можно рассчитать высоту волны  $h_{i\%}$ , которая для значений обеспеченности можно вычислить по следующей формуле

$$h_{0,1\%} = 2,96\bar{h}, h_{1\%} = 2,42\bar{h}, h_{3\%} = 2,11\bar{h}, \quad (4)$$

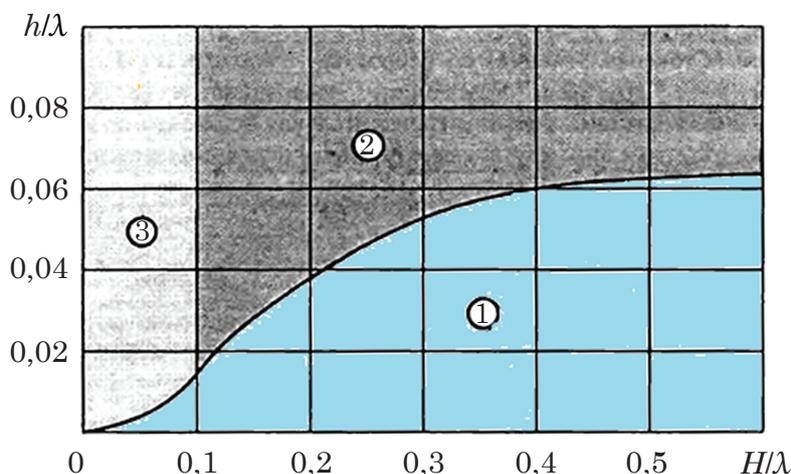


Рис. 3. Диаграмма применимости волновой теории Эйри (1), Стокса (2) и кноидальных волн (3) [1]

Массив статистических данных о функциях распределения за сколько-нибудь продолжительный период, как правило, отсутствует, особенно если у гидротехнического сооружения отсутствует собственник, поэтому по рекомендациям [3] волнение в водохранилище, оказывающее влияние на гидротехническое сооружение, можно опреде-

лить с помощью, так называемых волнообразующих критериев:

- рельеф поверхности дна акватории с учётом изменений отметок поверхности воды;
- размеры и форма подвергнувшегося ветровым нагрузкам водохранилища;
- время воздействия ветра на поверхность водохранилища и его скорость.

В зависимости [3] предлагается использовать значение разгона или расстояния поверхности водной глади охваченной ветром акватории, измеренной по направлению ветра до гидротехнического сооружения для того, чтобы рассчитать элементы ветровых волн.

Усреднённое значение разгона для определения элементов волны рассчитывается по формуле [1]

$$L = k_{vis} \nu / V_w, \quad (5)$$

где  $k_{vis} = 5 \cdot 10^{11}$  – коэффициент;  $\nu = 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$  – кинематическая вязкость воздуха;  $V_w$  – расчётная скорость ветра на высоте 10 м над поверхностью моря, которая

для гидротехнических сооружений I и II классов принимается с обеспеченностью 2%, т.е. 1 раз в 50 лет.

При производстве расчётов для водохранилищ с зонами глубиной более 12 метров определяется безразмерный показатель  $gL / V_w^2$ , по которому с использованием графика (рисунок 4) можно определить величины средней высоты волны  $g\bar{h}_d / V_w^2$  и безразмерного периода  $g\bar{T} / V_w$ .

Данный график получен в результате систематизации результатов проведённых лабораторных исследований и натурных наблюдений [3, с. 71...82] и показатели для него рассчитываются по формуле:

$$\frac{g\bar{h}}{V_w^2} = 0,16 \left\{ 1 - \left[ \frac{1}{1 + 0,006 (gL / V_w^2)} \right]^2 \right\} \times \text{th} \left\{ 0,625 - \frac{(gL / V_w^2)^{0,8}}{1 - \left[ 1 / \left( 1 + 0,006 (gL / V_w^2)^{0,5} \right) \right]^2} \right\}. \quad (6)$$

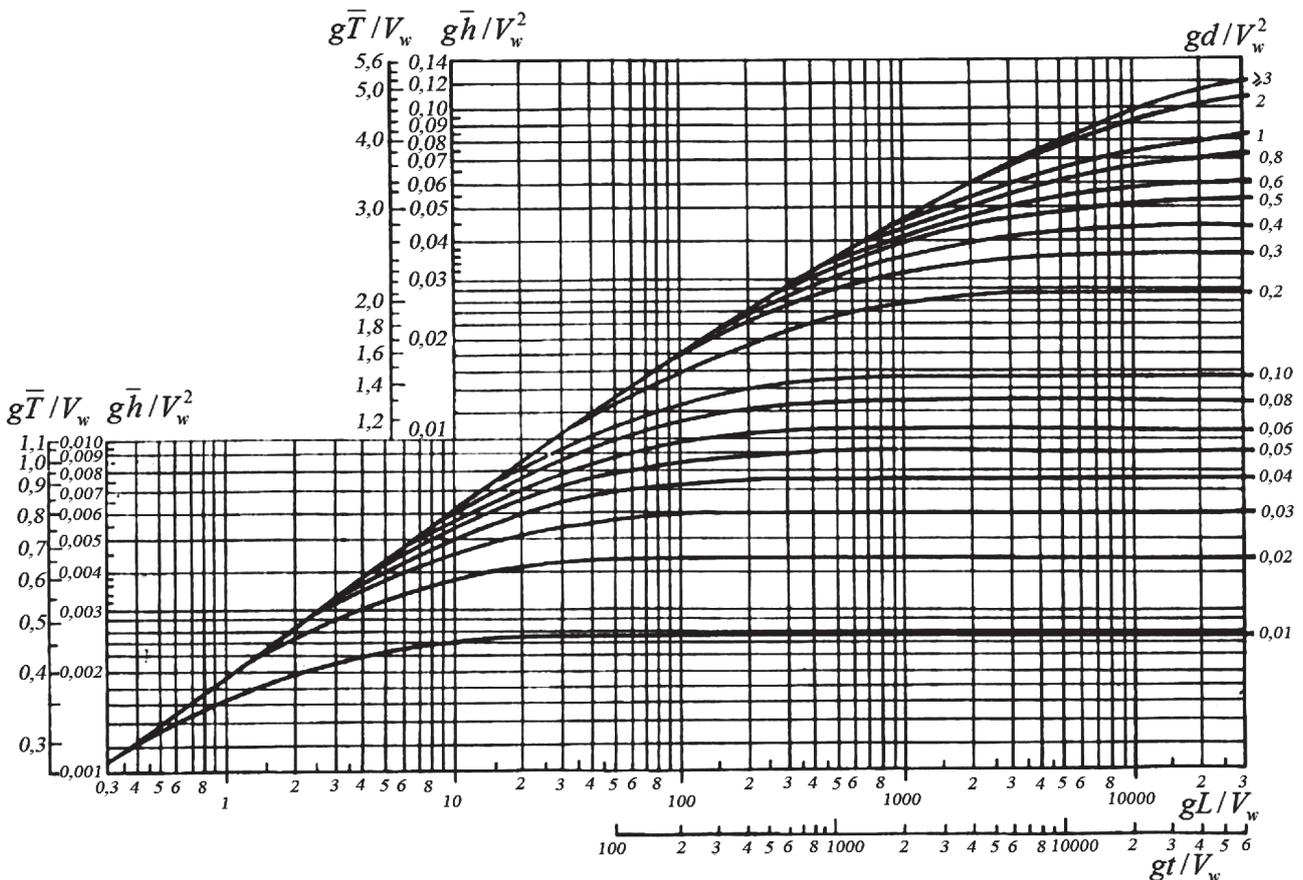


Рис. 4. График для определения элементов ветровых волн [3]

Поэтому, если известен средний период  $\bar{T}$ , средняя длина волны вычисляется по формуле:

$$\bar{\lambda}_d = g\bar{T}^2 / 2\pi \quad (7)$$

Остальные показатели, такие как высота волны  $h_1$  для мелководных водохранилищ и  $h_{sur}$  для прибойных зон, определяются по графикам и выведенным формулам, приведённым в нормативе [3].

### Выводы

Влияние волновых нагрузок может иметь разрушительный эффект для конструкций гидротехнических сооружений, если вовремя не принимать мер по противодействию влиянию этих нагрузок и недопущению разрушения как отдельных частей ГТС, так и плотин в целом. Характер влияния волновых нагрузок зависит в основном от типа волновых потоков.

Для получения объективных данных о величине наработки и, соответственно, остаточном эксплуатационном ресурсе гидротехнических сооружений необходимо учитывать множество воздействий, как природного, так и техногенного характера. Учёт влияния волновых нагрузок является неотъемлемой частью при формировании расчётной модели оперативной оценки остаточного ресурса гидротехнических сооружений. Особенно это актуально в последнее время при увеличении нестабильности климатических показателей в регионах мира, а также увеличения степени наработки гидротехнических сооружений вследствие естественных временных показателей, отсутствия собственников у большинства из них на территории Российской Федерации и территориях бывшего Советского Союза, а также отсутствия Федеральных целевых программ по поддержке и развитию отраслей, связанных со строительством и эксплуатацией особо опасных гидротехнических сооружений [4,5].

### Библиографический список

1. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения. / В.Н. Гордеев, А.И. Лантух-Лященко, В.А. Пашинский и др. Под. общей ред. А.В. Перельмутера. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. – 482 с.

2. Stokes G.G. Supplement to a paper on the theory of oscillatory waves. // Mathematics and Physics Paper. – Vol.1. – London: Cambridge University Press, 1880. – P. 197-229.,

3. СП 38.13330.2012 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (Волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04. – 82\*.

4. Жарницкий В.Я., Андреев Е.В. Особенности влияния неэксплуатационных динамических нагрузок на гидротехнические сооружения. // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2012. – № 5. – С. 25-29.

5. Жарницкий В.Я., Андреев Е.В. Принципы мониторинга технического состояния низконапорных грунтовых плотин, попадающих в группу риска на основании экспертного заключения. // Природообустройство. – 2013. – № 1. – С. 38-42.

Материал поступил в редакцию 23.04.2018 г.

### Сведения об авторах

**Жарницкий Валерий Яковлевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Основания и фундаменты, строительство и экспертиза объектов недвижимости» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 125550, г. Москва, Тимирязевская ул., д.49; e-mail: zharnitskiy@mail.ru, тел. +7(905)723072

**Андреев Евгений Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Основания и фундаменты, строительство и экспертиза объектов недвижимости» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 125550, г. Москва, Тимирязевская ул., д.49; e-mail: andreev-rf@mail.ru, тел. +7(929)6480927

V.YA. ZHARNITSKY, E.V. ANDREEV

Federal state budgetary educational institution of higher education «Russian state agrarian university RGAU-MSHA named after S.A. Timiryazev», Moscow, Russian Federation

## THE ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF WAVE LOADS ON HYDRAULIC STRUCTURES

*If to consider hydraulic engineering constructions as a system, then loads in this system are the least studied components because they have a wide range of variability both in temporal parameters and in spatial ones. Rated models and approaches which are used in the design practice have a rather conditional character. The most typical mistakes in the process of setting loads is their description in temporal parameters that leads to distortion of the picture of the dynamic behavior of a hydraulic engineering construction as under dynamic impacts on the structure the feedback between the influence of loads and the system itself is brightly shown. When researching loads may be classified as external and internal ones. As for the nature of origin*

*loads and impacts are various and appear in rather specific forms. The basis of the analysis of impacts may be a theory of reliability and application of methods of statistics and dynamics in calculations of hydraulic structures. There exist several approaches on solving a problem of the influence of wind waves on hydraulic structures. The basic one is replacement of running non-regular waves on hydraulic structures by regular waves. The second approach considers a wave action as a random process arising in time and which is not regulated by accurate intervals of action. For obtaining objective data on the size of the operating time and, respectively, residual operational resource of hydraulic engineering constructions it is necessary to consider a great number of influences, both of the natural and anthropogenic character. And recording of wave loads is an integral part in forming a rated model of the efficient assessment of the residual resource of hydraulic engineering constructions.*

*Hydraulic engineering structures, durability, period of observations, time series, statistical data, forecast of the state, wave action, wind waves, statistical description.*

### References

1. Nagruzki i vozdejstviya na zdaniya i sooruzheniya. / V.N. Gordeev, A.N. Lantuh-Lyashchenko, V.A. Pashinsky i dr. Pod obshchej red. A.V. Perelmutera. – M.: Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nyh vuzov, 2007. – 482 s.

2. **Stokes G.G.** Supplement to a paper on the theory of oscillatory waves. // Mathematics and Physics Paper. – Vol.1. – London: Cambridge University Press, 1880. – P. 197-229.,

3. SP 38.13330.2012. Nagruzki i vozdejstviya na gidrotehnicheskie sooruzheniya (Volnovye, ledovye i ot sudov). Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.06.04. – 82\*.

4. **Zharnitsky V.Ya., Andreev E.V.** Osobennosti vliyaniya neekspluatatsionnyh dinamicheskikh nagruzok na gidrotehnicheskie sooruzheniya. // Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotosjemka. – 2012. – № 5. – S. 25-29.

5. **Zharnitsky V.Ya., Andreev E.V.** Printsipy monitoringa tehničeskogo sostoyaniya nizkonapornyh gruntovyh plotin, popadayush-

chih v grupp riska na osnovanii ekspertnogo zaklyucheniya. // Prirodoobustrojstvo. – 2013. – № 1. – S. 38-42.

The material was received at the editorial office  
23.04.2018 g.

### Information about the authors

**Zharnitsky Valerij Yakovlevich**, doctor of technical sciences, professor of the chair «Bases and foundations, building and expertise of objects of estate property» FSBEI HE RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev; 125550, Moscow, Timiryazevskaya ul., d. 49; e-mail: zharnitskiy@mail.ru, тел. +7(905)723072

**Andreev Evgenij Vladimirovich**, candidate of technical sciences, associate professor of the chair «Bases and foundations, building and expertise of objects of estate property» FSBEI HE RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev; 125550, Moscow, Timiryazevskaya ul., d. 49; e-mail: andreev-rf@mail.ru, тел.: +7(929)6480927